University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Temporal changes in soil physicochemical properties during the first two years after a forest fire (Case study: Shenroud forest, Guilan, Iran)

Masoud Alidoust[1] | Ramin Naghdi[2]✉ | Mehrdad Nikooy[3] | Hamidreza Peyrowan[4] | Mohammadreza Khaledian[5] | Meysam Salimzadehshooiili[6]

1. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. E-mail: alidoust_ma@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. E-mail: rnaghdi@guilan.ac.ir
3. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. E-mail: nikooy@guilan.ac.ir
4. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: hrpeyrowan@yahoo.com
5. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. E-mail: khaledian@guilan.ac.ir
6. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran. E-mail: m.salimzadehshooiili@guilan.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 30 June 2026

Received in revised form 13 September 2026

Accepted 07 October 2026

Keywords:

Apparent specific gravity,
Forest fire,
Organic carbon,
Soil chemical fertility,
Temporal dynamics.

ABSTRACT

This study investigated the temporal dynamics of soil physicochemical properties following a forest fire in Series 4 of Babakouh, District 25 of Shenroud Forest, Siahkal County, Guilan Province, Iran. Soil sampling was conducted at 12 and 24 months post-fire across a burned area of approximately 10 hectares. Fifteen soil samples were collected in each period at a depth of 0–20 cm using a uniform distribution pattern, and then pooled into three composite samples per time point. A total of 30 individual samples (resulting in 6 composite samples) were transferred to the laboratory of the Guilan Agricultural and Natural Resources Research Center for analysis. Measured parameters included soil moisture, apparent specific gravity, soil texture, pH, electrical conductivity (EC), organic carbon (OC), total nitrogen (TN), available phosphorus, and available potassium. Results revealed significant increases ($P < 0.05$) in available potassium (49.94%), total nitrogen (2.89%), and organic carbon (38.78%) between the first and second year post-fire. In contrast, no significant differences were observed in physical properties, including soil moisture, apparent specific gravity, and soil texture ($P > 0.05$). These findings indicate that while soil chemical fertility is substantially altered in the short to medium term, the restoration of chemical fertility to pre-fire levels is a prolonged process requiring more than two years. Therefore, fire prevention remains a critical strategy for preserving forest soil chemical fertility.

Cite this article: Alidoust, M., Naghdi, R., Nikooy, M., Peyrowan, H., Khaledian, M., & Salimzadehshooiili, M. (2026). Temporal changes in soil physicochemical properties during the first two years after a forest fire (Case study: Shenroud forest, Guilan, Iran). *Journal of Natural Environment*, *79* (4), 781-796.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.417607.2926

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Forest fires are among the most destructive environmental disturbances, particularly in the Hyrcanian forests of northern Iran, where they not only degrade vegetation cover but also profoundly alter soil physical and chemical properties. These changes can have long-lasting effects on soil fertility, hydrological processes, and ecosystem resilience. Despite the increasing frequency and extent of wildfires in Guilan Province, especially in the eastern parts, empirical research on post-fire soil dynamics in this region remains scarce. This study was conducted to investigate the temporal changes in selected physical and chemical soil properties following a relatively severe wildfire in the Shenroud Forest, located in Siahkal County, Guilan Province, with a specific focus on comparing soil conditions at 12 and 24 months' post-fire.

Material and Methods

The study area covers approximately 10 hectares within the Babakouh series (District 25) of the Shenroud Forestry Plan, with an elevation range of 130 to 950 meters above sea level and a mean annual rainfall of 1465 mm, typical of a humid temperate climate. The dominant forest type includes mixed stands of hornbeam, ironwood, beech, and alder with a canopy cover of 25–65%. The fire occurred in autumn 2020, and soil sampling was conducted in two successive years (2021 and 2022), corresponding to 12 and 24 months after the fire. In each period, 15 individual soil samples were collected from the 0–20 cm depth within burned patches, ensuring uniform spatial distribution and representativeness. Three composite samples were prepared per period, resulting in a total of 30 individual samples and six composite samples, which were transferred to the laboratory of the Guilan Agricultural and Natural Resources Research Center for physicochemical analysis. The measured parameters included initial soil moisture (gravimetric method), bulk density (clod and paraffin method), soil texture (hydrometer method), pH and electrical conductivity (EC) (potentiometric method with pH and EC meters), organic carbon (Walkley–Black method), total nitrogen (Kjeldahl method), available phosphorus (Olsen method), and available potassium (flame photometry). Data normality was assessed using the Kolmogorov–Smirnov test, and mean comparisons between the two-time intervals were performed using independent t-tests at a 95% confidence level ($P<0.05$) via SPSS software.

Results and Discussion

The results revealed significant temporal differences in key chemical properties. Available potassium increased markedly from 186.39 mg/kg in the first year to 362.51 mg/kg in the second year, representing a 94.49% rise ($P<0.05$). Total nitrogen content increased from 0.37% to 0.70%, showing an 89.2% increase ($P<0.05$). Soil organic carbon also exhibited a substantial increase from 4.21% to 7.51%, corresponding to a 78.38% rise ($P<0.05$). In contrast, no statistically significant changes were observed in physical properties, including soil moisture (from 16.60% to 17.02%), bulk density (from 1.48 to 1.32 g/cm^3), pH (from 6.92 to 6.91), electrical conductivity (from 0.39 to 0.40 dS/m), or soil texture components (sand, silt, and clay) over the two-year period. However, a non-significant trend toward coarser texture was noted, with sand content increasing from 58% to 64.33% and clay content decreasing from 15.33% to 11%, suggesting a gradual shift that may predispose the soil to enhanced water erosion in the long term. The observed increases in nitrogen, potassium, and organic carbon are attributed to the gradual release of nutrients from partially burned biomass, the accumulation of charred organic residues, reduced plant uptake due to vegetation loss, and the onset of microbial decomposition and litter input from recovering understory species such as bracken fern, raspberry, and elderberry. The persistence of elevated potassium levels is consistent with its high volatilization temperature and its tendency to remain in ash as soluble oxides. The lack of significant pH and EC changes is explained by the neutralizing effect of heavy rainfall (over 1400 mm annually) in the region, which rapidly leaches alkaline ash compounds from the soil surface. These findings underscore that wildfire exerts a more pronounced and statistically significant influence on the chemical fertility of forest soils than on their physical framework within the first two years' post-fire. The study concludes that the recovery of soil chemical fertility—particularly nitrogen and organic carbon pools—requires more than two years, and that without active management interventions such as erosion control, grazing exclusion, and assisted revegetation, the risk of long-term soil degradation and nutrient depletion remains high. The results also highlight the urgent

need for integrated post-fire management strategies, including the prioritization of critical zones for soil conservation, the use of native species for rapid ground cover establishment, and the prevention of livestock grazing in burned areas to facilitate natural regeneration.

Conclusion

This research provides novel baseline data for the Hyrcanian forests of Guilan, where post-fire soil studies are still limited. The findings contribute to a better understanding of soil response mechanisms in humid temperate forest ecosystems and offer practical insights for forest managers and policymakers in designing evidence-based restoration programs. Future research is recommended to extend the monitoring period to at least five to ten years' post-fire in order to capture long-term recovery trajectories and to evaluate the combined effects of fire severity, topography, and post-fire land use on soil resilience.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

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

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

محیط زیست طبیعی

انتشارات دانشگاه تهران

شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

تغییرات زمانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو سال نخست پس از آتش‌سوزی جنگل (مطالعهٔ جنگل شنرود، گیلان، ایران)

مسعود علی‌دوست[۱] | رامین نقدی[۲]✉ | مهرداد نیکوی[۳] | حمیدرضا پیروان[۴] | محمدرضا خالدیان[۵] | میثم سلیم‌زاده شوئیلی[۶]

۱. گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: alidoust_ma@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: rnaghdi@guilan.ac.ir

۳. گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران. رایانامه: nikooy@guilan.ac.ir

۴. پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: hrpeyrowan@yahoo.com

۵. گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: khaledian@guilan.ac.ir

۶. گروه عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m.salimzadehshooiili@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۵

کلیدواژه‌ها:

آتش‌سوزی،

جرم ویژهٔ ظاهری،

حاصلخیزی شیمیایی خاک،

کربن آلی.

چکیده

در پژوهش حاضر روند تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پس از آتش‌سوزی جنگل در سری چهار باباکوه از حوزهٔ ۲۵ جنگلداری شنرود شهرستان سیاهکل، استان گیلان بررسی شد. بدین‌منظور در دو بازهٔ زمانی ۱۲ و ۲۴ ماه پس از آتش‌سوزی نمونه‌برداری خاک انجام شد. نمونه‌برداری خاک در منطقهٔ سوخته با مساحت حدود ۱۰ هکتاری با پراکندگی یکنواخت به تعداد ۱۵ نمونه خاک از عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری انجام شد. سپس سه نمونهٔ مرکب در هر بازهٔ زمانی تهیه شد. در مجموع ۳۰ نمونه خاک در دو سال متوالی تهیه و ۶ نمونهٔ مرکب خاک به آزمایشگاه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان انتقال یافت. پارامترهای مورد بررسی شامل اندازه‌گیری رطوبت خاک، جرم ویژهٔ ظاهری، بافت خاک، اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی خاک، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب و پتاسیم قابل جذب بودند. نتایج نشان داد که در مشخصه‌های شیمیایی خاک شامل پتاسیم قابل جذب، نیتروژن کل و کربن آلی به‌ترتیب افزایش ۹۴/۴۹، ۸۹/۲ و ۷۸/۳۸ درصدی بین میانگین داده‌ها در دو بازهٔ زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی جنگل تفاوت معنی‌دار وجود داشت ($P<0/05$)؛ ولی در مشخصه‌های فیزیکی خاک شامل رطوبت اولیه، جرم ویژه ظاهری و بافت خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ($P>0/05$). بنابراین، جلوگیری از آتش‌سوزی برای حفظ حاصلخیزی شیمیایی جنگل ضروری است، چرا که احیای حاصلخیزی شیمیایی خاک پس از آتش‌سوزی به زمان طولانی نیاز دارد.

استناد: علی‌دوست، مسعود؛ نقدی، رامین؛ نیکوی، مهرداد؛ پیروان، حمیدرضا؛ خالدیان، محمدرضا؛ و سلیم‌زاده شوئیلی، میثم (۱۴۰۵). تغییرات زمانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو سال نخست پس از آتش‌سوزی جنگل (مطالعهٔ جنگل شنرود، گیلان، ایران). *محیط زیست طبیعی*، ۷۹ (۴)، ۷۹۶–۷۸۱.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2026.417607.2926

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

خاک یکی از حیاتی‌ترین و پایه‌ای‌ترین منابع طبیعی روی کرهٔ زمین است که نه تنها بستر رشد گیاهان و تأمین زیستگاه جانداران محسوب می‌شود، بلکه در حفظ چرخه‌های محیط‌زیستی، تنظیم آب و انرژی، و پایداری زیست‌بوم‌ها نقش اساسی دارد. این منبع طبیعی پیچیده، با فراهم آوردن مواد مغذی، آب و اکسیژن مورد نیاز گیاهان، پایه‌گذار تولیدات اولیه در خشکی است و به‌عنوان مخزن مهم کربن، در کاهش تغییرات اقلیمی و تعدیل اثرات گرمایش زمین نقش دارد (Lal, 2020; FAO and ITPS, 2021). سلامت خاک تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی و همچنین فعالیت‌های انسانی قرار دارد و تخریب آن پیامدهای گسترده‌ای در زمینهٔ امنیت غذایی، تنوع زیستی و توسعهٔ پایدار به‌همراه خواهد داشت (Keesstra *et al*., 2021; Lehmann *et al*., 2020).

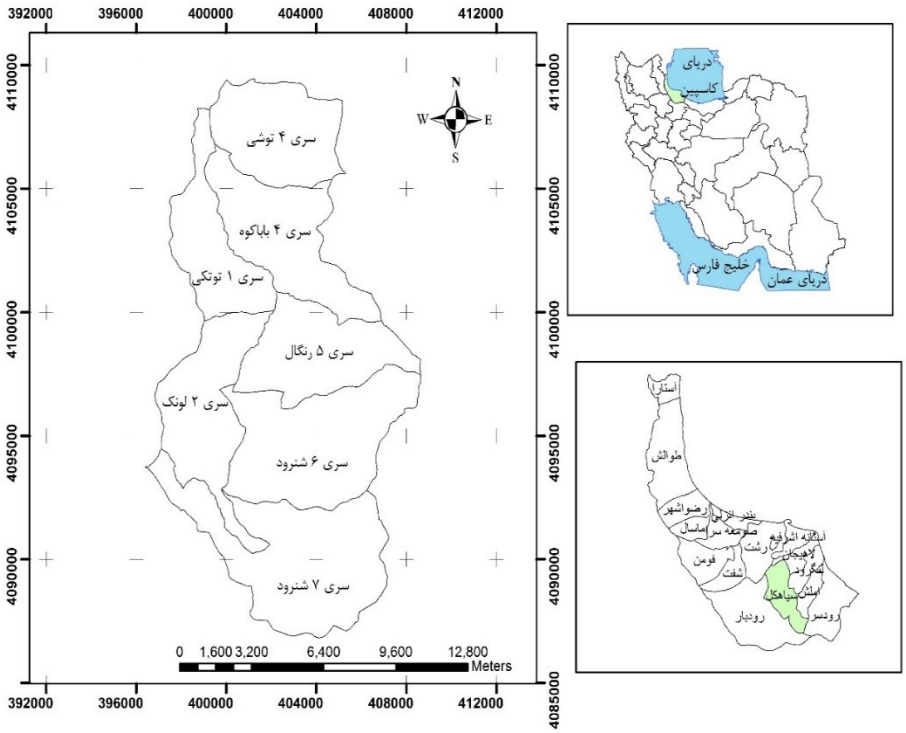
سه عامل اساسی خاک، آب و موجودات زنده در تعادل و پایداری زیست‌بوم جنگل نقش دارند که تحت تأثیر آتش‌سوزی با درجهٔ حرارت بالا به‌شدت دچار دگرگونی می‌شوند (Moslehi *et al*., 2013). آتش یکی از مخرب‌ترین عوامل تهدیدکنندهٔ عرصه‌های طبیعی در ایران و جهان محسوب می‌شود که فراوانی و شدت آن در دهه‌های اخیر به‌دلیل تغییر اقلیم و مدیریت نادرست افزایش یافته است (Jones *et al*., 2022). براساس آمار ادارهٔ کل منابع طبیعی استان گیلان، در استان گیلان نیز طی سال‌های ۱۳۹۹–۱۳۹۷ حدود ۱۸۶۰ هکتار از عرصه‌های طبیعی دچار آتش‌سوزی شده است. آتش‌سوزی با حذف پوشش گیاهی و لاشبرگ، ساختمان خاک را تخریب کرده و باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب می‌شود (Pausas and Keeley, 2019; Shakesby, 2019). همچنین حرارت بالا موجب تغییرات شیمیایی از جمله افزایش pH، آزادسازی عناصر غذایی (N, P, K) و کاهش یا افزایش کربن آلی می‌گردد (Alcañiz *et al*., 2018; Certini *et al*., 2021). این تغییرات تا زمان احیای پوشش گیاهی ادامه دارند و می‌توانند سال‌ها بر اکوسیستم تأثیر بگذارند (Ebel and Martin, 2021). مطالعات داخلی و خارجی نشان داده‌اند که آتش‌سوزی معمولاً منجر به افزایش کوتاه‌مدت عناصر غذایی خاک می‌شود. به‌طوری‌که Kong و همکاران (۲۰۱۸) در جنگل‌های چین، افزایش نیتروژن و فسفر را یک سال پس از آتش گزارش کردند. در ایران، Ali و همکاران (۲۰۲۱) در حوضهٔ زریبار افزایش ۷۰، ۲۸۶ و ۴۸ درصدی را به‌ترتیب برای N، P و K در سال اول مشاهده نمودند، هرچند پس از چهار سال فقط پتاسیم به حالت اولیه بازگشت. همچنین Heydari و همکاران (۲۰۲۰) در جنگل‌های زاگرس افزایش معنی‌دار N و K را دو سال پس از آتش نشان دادند. این یافته‌ها حاکی از آن است که واکنش عناصر غذایی به آتش، تابع شدت حریق، زمان نمونه‌برداری و شرایط اقلیمی است (Alcañiz *et al*., 2018). آتش‌سوزی‌های با شدت بالا می‌توانند کربن آلی خاک را تا ۵۰ درصد کاهش داده و قابلیت دسترسی عناصر غذایی را برای سال‌ها دگرگون کنند (Pellegrini *et al*., 2021).

حوزهٔ آبخیز شهرستان سیاهکل با مساحت ۴/۱۲۶ کیلومترمربع، شامل ۷۳/۶۵ کیلومترمربع (بیش از ۸۷ درصد) مناطق جنگلی است. هر ساله آتش‌سوزی‌های وسیع عمدی و غیرعمدی در این اراضی رخ داده و خسارات فراوانی به پوشش گیاهی وارد می‌کند. با وجود این، تاکنون هیچ پژوهشی در مورد اثرات آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جنگل شنرود شهرستان سیاهکل (استان گیلان) انجام نشده است. درک فرآیندهای پس از آتش‌سوزی برای ارزیابی خطرات، تعیین راهبردهای اصلاحی و مدیریت پویای مواد مغذی و انتقال آلاینده‌ها ضروری است (Bodi *et al*., 2020). ولی فقدان اطلاعات پایه در منطقهٔ مورد مطالعه و افزایش چشمگیر فراوانی و وسعت آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های استان گیلان طی سال‌های اخیر است، ضرورت انجام پژوهش حاضر و نظایر آن را روشن می‌کند. این پژوهش، بررسی کمی و کیفی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت، تخلخل، جرم ویژهٔ ظاهری، پایداری خاک‌دانه و ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل کربن آلی، pH، قابلیت هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل تبادل در مناطق سوخته دو سال بعد از آتش‌سوزی نسبت به مناطق شاهد (یکسال پس از آتش‌سوزی) در جنگل شنرود می‌باشد. این مطالعه می‌تواند در تدوین برنامه‌های مدیریتی احیا پس از آتش‌سوزی، تعیین دورهٔ نقاهت خاک، کاهش اثرات منفی بر منابع آب و خاک و ارائهٔ راهکارهای عملی به ادارات منابع طبیعی و محیط‌زیست برای اولویت‌بندی مناطق نیازمند عملیات حفاظتی و اصلاحی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای مدل‌سازی تغییرات خاک پس از آتش‌سوزی در جنگل‌های هیرکانی فراهم آورده و به دانش موجود دربارهٔ واکنش خاک‌های مناطق مرطوب معتدل به آتش‌سوزی بیفزاید.

روش‌شناسی پژوهش

منطقهٔ مورد مطالعه: اجرای این پژوهش در منطقهٔ جنگلی پایین‌بند سری چهار کاکوه (باباکوه قدیم) حوزهٔ آبخیز شماره ۲۵ شنرود با مساحت کل ۲۳۱۸/۸ هکتار انجام شد. سری باباکوه شامل ۳۱ پارسل می‌باشد. حداقل ارتفاع ۱۳۰ و حداکثر ۹۵۰ متر، در دامنه‌های مشرف به رودخانه‌های شنرود و باباکوه و در جنوب شهرستان سیاهکل و در فاصلهٔ ۱۰ کیلومتری آن قرار دارد. سری مذکور از نظر تقسیمات اداری زیر نظر ادارهٔ منابع طبیعی شهرستان سیاهکل از حوزهٔ ادارهٔ کل منابع طبیعی گیلان است. این سری از شمال به طرح جنگلداری سری ۳ توشی، از جنوب به طرح جنگل‌داری سری ۵ رنگال، از طرف غرب به رودخانهٔ شنرود و از شرق به طرح جنگلداری سری یک کمپل محدود می‌گردد. منطقهٔ مورد پژوهش در قطعات ۴۰۲ و ۴۰۳ در مختصات جغرافیایی ″۴۸ ′۴ °۳۷ تا ″۱۰ ′۵ °۳۷ عرض شمالی و ″۰۲ ′۵۳ °۴۹ تا ″۲۷ ′۵۴ °۴۹ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). تیپ تودهٔ جنگلی شامل: ممرز–لیلکی، ممرز–انجیلی و لرگ–توسکا با کیفیت ضعیف یک تا دو اشکوبهٔ جوان و میانسال دانه‌زاد است. گیاهان همراه و معرف Carexsp–فرفیون- انواع بنفشه–پامچال–سرخس پرعقابی و پنجه‌ای–سیکلامن، وضعیت زادآوری، ضعیف و پراکنده تا لکه‌ای، میزان تاج‌پوشش ۶۵–۲۵ درصد، پوشش کف جنگل ۸۰–۶۵ درصد از گیاهان سرخس پر عقابی–تمشک–آقطی–علف روسی و بذردهی درختان در منطقهٔ ضعیف است. بهره‌برداری در قالب طرح جنگلداری در منطقه صورت نگرفته اما برداشت درختان برای مصارف روستائیان و قاچاق به‌صورت محدود وجود دارد. براساس اطلاعات ادارهٔ کل منابع طبیعی استان گیلان، پاییز سال ۱۳۹۹ مساحت حدود ۱۰ هکتار از عرصهٔ جنگلی این قطعات دچار آتش‌سوزی با درجهٔ آتش‌سوزی نسبتاً شدید شد. مساحت لکه‌های آتش‌سوزی در سطوح کوچک حدود ۱۰ متر مربع تا لکه‌های بزرگ بیش از ۵۰۰ متر مربع دیده شد.

براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی ازبرم، میانگین بارندگی سالانه ۱۴۶۵ میلی‌متر، دمای متوسط ۲۶ درجهٔ سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰–۹۰٪ است. ارتفاع متوسط منطقه ۳۵۰ متر، جهت دامنهٔ جنوب‌غربی و اقلیم براساس آمبرژه، مرطوب است. از نظر زمین‌شناسی، سری باباکوه از رسوبات دوران دوم (ژوراسیک و کرتاسه) تشکیل شده که شامل ماسه‌سنگ، سیلستون، آرژیلیت و شیل‌های زغالی (سازند شمشک) است. سنگ مادری از نوع ماسه‌سنگ و سیلستون با نفوذپذیری متوسط می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان گیلان و شهرستان سیاهکل

Figure 1. The location of the study area in Iran, Guilan Province, and Siahkal County

برای قطعهٔ ۴۰۲ مورد پژوهش، بافت خاک (L, C-L, C)، تیپ خاک قهوه‌ای پدزول شده با عمق ۱۰۰ سانتی‌متر، ساختمان خاک تکامل یافته و بدون سنگریزه، نوع هوموس مول جنگلی، عمق ریشه‌دوانی ۷۰ سانتی‌متر، میزان نفوذپذیری خاک متوسط تا خوب، وضعیت خاک از نظر فرسایش حساس به فرسایش و pH خاک ۶/۹ بود.

نمونه‌برداری به‌منظور بررسی اثرات آتش‌سوزی را می‌توان به نمونه‌برداری آنی (از شروع آتش‌سوزی تا یک سال)، نمونه‌برداری کوتاه‌مدت (از اتمام آتش‌سوزی تا دو سال) و نمونه‌برداری بلندمدت (بیش از سه سال) تقسیم‌بندی کرد (Ranalli *et al*., 2004). در این پژوهش باتوجه به اهداف آن، نمونه‌برداری خاک به‌منظور بررسی روند تغییرات در دو بازهٔ زمانی ۱۲ و ۲۴ ماه پس از آتش‌سوزی از آذر ماه ۱۴۰۰ انجام شد. انتظار می‌رود تغییرات فصلی در طی این مدت موجب احیای تدریجی ویژگی‌های خاک شود. انجام صرفاً دوبار نمونه‌برداری با توجه به محدودیت زمانی مطالعه و محدودیت مالی اتخاذ شده است.

روش نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های خاک: به‌منظور بررسی روند تغییرات برخی مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک جنگل در بازهٔ زمانی یک و دو سال بعد از آتش‌سوزی، نمونه‌برداری خاک در منطقهٔ سوختهٔ داخل لکه‌های آتش‌سوزی با پراکندگی یکنواخت به تعداد ۱۵ نمونه خاک از عمق ۲۰–۰ سانتی‌متری به‌طوری‌که نمونه‌ها نمایندهٔ منطقه باشد از نوع کوتاه‌مدت برداشت شد. سپس سه نمونهٔ مرکب در هر بازهٔ زمانی تهیه شد. در مجموع ۳۰ نمونه خاک در دو سال متوالی (هر سال ۱۵ نمونه) برداشت شد و سپس ۶ نمونهٔ مرکب خاک (هر سال ۳ نمونهٔ مرکب) به آزمایشگاه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان به‌منظور اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک انتقال یافت (Ashrafi *et al*., 2016; Molavi *et al*., 2008). نمونه‌ها پس از خشک و پاک کردن از شاخه و برگ‌ها، عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تجزیه‌وتحلیل آزمایشگاهی آماده شد (شکل ۲).

پارامترهای مورد بررسی و روش آزمایش در این پژوهش شامل: اندازه‌گیری رطوبت اولیهٔ خاک با روش وزنی، جرم ویژهٔ ظاهری به روش کلوخه و پارافین، بافت خاک به روش هیدرومتری، اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی با عصارهٔ اشباع خاک به روش پتانسیومتری با دستگاه pH متر و EC سنج، کربن آلی به روش والکلی–بلک، نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner and Mulvaney,1982)، فسفر قابل جذب به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب به روش فلیم فتومتری در محیط آزمایشگاه سنجش شد (شکل‌های ۳ تا ۵). پیش از هرگونه تحلیل آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف–اسمیرنوف ارزیابی گردید. در ادامه، به‌منظور مقایسهٔ میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو سال متوالی پس از وقوع آتش‌سوزی و همچنین بررسی روند تغییرات آنها، از آزمون تی‌تست دو نمونهٔ مستقل، متناسب با طراحی مطالعه استفاده شد. کلیهٔ محاسبات آماری در نرم‌افزار SPSS و در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام پذیرفت. در نهایت، رسم نمودارهای مربوط به نتایج نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel صورت گرفت.



شکل ۲- خشک و پاک کردن نمونه‌های خاک

Figure 2. Drying and cleaning of soil samples



شکل ۳- اندازه‌گیری رطوبت اولیهٔ خاک به روش وزنی

Figure 3. Determination of initial soil moisture by the gravimetric method



شکل ٤- اندازه‌گیری جرم ویژهٔ ظاهری خاک به روش کلوخه و پارافین

Figure 4. Determination of soil bulk density by the clod and paraffin method



شکل ٥- اندازه‌گیری خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

Figure 5. Measurement of physical and chemical properties of soil

یافته‌های پژوهش

تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک: نتایج آزمون t-test مستقل نشان داد که بین دو بازهٔ زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی، تفاوت معنی‌داری در سه ویژگی شیمیایی خاک شامل نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و کربن آلی وجود دارد ($P<۰/۰۵$). در مقابل، فسفر قابل جذب، pH و قابلیت هدایت الکتریکی تفاوت معنی‌داری نشان ندادند ($P>۰/۰۵$، جدول ۱). نیتروژن کل در سال دوم پس از آتش‌سوزی به‌طور معنی‌داری بیشتر از سال اول بود، به‌طوری که میانگین آن از ۰/۳۷ درصد در سال اول به ۰/۷۰ درصد در سال دوم افزایش یافت (افزایش ۱۸/۸۹ درصد) (شکل ۶). پتاسیم قابل جذب نیز افزایش معنی‌داری را نشان داد. میانگین این عنصر از ۳۹/۱۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سال اول به ۵۱/۳۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سال دوم رسید که بیانگر افزایش ۹۴/۴۹ درصدی است (شکل ۷). کربن آلی خاک نیز در سال دوم نسبت به سال اول افزایش معنی‌داری داشت، به‌طوری که از ۲۱/۴ درصد به ۵۱/۷ درصد رسید (افزایش ۳۸/۷۸ درصد) (شکل ۸). در مورد فسفر قابل جذب، اگرچه میانگین آن در سال دوم (۲۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر از سال اول (۹۹/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود، اما این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۹). همچنین اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی تغییرات معنی‌داری در بازهٔ دو ساله نشان ندادند (شکل ۹).

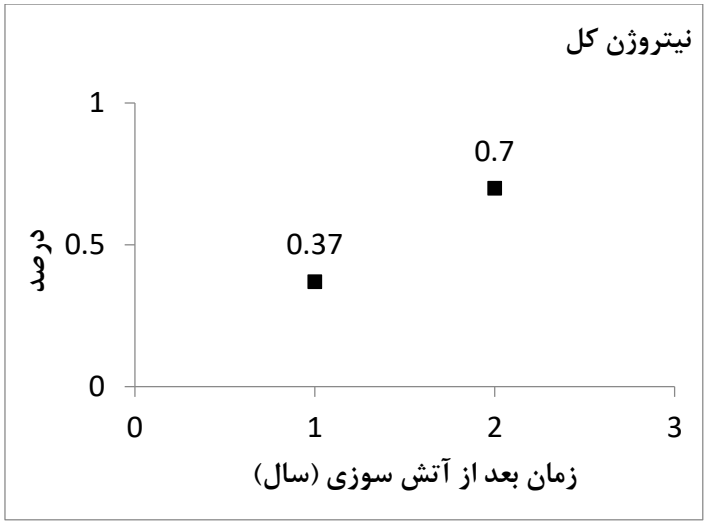
جدول ۱- مقایسهٔ کمی تغییرات میانگین±انحراف معیار برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در بازهٔ زمانی یک و دو سال بعد از آتش سوزی جنگل

Table 1. Quantitative comparison of mean±standard deviation of changes in some chemical and physical soil properties over the one- and two-year periods after the forest fire

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی	یک سال بعد از آتش سوزی	دو سال بعد از آتش سوزی	df	t	*P*
پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	186.39±5.47[a]	362.51±37.12[b]	4	21.80	<0.001
فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	1.99±1.17[a]	2.27 ±0.82[a]	4	0.34	0.751
نیتروژن کل (درصد)	37±10[a]	70 ±10[b]	4	4.04	0.015
کربن آلی (درصد)	4.21±0.75[a]	7.51 ± 1.02[b]	4	4.5	0.011
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	0.39±0.04[a]	0.4±0.079[a]	4	0.2	0.851
pH	6.92±0.04[a]	6.91±0.079[a]	4	0.19	0.857
جرم ویژه ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	1.48±0.1[a]	1.32±0.1[a]	4	1.93	0.126
شن (درصد)	58±1.15[a]	64.33±1.33[a]	4	6.2	0.062
سیلت (درصد)	26.67±1.15[a]	24.67±1.15[a]	4	2.13	0.100
رس (درصد)	15.33±0.0[a]	11±4.62[a]	4	1.62	0.180
رطوبت اولیه (درصد)	16.60±0.46[a]	17.02±0.26[a]	4	1.38	0.239

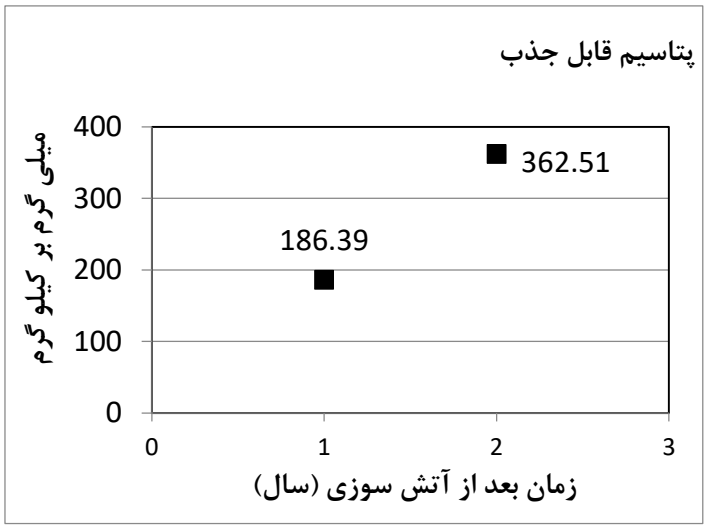
* حروف لاتین غیر همسان نشان‌دهندهٔ وجود اختلاف معنی‌دار میانگینهٔها در سطح اعتماد ۹۵ درصد است.

تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک: نتایج نشان داد که هیچ‌یک از ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل درصد ذرات خاک (شن، سیلت و رس)، جرم ویژهٔ ظاهری و رطوبت اولیه در بازهٔ دو ساله پس از آتش‌سوزی تغییر معنی‌داری نداشتند ($P>0/05$، جدول ۱). بافت خاک اگرچه روند کاهشی در رس (از ۳۳/۱۵ به ۱۱ درصد) و افزایشی در شن (از ۵۸ به ۳۳/۶۴ درصد) را نشان داد، اما این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبودند (شکل ۹). همچنین سیلت نیز تغییر معنی‌داری نداشت. جرم ویژهٔ ظاهری خاک از ۴۸/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در سال اول به ۳۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در سال دوم کاهش یافت، اما این کاهش معنی‌دار نبود. رطوبت اولیه خاک نیز تغییر معنی‌داری نشان نداد (شکل ۹).



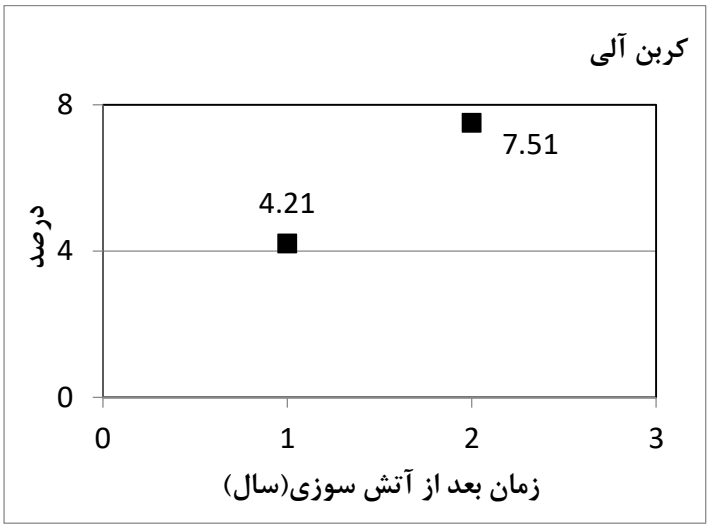
شکل ٦- تغییرات درصد نیتروژن کل خاک در بازهٔ زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی جنگل

Figure 6. Changes in total soil nitrogen percentage over the one- and two-year periods after the forest fire



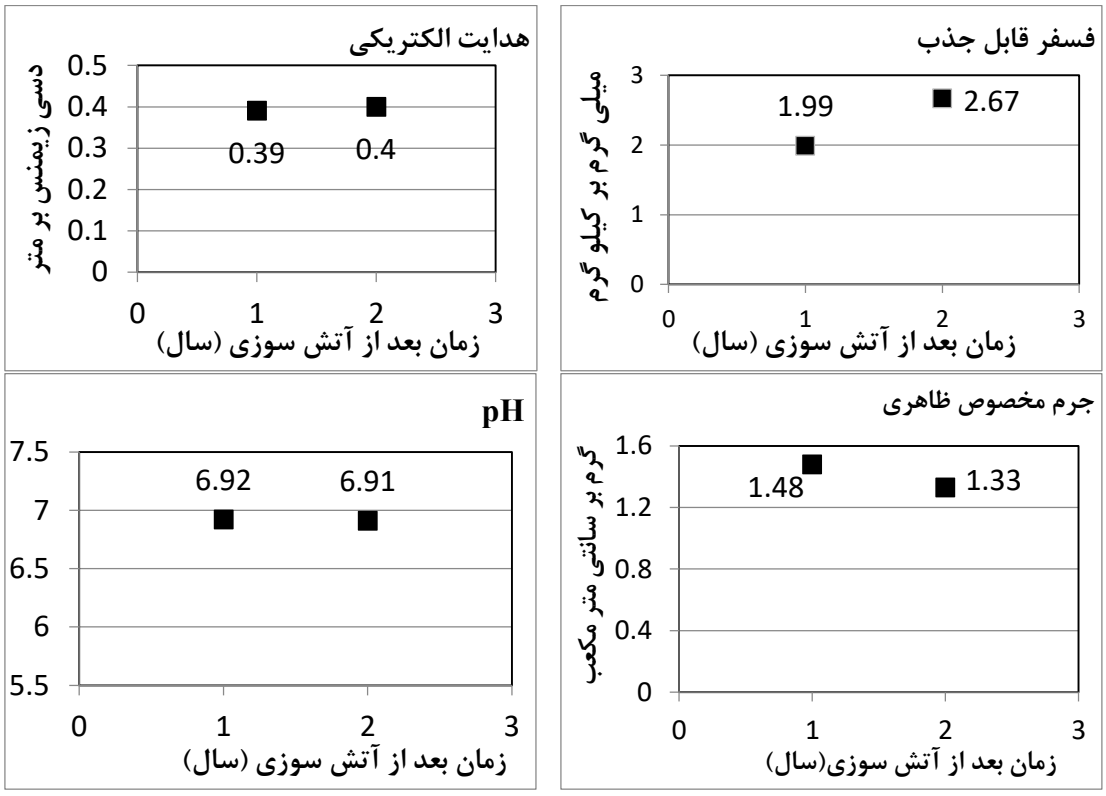
شکل ۷- تغییرات پتاسیم قابل جذب خاک در بازهٔ زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی جنگل

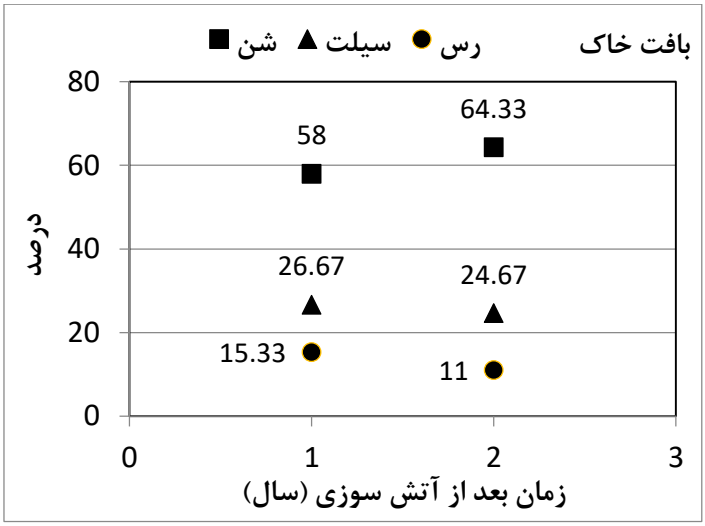
Figure 7. Changes in soil available potassium over the one- and two-year periods after the forest fire



شکل ۸- تغییرات کربن آلی خاک در بازه زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی جنگل

Figure 8. Changes in soil organic carbon over the one- and two-year periods after the forest fire





شکل ۹- تغییرات فسفر قابل جذب، قابلیت هدایت الکتریکی، جرم ویژهٔ ظاهری، اسیدیته و درصد ذرات خاک در بازهٔ زمانی یک و دو سال پس از آتش‌سوزی جنگل

Figure 9. Changes in available phosphorus, electrical conductivity, bulk density, acidity (pH), and soil particle percentage over the one- and two-year periods after the forest fire

بحث

این پژوهش به‌دلیل ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی آتش‌سوزی، با محدودیت‌های اساسی مواجه بوده است. نخست، هیچ‌گونه داده‌ای از وضعیت خاک پیش از آتش‌سوزی در دسترس نبود و منطقهٔ شاهد نسوخته‌ای نیز برای مقایسهٔ مستقیم وجود نداشت. بنابراین، در این مطالعه بازهٔ زمانی ۱۲ ماه پس از آتش‌سوزی به‌عنوان شبه‌شاهد در نظر گرفته شده و تغییرات در بازهٔ ۲۴ ماه نسبت به آن سنجیده شده است. این رویکرد اگرچه در پژوهش‌های پس‌رویداد آتش‌سوزی رایج است (Girona-García *et al*., 2021; Kong *et al*., 2018)، اما نمی‌تواند به‌طور قطعی اثر علّی آتش‌سوزی را اثبات کند. دوم، سازوکارهای احتمالی مانند افزایش فعالیت میکروبی، تجزیهٔ لاشبرگ، شسته‌شدن رس و تولید زغال در این مطالعه به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند و بنابراین هرگونه اشاره به آنها در این بحث، تنها به‌عنوان فرضیه یا تفسیر احتمالی مطرح می‌شود، نه نتیجه‌گیری قطعی. سوم، تغییرات غیرمعنی‌دار آماری در بافت خاک (کاهش رس و افزایش شن) نباید به‌عنوان شواهد قطعی درشت‌دانه‌شدن خاک تلقی شوند، بلکه تنها یک روند هشداردهنده محسوب می‌شوند که نیازمند پایش بلندمدت است. بنابراین، دامنهٔ استنباط‌های این پژوهش محدود به تغییرات زمانی مشاهده‌شده در دو مقطع پس از آتش‌سوزی است و تعمیم آن به اثرات علّی قطعی آتش‌سوزی باید با احتیاط انجام شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین نیتروژن کل خاک در سال دوم پس از آتش‌سوزی نسبت به سال اول، افزایش معنی‌داری معادل ۸۹ درصد داشت (از ۰/۳۷ به ۰/۷۰ درصد). این یافته با نتایج مطالعات متعددی همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند آتش‌سوزی می‌تواند منجر به افزایش کوتاه‌مدت نیتروژن خاک شود (Heydari *et al*., 2020; Wang *et al*., 2021). علت این افزایش را می‌توان به عوامل زیر نسبت داد: ۱) ورود نیتروژن موجود در زیست‌تودهٔ گیاهی سوخته شده به خاک، ۲) افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده در شرایط پس از آتش، و ۳) کاهش جذب نیتروژن توسط پوشش گیاهی تخریب شده (Certini *et al*., 2021). در مقابل، برخی پژوهشگران گزارش کرده‌اند که آتش‌سوزی با شدت بالا می‌تواند باعث تصعید و هدررفت نیتروژن خاک به‌دلیل دمای بیش از ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس شود (Boom *et al*., 2019; Pellegrini *et al*., 2021). با این حال، در مطالعهٔ حاضر که شدت آتش‌سوزی نسبتاً شدید گزارش شده است، افزایش نیتروژن مشاهده گردید که احتمالاً به‌دلیل تجمع بقایای گیاهی نیمه‌سوخته و بازگشت تدریجی نیتروژن از طریق لاشبرگ جدید است. افزایش مشاهده‌شده در نیتروژن کل خاک می‌تواند ناشی از آزادسازی نیتروژن از تودهٔ گیاهی سوخته، افزایش فعالیت میکروبی در شرایط پس از آتش، یا کاهش جذب نیتروژن توسط پوشش گیاهی تخریب‌شده باشد (Certini *et al.*, 2021). با این حال، با توجه به نبود دادهٔ پیش از آتش

و منطقهٔ شاهد، نمی‌توان این افزایش را به‌طور قطعی به آتش‌سوزی نسبت داد و سایر عوامل مانند تغییرات فصلی یا ورود لاشبرگ جدید نیز می‌توانند در آن نقش داشته باشند. نتایج مشابهی توسط Ali و همکاران (۲۰۲۱) در جنگل‌های زریبار و همچنین توسط Liu و همکاران (۲۰۲۰) در جنگل‌های سوزنی‌برگ کشور چین گزارش شده است. با این حال، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج Shaoqing و همکاران (۲۰۱۰) که کاهش نیتروژن را پس از آتش گزارش کردند، مغایرت دارد. این اختلاف را می‌توان به تفاوت در نوع پوشش گیاهی، شدت حریق و زمان نمونه‌برداری نسبت داد (Alcaniz *et al*., 2018). به‌طور کلی، نیتروژن کل خاک در کوتاه‌مدت تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته و بازگشت آن به سطح پایدار نیازمند زمان بیش از دو سال است. مطابق نتایج، پتاسیم قابل جذب خاک در سال دوم نسبت به سال اول افزایش معنی‌داری معادل ۵۰ درصد نشان داد (از ۱۸۶ به ۳۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم). افزایش بیش از دو برابری پتاسیم قابل جذب در سال دوم احتمالاً ناشی از آزادسازی تدریجی این عنصر از بقایای در حال تجزیه و خاکستر است (Santin and Doerr, 2016). این یافته با نتایج مطالعات (Kong *et al*., 2018; Ali *et al*., 2021) همخوانی دارد. با این حال، تفسیر قطعی دربارهٔ نقش آتش‌سوزی در این افزایش، با توجه به محدودیت‌های ذکر شده، دشوار است. این افزایش با نتایج پژوهش‌های متعددی مطابقت دارد که گزارش کرده‌اند آتش‌سوزی باعث آزادسازی پتاسیم از بافت گیاهی و تبدیل آن به شکل قابل جذب می‌شود (Pereira *et al*., 2019; Bodi *et al*., 2020). پتاسیم برخلاف نیتروژن در دماهای بالا (تا ۷۰۰ درجهٔ سلسیوس) تصعید نمی‌شود و به‌صورت اکسیدهای قلیایی در خاکستر باقی می‌ماند (Santin and Doerr, 2016).

پژوهش‌های میدانی نیز نشان داده‌اند که پتاسیم قابل جذب می‌تواند تا چندین سال پس از آتش‌سوزی در سطح بالایی باقی بماند. Ali و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که چهار سال پس از آتش‌سوزی، تنها پتاسیم بود که به سطح قبل از آتش‌سوزی بازگشت، در حالی‌که نیتروژن و فسفر هنوز تغییرات معنی‌داری داشتند. Kong و همکاران (۲۰۱۸) نیز افزایش معنی‌دار پتاسیم را یک سال پس از آتش‌سوزی در جنگل‌های چین گزارش کردند. بنابراین، پتاسیم به‌عنوان یک شاخص حساس برای ارزیابی آثار کوتاه‌مدت و میان‌مدت آتش‌سوزی بر حاصلخیزی خاک محسوب می‌شود (Fernández-García *et al*., 2019). در مطالعهٔ حاضر، افزایش بیش از دو برابری پتاسیم در سال دوم نسبت به سال اول نشان‌دهندهٔ آزادسازی تدریجی این عنصر از بقایای در حال تجزیه است. در این پژوهش، کربن آلی خاک در سال دوم نسبت به سال اول افزایش معنی‌داری معادل ۳۸/۷۸ درصد نشان داد (از ۲۱/۴ به ۵۱/۷ درصد). این یافته در نگاه اول با تصور رایج که آتش‌سوزی باعث کاهش مادهٔ آلی خاک می‌شود، مغایرت دارد. با این حال، باید توجه داشت که در این مطالعه نمونه‌برداری از سال اول پس از آتش انجام شده است و داده‌ای از وضعیت قبل از آتش در دست نیست. افزایش کربن آلی در سال دوم نسبت به سال اول می‌تواند به ورود لاشبرگ جدید از پوشش گیاهی در حال احیا، تجمع بقایای نیمه‌سوخته و زغال و یا افزایش فعالیت ریشه‌های گیاهان مهاجم نسبت داده شود (Shakesby, 2019; Vieira *et al.*, 2020). این یافته با نتایج Heydari و همکاران (۲۰۲۰) در جنگل‌های زاگرس همسو است، اما با نتایج Shaoqingو همکاران (۲۰۱۰) که کاهش نیتروژن را گزارش کردند، مغایرت دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در شدت حریق، نوع پوشش گیاهی، شرایط اقلیمی و زمان نمونه‌برداری باشد.

مطالعات متاآنالیز گسترده نشان داده است که پاسخ کربن آلی خاک به آتش‌سوزی تابع شدت آتش‌سوزی است. در آتش‌سوزی‌های با شدت پایین، کربن آلی ممکن است افزایش یابد زیرا زغال حاصل از سوختن ناقص به‌عنوان یک شکل مقاوم کربن وارد خاک می‌شود (Pellegrini *et al*., 2021). در آتش‌سوزی‌های با شدت بسیار بالا، کربن آلی تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Alcaniz *et al*., 2018). در منطقهٔ مورد مطالعه با توجه به مشاهدات میدانی (وجود لکه‌های سوخته با درجات مختلف و تاج‌پوشش ۶۵–۲۵ درصد)، احتمالاً شدت آتش‌سوزی یکنواخت نبوده و در برخی نقاط سوختگی ناقص منجر به تولید زغال و افزایش کربن آلی شده است. نتایج پژوهش Heydari و همکاران (۲۰۲۰) در جنگل‌های زاگرس نیز افزایش کربن آلی دو سال پس از آتش را گزارش کرده است که با یافته‌های حاضر همسو است. با این وجود، برای درک کامل روند بلندمدت کربن آلی، نیاز به نمونه‌برداری در سال‌های آتی وجود دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که فسفر قابل جذب (افزایش ۱۷/۳۴ درصدی)، قابلیت هدایت الکتریکی، pH، جرم ویژهٔ ظاهری و بافت خاک در دو بازهٔ زمانی تفاوت معنی‌داری نداشتند. اگرچه تغییرات فسفر از نظر آماری معنی‌دار نبود،

اما روند افزایشی آن قابل توجه است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که فسفر در دماهای بالای ۳۰۰ درجهٔ سلسیوس می‌تواند تبخیر شود، اما در خاکستر تجمع می‌یابد (Pereira *et al*., 2019). احتمالاً افزایش غیرمعنی‌دار فسفر در مطالعهٔ حاضر به‌دلیل زمان نسبتاً کوتاه (دو سال) و عدم بازگشت کامل پوشش گیاهی است. Ali و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که فسفر کل در سال اول افزایش ۲۸۶ درصدی داشت، اما پس از چهار سال به حالت طبیعی بازگشت. بنابراین انتظار می‌رود با گذشت زمان، فسفر نیز روند کاهشی به‌سمت حالت پایدار را طی کند.

عدم تغییر معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی در این مطالعه با یافته‌های Granged و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد، پژوهش‌های جدیدتر نیز نشان داده‌اند که EC فقط بلافاصله پس از آتش افزایش گذرا دارد و پس از یک سال به حالت اولیه باز می‌گردد (Zavala *et al*., 2019; Nave *et al*., 2022). همچنین در خصوص pH، نتایج نشان‌دهندهٔ پایداری نسبی آن در طول دو سال بود (از ۶/۹۲ به ۶/۹۱). این در حالی است که برخی پژوهشگران افزایش pH را بلافاصله پس از آتش به‌دلیل ورود اکسیدهای قلیایی خاکستر گزارش کردند (Nave *et al*., 2022). عدم مشاهدهٔ تغییر معنی‌دار pH در مطالعهٔ حاضر می‌تواند به‌دلیل زمان نمونه‌برداری (از سال اول به بعد) و خنثی شدن اثر قلیایی خاکستر توسط بارندگی‌های فراوان منطقه (میانگین ۱۴۶۵ میلی‌متر در سال) باشد (Bodi *et al*., 2020). آب‌شویی سریع خاکستر توسط باران‌های پاییزی و زمستانی گیلان می‌تواند اثر قلیایی موقت را خنثی کرده باشد. در مورد جرم ویژهٔ ظاهری، عدم تغییر معنی‌دار نشان می‌دهد که ساختار فیزیکی خاک در مقیاس دو ساله به‌شدت دچار دگرگونی نشده است. با این حال، روند کاهشی جرم ویژهٔ ظاهری از ۱/۴۸ به ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب (حدود ۱۰ درصد کاهش) اگرچه از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما از نظر اکولوژیک قابل‌توجه است. این کاهش می‌تواند با افزایش تخلخل به‌دلیل ورود مواد آلی جدید و فعالیت موجودات خاکزی در بلندمدت همراه باشد (Ebel and Martin, 2021; Zema *et al*., 2021).

نتایج نشان داد که درصد شن از ۵۸ به ۶۴ درصد افزایش و درصد رس از ۱۵ به ۱۱ درصد کاهش یافته است. کاهش ۲۴/۲۸ درصدی رس و افزایش ۹/۱۰ درصدی شن در بازهٔ دو ساله، اگرچه از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما ممکن است نشانه‌ای از روند اولیه درشت‌دانه‌شدن خاک باشد. این تغییرات احتمالاً ناشی از فرسایش انتخابی ذرات ریز (رس و سیلت) توسط بارندگی‌های شدید پس از آتش‌سوزی است (Shakesby, 2019). با این حال، به‌دلیل غیرمعنی‌دار بودن آماری، نمی‌توان این تغییرات را به‌عنوان شواهد قطعی درشت‌دانه‌شدن خاک یا افزایش خطر فرسایش تلقی کرد. این روند باید به‌عنوان یک هشدار اولیه در نظر گرفته شود و لزوم پایش بلندمدت (۵ تا ۱۰ سال) را برای روشن‌شدن معنی‌داری آماری آن آشکار می‌سازد (Vieira *et al*., 2020; Zema *et al*., 2021). کاهش رس می‌تواند به‌دلیل شسته شدن ذرات ریز توسط بارندگی‌های شدید پس از آتش (که با حذف پوشش گیاهی تشدید می‌شود) باشد. در منطقهٔ مورد مطالعه با بارندگی سالانه بیش از ۱۴۰۰ میلی‌متر، این پدیده تشدید می‌شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که یکی از پیامدهای مهم آتش‌سوزی، افزایش فرسایش انتخابی ذرات ریز خاک است. با ادامه این روند، خاک منطقه مستعدتر به فرسایش آبی خواهد شد و بازیابی پوشش گیاهی با دشواری بیشتری مواجه خواهد شد. بنابراین، توصیه می‌شود در مطالعات آتی، نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی طولانی‌تر (۵ و ۱۰ سال پس از آتش) انجام شود تا روند تغییرات بافت خاک به‌طور دقیق‌تری آشکار گردد (Vieira *et al*., 2020; Zema *et al*., 2021).

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که آتش‌سوزی در جنگل شنرود بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های شیمیایی خاک (نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و کربن آلی) داشته است، در حالی‌که ویژگی‌های فیزیکی خاک (بافت و جرم ویژهٔ ظاهری) در بازهٔ زمانی دو ساله تغییر معنی‌داری نشان ندادند. این یافته با سوال اصلی پژوهش که بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک پس از آتش‌سوزی بود، پاسخ می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش معنی‌دار نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و کربن آلی در سال دوم نسبت به سال اول ادامه دارد. این یافته می‌تواند نشان‌دهندهٔ این باشد که روند احیای حاصلخیزی شیمیایی خاک همچنان در جریان است و احتمالاً برای رسیدن به حالت پایدار به زمانی بیش از دو سال نیاز دارد. با این حال، تعیین دقیق زمان نقاهت نیازمند پژوهش‌های بلندمدت‌تر با نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی بیشتر (۵، ۱۰ و

۱۵ سال) و وجود منطقهٔ شاهد است. بنابراین، این نتیجه‌گیری باید با احتیاط و با توجه به محدودیت‌های مطالعه تفسیر شود. جدول ۲ خلاصه‌ای از مقایسهٔ یافته‌های این پژوهش با مطالعات معتبر داخلی و بین‌المللی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسهٔ نتایج مطالعه حاضر با پژوهش‌های مشابه

Table 2. Comparison of the results of the present study with similar studies

ویژگی خاک	پژوهش حاضر	Ali et al. (2021)	Heydari et al. (2020)	Kong et al. (2018)
نیتروژن کل	افزایش 89% (معنی‌دار)	افزایش 70% (سال اول)	افزایش (دو سال پس از آتش)	افزایش یک سال پس از آتش
پتاسیم قابل جذب	افزایش 94% (معنی‌دار)	افزایش 48% (سال اول)	افزایش معنی‌دار	افزایش معنی‌دار
کربن آلی	افزایش 78% (معنی‌دار)	-	افزایش موقت	کاهش در بلندمدت
فسفر قابل جذب	افزایش غیرمعنی‌دار (34%)	افزایش 286% (سال اول)	افزایش کوتاه‌مدت	افزایش یک ساله
pH	بدون تغییر	-	افزایش موقت	بدون تغییر
جرم ویژه ظاهری	بدون تغییر (روند کاهشی)	-	بدون تغییر	-

نتایج این مطالعه با برخی پژوهش‌ها (Kong *et al.,* 2018; Ali *et al.,* 2021; Heydari *et al.,* 2020) همخوانی دارد، در حالی‌که با برخی دیگر (Shaoqing *et al.,* 2010; Pellegrini *et al.,* 2021) مغایرت نشان می‌دهد. تحلیل انتقادی این اختلافات نشان می‌دهد که عوامل متعددی می‌توانند در پاسخ متفاوت خاک به آتش‌سوزی نقش داشته باشند: شدت حریق (آتش‌سوزی‌های شدیدتر باعث تصعید بیشتر نیتروژن و کاهش کربن آلی می‌شوند)، نوع پوشش گیاهی (گونه‌های تثبیت‌کنندهٔ نیتروژن مانند حبوبات می‌توانند بازیابی نیتروژن را تسریع کنند)، شرایط اقلیمی (بارندگی‌های فراوان منطقه گیلان می‌تواند باعث شسته‌شدن عناصر و خنثی‌شدن اثر قلیایی خاکستر شود)، ویژگی‌های خاک (بافت، pH و مواد آلی اولیه) و زمان نمونه‌برداری (فصل و فاصله از آتش). بنابراین، تعمیم نتایج این مطالعه به سایر مناطق باید با در نظر گرفتن این عوامل انجام شود و پژوهش‌های آینده باید نقش هر یک از این عوامل را به‌صورت جداگانه بررسی کنند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که آتش‌سوزی جنگل در منطقهٔ شنرود (شهرستان سیاهکل، استان گیلان) در بازهٔ زمانی دو ساله، تأثیر معنی‌داری بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل نیتروژن کل (افزایش ۸۹ درصد)، پتاسیم قابل جذب (افزایش ۹۴ درصد) و کربن آلی (افزایش ۷۸ درصد) داشته است. این یافته‌ها حاکی از تغییرات محسوس در حاصلخیزی شیمیایی خاک در کوتاه‌مدت و میان‌مدت متعاقب آتش‌سوزی است. در مقابل، ویژگی‌های فیزیکی خاک (بافت، جرم ویژهٔ ظاهری و رطوبت اولیه) در دورهٔ مطالعه تغییر آماری معنی‌داری نشان ندادند. هرچند کاهش عددی درصد رس و افزایش عددی درصد شن مشاهده شد، اما به‌دلیل عدم معنی‌داری آماری، نمی‌توان در مورد تشدید قطعی فرسایش خاک در بلندمدت اظهارنظر کرد و این الگو صرفاً به‌عنوان یک زنگ خطر اولیه، نیاز به پایش بلندمدت را آشکار می‌سازد. با توجه به افزایش معنی‌دار عناصر غذایی در سال دوم نسبت به سال اول،

به‌نظر می‌رسد روند احیای حاصلخیزی شیمیایی خاک همچنان در جریان است، اما تعیین زمان دقیق بازگشت به شرایط پایدار (و اینکه آیا بیش از دو سال نیاز است یا خیر) مستلزم انجام پژوهش‌های پایش بلندمدت (حداقل ۵ تا ۱۰ سال) در منطقه است. همچنین، برای تفکیک تأثیر آتش‌سوزی از سایر عوامل محیطی و انسانی (مانند چرای دام)، طراحی مطالعات با منطقهٔ شاهد و داده‌های پیش‌آتش ضروری به‌نظر می‌رسد. براساس شواهد حاصل از این پژوهش، افزایش نیتروژن و پتاسیم در دو سال پس از آتش، می‌تواند به‌عنوان یک پنجرهٔ زمانی بالقوه برای استقرار پوشش گیاهی مقاوم در نظر گرفته شود، مشروط بر اینکه مطالعات تکمیلی، امکان‌پذیری آن را با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی خاک و مدیریت چرا تأیید کنند. همچنین، با توجه به مشاهدات میدانی مبنی بر حضور دام در منطقه و خروج بخشی از خاک‌دانه‌ها در بارندگی‌های شدید (که در این پژوهش مستقیماً گزارش نشد)، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به‌طور خاص به ارزیابی کمی فرسایش و اثر کوبش دام بر ویژگی‌های خاک بپردازند تا مبنای دقیق‌تری برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی توسط مدیران منابع طبیعی فراهم شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقالهٔ حاضر با حمایت معنوی دانشگاه گیلان انجام شد.

مشارکت نویسندگان

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائهٔ نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Akbarzadeh, R., Heidari, M., Najafi, K., 2017. The effect of fire on water repellency, amount, and factors of soil erosion in the forests of the southwestern coasts of the Caspian Sea. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering 11(38), 1-12. (In Persian)

Alcaniz, M., Outeiro, L., Francos, M., Úbeda, X., 2018. Effects of prescribed fires on soil properties: A review. Science of the Total Environment 613, 944-957.

Ali, J., Vaezi, A., Khosravi, H., 2021. Effects of fire on runoff and soluble nutrient concentrations in the Zaribar Lake watershed. Journal of Applied Ecology 10(1), 45-60. (In Persian)

Bodi, M.B., Martin, D.A., Balfour, V.N., Santín, C., Doerr, S.H., Pereira, P., Mataix-Solera, J., 2020. Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. Earth-Science Reviews, 207, 103211.

Boom, A., Pignol, C., Leclercq, L., 2019. Long-term effects of wildfire on soil organic matter in boreal forests. Geoderma 342, 75-86.

Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M.E., 2021. Wildfire effects on soil properties in Mediterranean ecosystems. Catena 196, 104922.

Ebel, B.A., Martin, D.A., 2021. Post-fire hydrology and erosion: A review of processes, data, and modeling. Journal of Hydrology 599, 126386.

Ebrahimi Mohammadi, M., Tahmasebi, A., Mohammadi, M., 2016. Effects of fire on the physical and chemical properties of soil in the forests of Kurdistan province. Journal of Forest Research and Development 2(3), 245-258. (In Persian)

FAO & ITPS. 2021. *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Rome: FAO.

Fernández-García, V., Miesel, J., Marcos, E., 2019. Soil properties after fire in Cantabrian forests. Science of the Total Environment 656, 1198-1208.

Heydari, M., Rostami, A., Pothier, D. (2020). Impact of wildfire on soil properties in Zagros oak forests. Journal of Forest Research 31(4), 1239-1248.

Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Le Quéré, C., 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. Reviews of Geophysics 60(3), e2020RG000726.

Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Fresco, L.O., 2021. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. Soil 7(1), 213-239.

Kong, J.J., Yang, J., Bai, E., 2018. Long-term effects of wildfire on soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest. Journal of Soils and Sediments 18(12), 3365-3374.

Lal, R., 2020. Soil organic matter content and crop yield. Journal of Soil and Water Conservation 75(2), 27A-32A.

Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M.C., 2020. The concept and future prospects of soil health. Nature Reviews Earth & Environment 1(10), 544-553.

Liu, Y., Zhang, J., Yang, W., 2020. Post-fire soil nitrogen dynamics in coniferous forests of China. *Forest Ecology and Management, 475*, 118412.

Matinizadeh, M., Goudarzi, M., 2013. Investigating the effects of fire on some physical and chemical properties of soil in the loess forests of Golestan province. Journal of Soil and Water Science 27(2), 321-330. (In Persian)

Moslehi, M., Rahmani, A., Javanmard, S., 2013. The effect of fire on the chemical properties of soil in oak forests (Case study: Lorestan province). Iranian Journal of Forest, 5(3), 287-298. (In Persian)

Nave, L.E., DeLyser, K., Butler, P.R., 2022. Fire effects on soil pH: A global meta-analysis. Global Change Biology 28(3), 1024-1041.

Pausas, J.G., Keeley, J.E. 2019. Wildfires as an ecosystem service. Frontiers in Ecology and the Environment 17(5), 289-295.

Pellegrini, A.F., Hobbie, S.E., Reich, P.B., Jumpponen, A., Montgomery, R.A., 2021. Repeated fire shifts carbon and nitrogen cycling by changing plant inputs and soil decomposition across ecosystems. Ecological Monographs 91(3), e01456.

Pereira, P., Úbeda, X., Francos, M., 2019. Short-term changes in soil nutrients after wildfire in Mediterranean forests. Journal of Soils and Sediments, 19(2), 877-891.

Sedighi Pashaki, M., Ghods-Khavar Daryaei, M., Heidari, M., Adel, M.N., Sadegh Kohestani, J., 2014. Effect of fire on some physical and chemical properties of soil in the forests of Gilan province (Case study: Saravan region). Watershed Management Research 27(104), 96-106. (In Persian)

Shakesby, R.A., 2019. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. Earth-Science Reviews 192, 71-91.

Sharifi, Z., Azadi, N., 2020. Effect of fire severity on soil aggregate stability in the northern Zagros oak forests. Soil and Water Conservation Research 27(4), 189-204. (In Persian)

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.

Vieira, D.C., Serpa, D., Nunes, J.P., Prats, S.A., Neves, R., Keizer, J.J., 2020. Predicting the effectiveness of different mulching techniques in reducing post-fire runoff and erosion at plot scale with the RUSLE model. Journal of Environmental Management 255, 109857.

Wang, G., Wang, Y., Li, J., 2021. Fire effects on soil nitrogen pools and dynamics: A global synthesis. Soil Biology & Biochemistry 159, 108287.

Zavala, L.M., de Celis, R., Jordán, A., 2019. Immediate effects of wildfire on soil properties in SW Spain. Journal of Environmental Management 231, 1120-1129.

Zema, D.A., Lucas-Borja, M.E., Plaza-Alvarez, P.A., 2021. Post-fire management effects on soil properties and runoff in a Mediterranean forest. Catena, 196 104903.