

Assessment of Selected Physicochemical Properties of Post-Fire Forest Soils in Various Sites of Al-Qardaha District, Lattakia

Hasan Ibrahim Saeed* 
Dr. Sawsan Abdullh Haifa**
Dr. Aziz Mohamad Asaad***

(Received 18 / 2 / 2026. Accepted 19 / 4 / 2026)

□ ABSTRACT □

This study aimed to assess certain physical and chemical changes in soils resulting from the 2020 forest fires in the Qalaat Al-Mahalba and Areeza regions of Lattakia Governorate, Syria. Soil samples were collected from two depths (0-20 cm and 20-40 cm) in both burned sites and adjacent unburned (control) sites. The results in 2023 showed a statistically significant effect of fire on most of the studied properties. The fires led to a significant increase in sand content (50.00% in burned soil versus 38.50% in unburned soil). A sharp decrease in organic matter content was observed (3.03% versus 5.83%), and the concentration of available phosphorus also decreased (7.29 mg/kg versus 12.75 mg/kg). In contrast, the concentrations of nitrogen (15.88 mg/kg versus 13.50 mg/kg) and potassium (130.25 mg/kg versus 78.00 mg/kg) increased significantly. The mean electrical conductivity value in burned soil reached 1.3650 dS/m, compared to 0.425 dS/m in unburned soil. However, no statistically significant change in soil pH was observed between the burned and unburned areas. These findings indicate that forest fires induce profound alterations in the physical and chemical properties of soil, highlighting the critical importance of developing effective post-fire land management and soil restoration strategies.

Keywords: Soil properties, forest fires, organic matter, post-fire management, NPK

Copyright



:Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Master student, Faculty of Agricultural Engineering, Latakia University(formerly Tishreen) Latakia, Syria.
hasan.saeed@latakia-univedu.sy

**Professor, Faculty of Agricultural Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia Syria.

*** Assistant Professor, Faculty of Agricultural Engineering, Latakia University(formerly Tishreen), Latakia, Syria.

تقييم بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لترب غابات محروقة في مناطق مختلفة من منطقة القرداحة-اللاذقية

حسن ابراهيم سعيد* 

د. سوسن عبد الله هيفا**

د. عزيز محمد أسعد***

(تاريخ الإيداع 18 / 2 / 2026. قبل للنشر في 19 / 4 / 2026)

□ ملخص □

تم دراسة بعض التغيرات الفيزيائية والكيميائية في التربة نتيجة حرائق الغابات عام 2020م في منطقتي قلعة المهالبة وأريزة بمحافظة اللاذقية. جُمعت عينات التربة من عمقين (0-20 سم و20-40 سم) من مواقع محروقة ومواقع مجاورة غير محروقة.

أظهرت نتائج الدراسة عام 2023م وجود تأثير ذي دلالة إحصائية للحرائق على معظم الخصائص المدروسة. أدت الحرائق إلى تغير في قوام التربة وخصوصاً في نسبة الرمل (50.00% في التربة المحروقة مقابل 38.50% في التربة غير المحروقة) حيث كانت الزيادة معنوية. لوحظ انخفاض محتوى المادة العضوية انخفاضاً حاداً (3.03% مقابل 5.83%)، كما انخفض تركيز الفوسفور المتاح (7.29 مغ/كغ مقابل 12.75 مغ/كغ) ppm. في المقابل، ارتفع تركيز الأزوت (15.88 مغ/كغ مقابل 13.50 مغ/كغ) ppm والبوتاسيوم (130.25 مغ/كغ مقابل 78.00 مغ/كغ) ppm بشكل معنوي، وبلغ متوسط قيمة الناقلية الكهربائية في التربة المحروقة 1.3650 ميليومس/سم، وفي التربة غير المحروقة 0.425 ميليومس/سم، بينما لم يلاحظ تغير في قيمة pH التربة اختلافاً ذا دلالة إحصائية في المناطق المحروقة لدى مقارنتها مع المناطق غير المحروقة. أن حرائق الغابات تُحدث تغيرات عميقة في خواص التربة الفيزيائية والكيميائية، مما يبرز أهمية تطوير استراتيجيات فعالة لإدارة الأراضي بعد الحريق.

الكلمات المفتاحية: خصائص التربة، حرائق الغابات، المادة العضوية، إدارة ما بعد الحريق، NPK

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب



الترخيص 04 CC BY-NC-SA

المقدمة:

* طالب ماجستير، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سوريا .

hasan.saeed@latakia-univedu.sy

** أستاذ، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سوريا.

*** مدرس، كلية الهندسة الزراعية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية. سوريا

تعد التربة أساس الحياة على الأرض، حيث تلعب دوراً محورياً في دعم النظم البيئية والزراعية. تمثل التربة أكبر مخزون للكربون العضوي الأرضي، وتعمل كخزانات طبيعية للمياه [1]، مما يجعلها أحد أكثر الموارد غير المتجددة قيمة على كوكب الأرض [2].

تشكل التربة نظاماً ديناميكياً حيوياً، لكنها نظام هش. يتطلب تكوينها فترات زمنية طويلة تتراوح بين القرون وملايين السنين، بينما يمكن تدهورها بسرعة. من بين التهديدات، يبرز تلوث التربة بالعناصر الثقيلة، الذي يؤثر سلباً على النشاط الأنزيمي، ويظهر سمية تجاه الكائنات الحية الدقيقة [3]. بالإضافة إلى ذلك، يعد انجراف التربة عاملاً آخر للتدهور، مسبباً فقداناً للعناصر الغذائية وللحبيبات الناعمة التي تحسن بنية التربة [4].

ومع ذلك، تُعد حرائق الغابات من أخطر هذه العوامل، خاصة في منطقة حوض البحر المتوسط حيث تشهد زيادة متسارعة في وتيرة وشدة الحرائق [5]. تؤثر الحرائق على النظم البيئية للغابات، وديناميكيتها وإنتاجيتها [6]، حيث يلعب الحريق دوراً كبيراً في انتشار وتوزع وتجدد المجتمعات النباتية [7].

تؤثر الحرائق على التربة بطرق مباشرة وغير مباشرة. فمن ناحية، تؤثر بشكل مباشر على بناء وتركيب التربة، من خلال تأكلها وفقدان بعض العناصر المغذية [8]. ومن ناحية أخرى، تؤثر بشكل غير مباشر عن طريق تغيير درجة حرارة التربة ودرجة حموضتها [9]. تسبب هذه الحرائق تغييرات مهمة في حركة وتبادل العناصر الغذائية ضمن النظام البيئي [10].

تشير الدراسات الحديثة إلى أن الحرائق تؤثر سلباً وبشكل كبير على خصوبة التربة. حيث تؤدي إلى فقدان عناصر غذائية أساسية مثل الأزوت والفوسفور [11]، مما يقلل من قدرة التربة على دعم النمو النباتي على المدى الطويل. كما تساهم في تآكل الطبقة السطحية للتربة، مؤدية إلى فقدان المواد العضوية وتدهور بنيتها [12]. علاوة على ذلك، لوحظ أن للنشاط الأنزيمي للتربة يتأثر سلباً [13]، مما يقلل من عدد الكائنات الحية الدقيقة وينشط نشاطها [14]. كما تساهم التغيرات الكيميائية بعد الحريق في تقليل خصوبة التربة بشكل عام [15].

لذلك، ونظراً لأهمية المنطقة الساحلية السورية وتعرض غاباتها للحرائق بشكل متكرر، تأتي هذه الدراسة لتقييم مقدرة التربة على استعادة بعض خصائصها الفيزيائية والكيميائية بعد تعرضها للحرائق في بعض مناطق محافظة اللاذقية.

أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر دراسة تأثير الحرائق على خصائص التربة أمراً بالغ الأهمية، خاصة في المناطق التي شهدت حرائق كبيرة مثل قرية قلعة المهالبة وقرية أريزة في عام 2020 في محافظة اللاذقية، وبناء عليه يساهم البحث في تحليل التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تطرأ على التربة نتيجة الحرائق، مما يساعد في فهم تأثير هذه التغيرات على خصوبة التربة. ومن خلال مقارنة خصائص التربة في المواقع المحروقة مع تلك في المواقع المجاورة التي لم تتعرض للحرائق، يمكن تحديد الفروق الأساسية وتأثير الحرائق على النظام البيئي، وهذا يعزز الفهم حول كيفية تغير خصائص التربة ويتيح وضع استراتيجيات مناسبة للتكيف مع هذه التغيرات.

بالإضافة إلى ذلك، تسعى الدراسة لتقييم قدرة التربة في المواقع المتأثرة على المعالجة الذاتية لأثار الحرائق، مما يعكس قدرة النظام البيئي على التعافي واستعادة توازنه، تساهم هذه المعرفة في تطوير استراتيجيات فعالة لإدارة التربة والحفاظ على البيئة، مما يساعد في تعزيز الاستدامة الزراعية والحد من تأثير الحرائق على الإنتاجية الزراعية والنظام البيئي بشكل عام، وبناء على ما سبق فقد هدف البحث إلى:

- دراسة بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية (التركيب الميكانيكي، درجة الحموضة pH، الناقلية الكهربائية، المادة العضوية، وتركيز كل من الأزوت والفوسفور والبوتاسيوم) لعينات التربة التي تعرضت للحرائق خلال عام 2020 في منطقتي الدراسة، وهما قرية قلعة المهالبة وقرية أريزة.
- مقارنة مقدرة التربة في المواقع المحروقة على المعالجة الذاتية لآثار الحرائق مع التربة في المواقع غير المحروقة المجاورة لها

طرائق البحث ومواده:

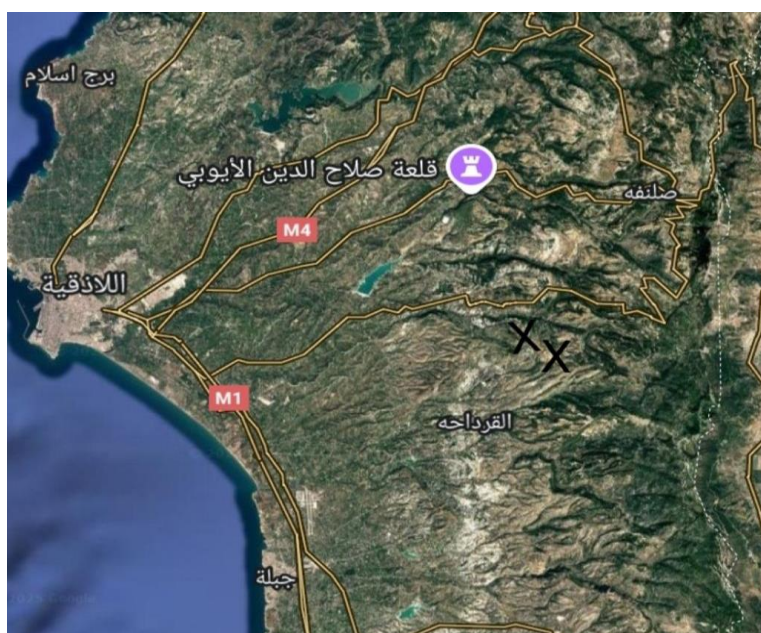
منطقة الدراسة

نُفذ البحث في منطقة الفاخورة التابعة لمحافظة اللاذقية، حيث تم اختيار موقعين للدراسة: الأول في قرية قلعة المهالبة، والثاني في قرية أريزة، وهي مواقع تعرضت للحريق عام 2020. تقع هذه المنطقة على ارتفاع يتراوح بين 540 و784 متراً فوق سطح البحر، وتدرج ضمن الطابق النباتي المتوسطي الحقيقي. تتميز المنطقة بمناخ البحر الأبيض المتوسط، حيث الشتاء معتدل رطب والصيف حار جاف. يسود الغطاء النباتي أشجار الصنوبر البروتي (*Pinus brutia*) والسنديان (*Quercus spp.*) والبطم (*Pistacia spp.*) وأنواع نباتية أخرى.

تتكون الصخور الأم في منطقة الدراسة أساساً من صخور كلسية، فيما تتراوح درجة الميل من 40% إلى 50%، وهي درجة انحدار متوسطة إلى مرتفعة قليلاً تسهم في حدوث انجراف أرضي، مما قد يفسر أي تغيرات تطراً على قوام التربة وخصائصها بين المواقع المختلفة.

أما شدة الحريق، فقد تباينت بين الموقعين. ففي موقع قلعة المهالبة، لوحظت حروق بسيطة على جهة واحدة من جذوع الأشجار فقط، مما يشير إلى حريق أرضي خفيف، بينما في موقع أريزة، حيث تنمو شجيرات صغيرة من البطم والسنديان الأكثر جفافاً وقابلية للاشتعال، يُتوقع أن تكون شدة الحريق أكبر مقارنة بقلعة المهالبة.

يوضح شكل (1) خريطة منطقة الدراسة، وتوزيع مواقع العينات المختارة في قلعة المهالبة وأريزة ضمن منطقة الفاخورة.



الشكل (1) خريطة لموقع الدراسة موضحة مواقع جمع العينات المدروسة

عينات التربة:

أخذت العينات من موقعين حراجيين هما قلعة المهالبة، وقرية أريزة على عمقين 0-20 سم ومن 20-40 سم، بلغ إجمالي عدد العينات 8 عينات رئيسية، وقد تم أخذ ثلاث مكررات (مكررات حقلية) لكل عينة، ليصبح العدد الإجمالي للعينات المختبرية 24 عينة (3 × 8)

جُمعت العينات من المواقع بواسطة أكياس خاصة بجمع العينات، ثم نُقلت إلى مخابر كلية الهندسة الزراعية في جامعة اللاذقية بتاريخ 2023/6/20م، تم تجهيزها عن طريق إزالة الجذور والمخلفات النباتية، ثم تجفيفها هوائياً وتخليها على منخل بقطر 2مم للحصول على تربة ناعمة، وإجراء بعض التحاليل الفيزيائية والكيميائية على هذه العينات.

التحاليل الفيزيائية والكيميائية:

• درجة الحموضة (pH) حُضِرَ مستخلص مائي بنسبة 1:2.5 (تربة:ماء)، ثم قيست درجة الحموضة بجهاز pH meter [16].

• قوام التربة: حُدِّدَ قوام التربة بطريقة الهيدروميتر، وذلك بعد إجراء التحليل الميكانيكي لتقدير النسب المئوية للرمل والصلت والطين [17,18]

• الناقلية الكهربائية (EC) قيست الناقلية الكهربائية بجهاز EC meter في مستخلص مائي بنسبة 1:2.5 (تربة:ماء). [19]

• المادة العضوية (OM%) قُدرت المادة العضوية بطريقة الأكسدة الرطبة (Walkley-Black)، والتي تعتمد على إرجاع ثاني كرومات البوتاسيوم بواسطة مركبات الكربون العضوي، ثم المعايرة بمحلول سلفات الحديدوز والأمونيوم (0.5 مولاري) [20,21]

• العناصر الغذائية (NPK)

○ قيس الأزوت بطريقة كيلداهل الرطبة. [22]

○ قيس الفوسفور بطريقة أولسن. [23]

○ قُدر البوتاسيوم بجهاز اللهب الضوئي. [24]

التحليل الاحصائي:

تم تحليل البيانات إحصائياً باستخدام برنامج **SPSS** طبق تحليل التباين ثنائي الاتجاه (**Two-way ANOVA**) لتقييم تأثير الموقع (محروق/غير محروق)، والعمق (0-20، 20-40 سم)، والتفاعل بينهما على جميع خصائص التربة المدروسة. تم التحقق من طبيعية البيانات وتجانس التباينات باستخدام اختباري **Levene**. أُجريت المقارنات البعدية باستخدام اختبار **Tukey HSD** عند مستوى دلالة 0.05. تم التعبير عن النتائج كمتوسط حسابي ± انحراف معياري باستخدام إجراءات **Descriptive Statistics** في **SPSS**.

النتائج والمناقشة:

أولاً- تأثير الحرائق على التركيب الميكانيكي للتربة للعمقين المدروسين:

يُعد التركيب الميكانيكي من الخصائص الفيزيائية الأساسية التي تتحكم في السلوك الهيدرولوجي والإنتاجي للتربة، [25]. تم دراسة تأثير الحرائق على التركيب الميكانيكي للتربة في منطقتي الدراسة حيث تم قياس النسب المئوية لمكونات التربة من الرمل والصلت والطين.

تم تقسيم العينات إلى مجموعتين، تشمل التربة المحروقة والتربة غير المحروقة، مما يتيح مقارنة دقيقة بين الخصائص الميكانيكية للتربة في كلتا الحالتين.

يوضح الجدول (1) قيم التركيب الميكانيكي لكل عينة والإحصائيات الوصفية للتركيب الميكانيكي للتربة، حيث يتم عرض النسب المئوية لمكونات التربة (رمل، سلت، وطين) وفقاً لموقع التربة (محروق وغير محروق). يتضمن الجدول متوسط النسب، خطأ القياس، لكل مكون من مكونات التربة وهذا يتوافق مع دراسة سابقة [26] التي أظهرت أن التغيرات في الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة بين العينات المحروقة وغير المحروقة كانت ذات دلالة إحصائية، مع زيادة ملحوظة في نسبة الرمل وانخفاض في نسبة الطين والسلت في التربة المحروقة.

أظهرت النتائج أن متوسط نسبة الرمل في التربة المحروقة كان 50.00%، بينما كان 38.50% في التربة غير المحروقة. بالنسبة للسلت، كانت النسبة في التربة المحروقة 18.25% مقابل 25.50% في التربة غير المحروقة. أما فيما يتعلق بالطين، فقد بلغت النسبة في التربة المحروقة 31.75% مقارنةً بـ 36.00% في التربة غير المحروقة. تشير هذه النتائج إلى أن التربة المحروقة تحتوي على نسبة أعلى من الرمل وأقل من السلت والطين مقارنةً بالتربة غير المحروقة، مما يدل على تأثير الحرائق على التركيب الميكانيكي للتربة.

أن دراسة تأثير طبيعة الموقع (محروق أو غير محروق) على قوام التربة يعكس تصميم الدراسة وأهميتها في تحليل بيانات التربة حيث اشارت النتائج إلى وجود فروق ذات دلالة إحصائية، مما يدل على أن النتائج ليست نتيجة للصدفة، بالتالي. طبيعة الموقع لها تأثير معنوي على خصائص التربة. بناءً على هذه النتائج، يمكن الاستنتاج بأن الحريق يؤثر بشكل ملحوظ على التركيب الميكانيكي للتربة.

أن الفروقات المتوسطة بين الرمل في التربة المحروقة والتربة غير المحروقة تدل على تأثير معنوي للحريق على قوام الرمل، أما بالنسبة للسلت والطين، فلم تظهر الفروقات دلالة إحصائية، وبالتالي، يمكن الاستنتاج بأن الحريق يؤثر بشكل ملحوظ على قوام الرمل، بينما لا توجد فروقات معنوية في قوام السلت والطين بين الحالتين يمكن تفسير هذه التغيرات من خلال درجات الحرارة المرتفعة التي تؤدي إلى تحطم الجسيمات الدقيقة وتلاحمها لتشكيل حبيبات أكبر حجماً [27]، واحتراق المادة العضوية التي تربط حبيبات التربة الدقيقة [8]، والتغيرات المعدنية حيث تؤدي الحرارة إلى تحولات في البنية البلورية لمعادن الطين، مما يغير من توزيع الحبيبات [28]، والرياح والمياه التي تعمل على إزالة الجسيمات الدقيقة بعد فقدان الغطاء النباتي [5].

الجدول (1). يوضح تأثير الحرائق على النسب المئوية لقيم

التركيب الميكانيكي للتربة في العمقين المدروسين

الموقع	العمق اسم	موقع التربة (محروق)			موقع التربة (غير محروق)		
		رمل%	سلت%	طين%	رمل%	سلت%	طين%
قلعة المهالبة	0-20	55	17	28	38	33	29
قلعة المهالبة	02-40	54	15	31	34	33	33
أريزة	0-20	47	24	29	43	20	37
أريزة	20-40	44	17	39	39	16	45
المتوسط الحسابي		50	18.25	31.75	38	25.50	36
الانحراف المعياري		5.35	4.35	4.99	3.70	8.70	6.78

ثانياً- تأثير الحرائق على بعض خصائص التربة الكيميائية للعمقين المدروسين:

تمثلت الحرائق كأحد العوامل المؤثرة بشكل كبير على خصائص التربة الكيميائية، حيث أدت إلى تغييرات ملحوظة في قيم العناصر الغذائية. تم تحليل تأثير موقع التربة (محروق أو غير محروق) على مجموعة من الخصائص الكيميائية، بما في ذلك قيم pH التربة، الناقلية الكهربائية، محتوى المادة العضوية، قيم العناصر الغذائية مثل الأزوت والفسفور والبوتاسيوم، من خلال استخدام اختبارات إحصائية مناسبة، تم تسليط الضوء على الفروقات بين المجموعتين وتأثيرات الحريق على هذه الخصائص.

1- تأثير الحرائق على قيم pH التربة في العمقين المدروسين:

تعتبر قيم pH من العوامل الأساسية التي تؤثر على خصائص التربة وجودتها، حيث تعكس توازن الأيونات في التربة وتؤثر على توافر العناصر الغذائية للنباتات، يوضح الجدول (2) كل من قيم pH والإحصائيات الوصفية لقيم pH حسب حالة الموقع (محروق أو غير محروق).

تشير نتائج الجدول رقم (2) إلى أن متوسط قيمة pH في التربة المحروقة هو 7.85، مما يدل على ارتفاع بسيط مقارنة بالتربة غير المحروقة التي بلغ متوسط pH فيها 7.70، بالتالي لا توجد فروق ذات دلالة إحصائية في قيم pH بين التربة المحروقة وغير المحروقة، يمكن الاستنتاج بأن حالة الموقع (محروق أو غير محروق) لا تؤثر بشكل ملحوظ على قيم pH في هذه الدراسة.

يمكن تفسير هذا الثبات النسبي لقيم pH من خلال السعة التنظيمية للتربة، تمتلك التربة قدرة على مقاومة التغير في درجة الحموضة بسبب محتواها من المعادن الطينية والكربونات [11]. بالإضافة إلى طبيعة المواد المحترقة قد تعتمد درجة التغير على نوع وكمية المواد النباتية المحترقة [12].

حيث يعود التغير الطفيف في pH التربة إلى تراكم الرماد الغني بالكربونات والأكاسيد القاعدية على سطح التربة وذوبان هذه المركبات عند هطول الأمطار وتسربها إلى داخل قطاع التربة وتفاعل هذه المركبات مع مكونات التربة لتشكيل وسط كيميائي جديد [8].

ولوحظ وجود تباين مشابه في قيم pH التربة بين المجموعتين يشير هذا إلى أن العوامل الطبيعية (مثل التكوين الجيولوجي) قد تكون أكثر تأثيراً من الحريق في تحديد درجة حموضة التربة في هذه المنطقة، أظهرت النتائج فروقاً بسيطة في قيم pH التربة بين العمقين المدروسين (0-20 سم و 20-40 سم)، يشير هذا إلى أن تأثير الرماد قد يكون محدوداً في الطبقة السطحية، وهذا يتوافق مع دراسة [29] التي أكدت أن الرماد الناتج عن الحرائق يحتوي على مركبات مثل كربونات الكالسيوم والبوتاسيوم، مما يؤدي إلى ارتفاع مؤقت في درجة حموضة التربة.

الجدول (2). يوضح قيم تأثير الحرائق على قيم pH التربة في المواقع المدروسة

الموقع	محروق/غير محروق	العمق اسم	Ph	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0-20	7,8	7.85	0.15	0.08
	الجزء المحروق	20-40	7,69			
	الجزء المحروق	0-20	8,04			
	الجزء المحروق	20-40	7,88			

0.05	0.09	7.70	7.80	0-20	الجزء غير المحروق	قلعة المهالبة
			7,6	20-40	الجزء غير المحروق	قلعة المهالبة
			7,77	0-20	الجزء غير المحروق	قرية اريزة
			7,65	20-40	الجزء غير المحروق	قرية اريزة

2- تأثير الحرائق على الناقلية الكهربائية لميليموس/سم في العمقين المدروسين:

تعتبر الناقلية الكهربائية مؤشراً على مدى قدرة التربة على توصيل الكهرباء، وهي تتأثر بعدة عوامل، منها نسبة الرطوبة، الملوحة، والتركيب الكيميائي. عندما تحدث حرائق، يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تغييرات في التركيب الكيميائي للتربة، مما يؤثر على مستويات الملوحة ويغير من قيم الناقلية الكهربائية.

يوضح الجدول (3) قيم الناقلية الكهربائية لعينات التربة المدروسة، وفقاً لحالة الموقع (محروق أو غير محروق). تشير نتائج الجدول (3) إلى وجود فرق واضح في قيم الناقلية الكهربائية بين التربة المحروقة وغير المحروقة. حيث بلغ متوسط الناقلية الكهربائية في التربة المحروقة 0,93 ميليموس/سم، في حين كان متوسط الناقلية الكهربائية في التربة غير المحروقة 0,86 ميليموس/سم هذا الاختلاف في المتوسطات يشير إلى أن الحرائق تؤثر بشكل ملحوظ على الناقلية الكهربائية للتربة، من خلال تغيير التركيب الكيميائي الذي يؤدي إلى تحرير أيونات معدنية من المواد المحترقة، مما يزيد من الناقلية الكهربائية [30].

لذلك، يمكن الاستنتاج بأن قيم الناقلية الكهربائية أعلى في التربة المحروقة مقارنة بالتربة غير المحروقة، وأن الحرائق تؤثر بشكل كبير على الناقلية الكهربائية للتربة، مما يعكس تأثيراتها البيئية.

الجدول (3) يوضح تأثير الحرائق على قيم الناقلية الكهربائية

ميليموس/سم في العمقين المدروسين

الموقع	محروق/غير محروق	العمق اسم	الناقلية الكهربائية ميليموس/سم	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0-20	1,5	0.93	0.557	0.28
	الجزء المحروق	20-40	0,41			
	الجزء المحروق	0-20	1,3			
	الجزء المحروق	20-40	0,51			
قلعة المهالبة	الجزء غير المحروق	0-20	1,5	0.86	0.507	0.25
	الجزء غير المحروق	20-40	0,36			
	الجزء غير المحروق	0-20	1,16			
	الجزء غير المحروق	20-40	0,42			

3- تأثير الحرائق على محتوى المادة العضوية في المناطق المدروسة:

تعتبر الحرائق من الظواهر الطبيعية التي تؤثر بشكل كبير على النظم البيئية، وخاصة على محتوى التربة من المادة العضوية في التربة، تؤدي المادة العضوية دوراً حيوياً في تحسين خصائص التربة، مثل قدرتها على الاحتفاظ بالماء وتغذية النباتات. وعندما تتعرض التربة للحرائق، يمكن أن تتغير تركيبها الكيميائية والفيزيائية، مما يؤدي إلى فقدان جزء كبير من المادة العضوية [31]، هذا الفقدان يؤثر سلباً على خصوبة التربة وصحة النظام البيئي بشكل عام. تشير النتائج إلى وجود تفاعل معقد بين الحرائق والمحتوى العضوي للتربة، حيث يبدو التأثير مرتبطاً بعمق الطبقة وطبيعة التفاعلات الكيميائية-الحرارية، منها الاحتراق المباشر: يؤدي إلى فقدان فوري للمواد العضوية الخفيفة مثل بقايا النباتات غير المتحللة [32]، وتعمل الحرارة على تحطيم الروابط الكربونية للمواد العضوية المعقدة (مادة الدبال) وتحويلها إلى أشكال غازية ورماد، مما يقلل من المخزون العضوي الكلي.

لوحظ انخفاض في محتوى التربة من المادة العضوية في الطبقة السطحية (0-20 سم) نتيجة تعرضها لدرجات حرارة أعلى، مما يسبب فقداناً شديداً للكربون العضوي القابل للاحتراق وتغيراً في البنية الفيزيائية للتربة وزيادة في كثافتها [33]، أما الطبقة تحت السطحية (20-40 سم) قد يحدث فيها ترسيب للكربون الأسود الناتج عن الاحتراق غير الكامل وتغيرات في حركية الذوبان للمواد العضوية بفعل الحرارة لذلك يمكن الاستنتاج بأن الحرائق، تؤدي إلى انخفاض في محتوى المادة العضوية في التربة المحروقة، مقارنة بالتربة غير المحروقة، مما يعكس التأثيرات البيئية الناتجة عن الحرائق [34] ، [35].

الجدول (4) يوضح قيم محتوى التربة من المادة العضوية % قبل وبعد تعرضها للحرائق

الموقع	محروق/غير محروق	العمق اسم	المادة العضوية %	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0 - 20	5,5	4,06	1,25	0,63
	الجزء المحروق	20-40	2			
	الجزء المحروق	0 - 20	5,9			
	الجزء المحروق	20-40	2,85			
قلعة المهالبة	الجزء غير المحروق	0 - 20	5,8	4,75	1,84	0,92
	الجزء غير المحروق	20-40	3,5			
	الجزء غير المحروق	0 - 20	6,1			
	الجزء غير المحروق	20-40	3,6			

4- تأثير الحرائق على تركيز الآزوت ppm في المواقع المدروسة:

تعد الحرائق من العوامل البيئية الهامة التي تؤثر على تركيبة التربة الكيميائية وتوافر العناصر الغذائية، ومن بينها تركيز الآزوت. يعتبر الآزوت عنصراً أساسياً لنمو النباتات وتطويرها، حيث يلعب دوراً محورياً في تكوين البروتينات والإنزيمات. عندما تتعرض التربة للحرائق، يمكن أن تتغير مستويات الآزوت نتيجة لعمليات الاحتراق والتغيرات الكيميائية. قد تؤدي هذه العمليات إلى فقدان جزء من الآزوت في شكل غازات أو تحلل، مما يؤثر سلباً على خصوبة

التربة. لذا، فإن دراسة تأثير الحرائق على تركيز الأزوت تعتبر ضرورية لفهم كيفية تأثير هذه الظواهر الطبيعية على النظم البيئية وإيجاد استراتيجيات مناسبة لإدارتها.

يوضح الجدول (5) قيم محتوى عينات التربة من تركيز الأزوت حسب الموقع، حيث يتم مقارنة القيم بين التربة المحروقة وغير المحروقة

أظهرت النتائج أن متوسط تركيز الأزوت في التربة المحروقة بلغ ppm15.63، مقابل ppm13.75 في التربة غير المحروقة. هذا يشير إلى أن الحرائق قد تساهم في زيادة تركيز الأزوت في التربة.

عند اندلاع الحريق، تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تحلل المادة العضوية في التربة، مما يحفز تحوّل الأزوت العضوي إلى أشكال معدنية متاحة مثل النترات والأمونيوم، وهو ما يزيد من تركيز الأزوت القابل للاستخدام مؤقتاً [36]. بالإضافة إلى ذلك، تقلل الحرائق بشكل كبير من أعداد الكائنات الحية الدقيقة مثل البكتيريا والفطريات التي تلعب دوراً رئيسياً في دورة الأزوت [37]. ومع ذلك، فإن هذه المجتمعات الميكروبية تبدأ في التعافي بعد فترة وجيزة من الحريق، مما يؤدي إلى إعادة تثبيت الأزوت واستعادة التوازن البيئي خلال أشهر إلى أقل من سنة [38].

يرتبط النباين الأكبر في تركيز الأزوت في التربة غير المحروقة بالخصائص البيئية الطبيعية مثل تفاوت توزيع المادة العضوية والرطوبة ونشاط الكائنات الدقيقة، وهو ما يفسر القيم المتغيرة للانحراف المعياري [39]، أما في التربة المحروقة، فإن الحرائق تعمل على تقليل أعداد الكائنات الحية الدقيقة في التربة مؤقتاً، مما يقلل من النباين في تركيز الأزوت.

من الجدير بالذكر أن التأثير غير الدال إحصائياً للحرائق على تركيز الأزوت في هذه الدراسة، قد يعود إلى عدة عوامل منها شدة الحريق، نوع التربة، ومدة التعافي بعد الحريق. وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن تأثير الحرائق على دورة الأزوت قد يكون متغيراً حسب هذه العوامل، مع تأثيرات قد تمتد لفترات قصيرة أو طويلة [40].

أن الحرائق تغير مؤقتاً من توافر الأزوت في التربة عن طريق تحلل المادة العضوية وتأثيرها على المجتمعات الميكروبية، إلا أن تأثيرها قد يكون محدوداً زمنياً ويعتمد على عدة عوامل بيئية. لذا، لا يمكن اعتبار تأثير الحرائق على تركيز الأزوت في التربة ذا أهمية كبيرة في هذه الدراسة بناءً على النتائج الإحصائية الحالية.

الجدول (5) يوضح قيم تركيز الأزوت في عينات التربة حسب الموقع المدروس

الموقع	محروق/غير محروق	العمق سم	تركيز الأزوت ppm	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0 - 20	16,5	15.63	1.11	0.56
	الجزء المحروق	20-40	16			
	الجزء المحروق	0 - 20	16			
	الجزء المحروق	20-40	14			
قلعة المهالبة	الجزء غير المحروق	0 - 20	14,9	13.75	2.63	1.31
	الجزء غير المحروق	20-40	14			
	الجزء غير المحروق	0 - 20	16,1			
	الجزء غير المحروق	20-40	10			

5- تأثير الحرائق على تركيز الفوسفور ppm في المواقع المدروسة:

يؤدي الفوسفور دورًا حيويًا في نمو النباتات وتطورها، حيث يساهم في عمليات التمثيل الضوئي وتكوين البروتينات. عند حدوث حرائق، يمكن أن تتغير تركيزات الفوسفور نتيجة لعمليات الاحتراق والتغيرات الكيميائية التي تحدث في التربة. لذا، فإن دراسة تأثير الحرائق على تركيز الفوسفور تعتبر ضرورية لفهم كيفية تأثير هذه الظواهر على النظم البيئية وخصوبة التربة، يوضح الجدول (6) قيم تراكيز الفوسفور في عينات التربة المدروسة حسب الموقع، حيث يتم مقارنة القيم بين التربة المحروقة وغير المحروقة.

أظهرت النتائج أن متوسط تركيز الفوسفور في التربة المحروقة بلغ 9.84 ppm بينما كان متوسط التركيز في التربة غير المحروقة 10.20 ppm، تشير هذه النتائج إلى أن التربة غير المحروقة تحتوي على تركيز أعلى من الفوسفور مقارنة بالتربة المحروقة، مما يعكس التأثير السلبي للحرائق على مستويات الفوسفور في التربة، وهو ما قد يؤثر سلبًا على نمو النباتات وخصوبة التربة في المناطق المتأثرة.

تشير الدراسات الحديثة إلى أن الحرائق تؤثر بشكل كبير على حركية الفوسفور في التربة، حيث يمكن أن تؤدي إلى تقليل تركيز الفوسفور في التربة بنسبة تصل إلى 42% بعد عام من الحريق، خاصة في الحرائق ذات الشدة العالية [41].

من جهة أخرى، أظهرت دراسة حديثة أن الرماد الناتج عن الحرائق يحتوي على تركيزات عالية من الفوسفور، تصل إلى 10,000 جزء في المليون، مما يجعله مصدرًا غنيًا بالعناصر الغذائية للنباتات. ومع ذلك، فإن توفر الفوسفور في الرماد يعتمد على قابليته للذوبان [42].

الجدول (6) يوضح قيم تركيز الفوسفور ppm في عينات التربة المدروسة حسب الموقع

الموقع	محروق\غير محروق	العمق\سم	تركيز الفوسفور ppm	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0-20	5,96	9.84	9.84	1.53
	الجزء المحروق	20-40	12			
	الجزء المحروق	0-20	8,39			
	الجزء المحروق	20-40	13			
قلعة المهالبة	الجزء غير المحروق	0-20	6,37	10.21	3.28	1.64
	الجزء غير المحروق	20-40	13			
	الجزء غير المحروق	0-20	8,45			
	الجزء غير المحروق	20-40	13			

6- تأثير الحرائق على تركيز البوتاسيوم ppm في عينات التربة المدروسة:

تعتبر دراسة تأثير الموقع (محروق وغير محروق) على تركيز البوتاسيوم في التربة أمرًا مهمًا لفهم التغيرات التي تطرأ على الخصائص الكيميائية للتربة نتيجة الحرائق. يهدف هذا التحليل إلى تسليط الضوء على كيفية تأثير هذه الظروف

البيئية على مستويات البوتاسيوم، وهو عنصر غذائي أساسي لنمو النباتات. من خلال فحص البيانات، يمكننا استنتاج أهمية إدارة التربة في المناطق المتأثرة بالحرائق.

أظهرت نتائج الجدول رقم (7) أن متوسط تركيز البوتاسيوم في التربة المحروقة كان 108.25 ملغ/كغ بينما كان متوسط التركيز في التربة غير المحروقة 100 ملغ/كغ، تشير هذه النتائج إلى أن التربة المحروقة تحتوي على مستويات أعلى بشكل ملحوظ من البوتاسيوم مقارنة بالتربة غير المحروقة، مما يعكس التأثير الإيجابي للحرائق على تركيز هذا العنصر الغذائي الحيوي في التربة، وهو ما يتفق مع العديد من الدراسات التي توضح أن الحرائق تؤدي إلى تحرير البوتاسيوم من المادة العضوية المتراكمة على سطح التربة [43][44].

حيث تعمل الحرائق على رفع درجة حموضة التربة (pH)، مما يساهم في زيادة توافر البوتاسيوم في صورة قابلة للامتصاص من قبل النباتات [36]، بالإضافة إلى ذلك، فإن الحرارة الناتجة عن الحريق تؤدي إلى تحلل سريع للمادة العضوية، مطلقة بذلك العناصر المغذية مثل البوتاسيوم إلى التربة، وهذا يفسر الفارق الكبير في المتوسط بين المجموعتين.

أظهرت دراسة حديثة أيضاً أن شدة الحريق ومدة التعرض لها تؤثر بشكل مباشر على كمية البوتاسيوم المتحررة، حيث تؤدي الحرائق متوسطة الشدة إلى زيادة تركيز البوتاسيوم بشكل ملحوظ بسبب تحلل المادة العضوية، بينما قد تؤدي الحرائق شديدة الشدة إلى فقدان بعض العناصر نتيجة التبخر [45].

الجدول (7) يوضح قيم تركيز البوتاسيوم ppm في عينات التربة المدروسة حسب الموقع

الموقع	محروق\غير محروق	العمق\سم	تركيز البوتاسيوم\ppm	المتوسط الحسابي	الانحراف المعياري	الخطأ القياسي
قلعة المهالبة	الجزء المحروق	0-20	128	108.25	44.18	22.09
	الجزء المحروق	20-40	80			
	الجزء المحروق	0-20	164			
	الجزء المحروق	20-40	61			
قلعة المهالبة	الجزء غير المحروق	0-20	126	100.00	33.05	16.53
	الجزء غير المحروق	20-40	112			
	الجزء غير المحروق	0-20	103			
	الجزء غير المحروق	20-40	59			

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات:

1. أظهرت النتائج ارتفاعاً في كل من النسبة المئوية للرمال ودرجة حموضة التربة (pH) والناقلية الكهربائية (EC) في الترب المحروقة مقارنة بالترب غير المحروقة، مما يشير إلى تأثير الحريق في تحويل التربة نحو الوسط القلوي وزيادة

تركيز الأملاح، مع الإشارة إلى أن انخفاض الرمل قد يعود إلى عوامل لاحقة للحريق مثل الانجراف وليس فقط إلى تأثير الحرارة المباشرة.

٢. لوحظ انخفاض في محتوى التربة من المادة العضوية والفوسفور في المواقع المحروقة.

٣. سجلت التربة المحروقة تركيزاً أعلى من البوتاسيوم مقارنة بالتربة غير المحروقة، وذلك نتيجة تحرر البوتاسيوم من احتراق المواد العضوية والبقايا النباتية.

التوصيات:

- إجراء دراسات إضافية لتحديد تأثيرات الحرائق على أنواع مختلفة من التربة.
- وضع استراتيجيات فعالة لإدارة الأراضي تأخذ في الاعتبار التأثيرات المحتملة للحرائق على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، لضمان استدامة الإنتاج الزراعي.
- تقييم جودة التربة بعد حدوث الحرائق، مع التركيز على قياس مستويات العناصر الغذائية مثل البوتاسيوم والفوسفور، لضمان عودة التربة إلى حالتها الصحية.
- توعية المجتمع المحلي بأهمية إدارة الحرائق وتأثيراتها على التربة، من خلال ورش عمل وندوات، مما يساعد في تعزيز الوعي البيئي واتخاذ إجراءات مناسبة للحفاظ على الموارد الطبيعي.

References:

- [1] X. Jiang, Y. Wang, and L. Zhang, "Soil as a natural reservoir for water and carbon storage," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 102–115, 2023.
- [2] P. M. Kopittke, A. A. Berhe, and Y. Carrillo, "Soil: The most valuable non-renewable resource on Earth," *Glob. Change Biol.*, vol. 28, no. 5, pp. 1625–1630, 2022.
- [3] H. Wang, Q. Zhao, and X. Li, "Heavy metal pollution in soils: Enzymatic activity and microbial toxicity," *Environ. Pollut.*, vol. 316, p. 120595, 2023.
- [4] P. Borrelli, D. A. Robinson, P. Panagos, and C. Ballabio, "Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)," *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 117, no. 36, pp. 21994–22001, 2022.
- [5] M. Turco, J. J. Rosa-Cánovas, and J. Bedia, "Accelerating fire frequency in the Mediterranean basin," *Environ. Res. Lett.*, vol. 18, no. 11, p. 114038, 2023.
- [6] M. W. Jones, A. Smith, and R. Betts, "Climate change increases risk of wildfires," *Science*, vol. 375, no. 6586, pp. 1304–1307, 2022.
- [7] J. G. Pausas, J. E. Keeley, and D. W. Schwilk, "Fire and plant evolution," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 38, no. 5, pp. 443–454, 2023.
- [8] Y. Liu, Z. Wang, and J. Chen, "Direct impacts of wildfires on soil structure and nutrient loss," *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, vol. 128, no. 4, p. e2022JG007189, 2023.
- [9] J. Chen, Y. Liu, and X. Wang, "Indirect effects of wildfires on soil pH and temperature dynamics," *J. Environ. Manage.*, vol. 351, p. 119876, 2024.
- [10] R. G. Smith, M. McMillan, and C. J. Westbrook, "Nutrient exchange dynamics in post-fire ecosystems," *Ecosystems*, vol. 27, no. 2, pp. 345–359, 2024.
- [11] E. J. Bowd, S. C. Banks, A. Bissett, and D. B. Lindenmayer, "Long-term impacts of wildfire and logging on forest soils," *Nat. Geosci.*, vol. 15, no. 3, pp. 179–184, 2022.
- [12] C. Santín, S. H. Doerr, and X. L. Otero, "Fire effects on soil organic matter quality and stability," *Glob. Change Biol.*, vol. 27, no. 19, pp. 4839–4851, 2021.

- [13] Y. Pressler, J. C. Moore, and M. F. Cotrufo, "Belowground community responses to fire," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 138, p. 107568, 2019.
- [14] D. Wagschal, J. Hedou, and M. E. Lucas-Borja, "Microbial activity suppression following wildfires," *Sci. Total Environ.*, vol. 856, p. 159123, 2023.
- [15] A. F. A. Pellegrini, A. Ahlström, and S. E. Hobbie, "Fire effects on soil carbon and nutrient cycling," *Nat. Clim. Change*, vol. 11, no. 5, pp. 442–448, 2021.
- [16] G. W. Thomas, "Soil pH and soil acidity," in *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, D. L. Sparks, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1996, pp. 475–490.
- [17] G. J. Bouyoucos, "Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils," *Agron. J.*, vol. 54, no. 5, pp. 464–465, 1962.
- [18] G. W. Gee and J. W. Bauder, "Particle-size analysis," in *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, A. Klute, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1986, pp. 383–411.
- [19] J. D. Rhoades, "Soluble salts," in *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, A. L. Page, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1982, pp. 167–179.
- [20] A. Walkley and I. A. Black, "An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method," *Soil Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 29–38, 1934.
- [21] D. W. Nelson and L. E. Sommers, "Total carbon, organic carbon, and organic matter," in *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, D. L. Sparks, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1996, pp. 961–1010.
- [22] J. M. Bremner, "Nitrogen—Total," in *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, D. L. Sparks, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1996, pp. 1085–1121.
- [23] S. R. Olsen, C. V. Cole, and F. S. Watanabe, Estimation of Available Phosphorus in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate, U.S. *Dept. Agric.*, *Washington*, DC, USA, Circ. 939, 1954.
- [24] D. Knudsen, G. A. Peterson, and P. F. Pratt, "Lithium, sodium, and potassium," in *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, A. L. Page, Ed. *Madison*, WI, USA: SSSA, 1982, pp. 225–246.
- [25] P. M. Kopittke, R. C. Dalal, and N. W. Menzies, "Mechanical composition of soil and its relationship to hydrological behavior," *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol. 83, no. 1, pp. 1–12, 2019.
- [26] M. E. Lucas-Borja, P. A. Plaza-Álvarez, and J. González-Romero, "Short-term effects of prescribed burning on soil physical and chemical properties in Mediterranean forests," *J. Environ. Manage.*, vol. 280, p. 111675, 2021.
- [27] Z. Wu, M. Li, and X. Zhang, "Thermal transformations and particle aggregation in fire-affected soils," *Geoderma*, vol. 432, p. 116415, 2024.
- [28] Y. Zhang, H. Liu, and W. Zhou, "Mineralogical changes in clay fractions due to wildfires," *Clays Clay Miner.*, vol. 72, no. 1, pp. 45–58, 2024.
- [29] P. Pereira, A. Cerdà, and X. Úbeda, "Ash properties and their effects on soil pH and nutrient availability after wildfire," *Geoderma*, vol. 337, pp. 136–147, 2019.
- [30] J. Mataix-Solera, C. Guerrero, and F. García-Orenes, "Fire effects on soil organic matter: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 10, pp. 2393–2402, 2011.
- [31] J. A. González-Pérez, F. J. González-Vila, and G. Almendros, "The effect of fire on soil organic matter—A review," *Environ. Int.*, vol. 30, no. 6, pp. 855–870, 2004.
- [32] H. Knicker, "How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review," *Biogeochemistry*, vol. 85, no. 1, pp. 91–118, 2007.
- [33] G. Certini, C. Nocentini, and H. Knicker, "Wildfire effects on soil organic matter quantity and quality in a Mediterranean ecosystem," *Geoderma*, vol. 181, pp. 55–62, 2012.

- [34] M. Alcañiz, X. Úbeda, and A. Cerdà, "Long-term effects of wildfire on soil organic matter in a Mediterranean shrubland," *Catena*, vol. 145, pp. 92–101, 2016.
- [35] S. R. Holden, B. M. Rogers, and K. K. Treseder, "Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire," *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 4, p. 045016, 2015.
- [36] G. Certini, "Effects of fire on properties of forest soils: A review," *Oecologia*, vol. 143, no. 1, pp. 1–10, 2005.
- [37] N. C. Banning, D. V. Murphy, and F. C. Hoyle, "Microbial community dynamics and nitrogen cycling in post-fire soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 148, p. 1078, 2020.
- [38] S. R. Holden, B. M. Rogers, and K. K. Treseder, "Fire severity influences the response of soil microbes to a boreal forest fire," *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 4, p. 045016, 2015.
- [39] A. M. Smith, L. B. Lentile, and A. T. Hudak, "Variability in post-fire nitrogen availability," *Int. J. Wildland Fire*, vol. 28, no. 5, pp. 365–378, 2019.
- [40] N. C. Dove and S. C. Hart, "Fire reduces fungal species richness and in situ mycorrhizal colonization: A meta-analysis," *Fire Ecol.*, vol. 13, no. 2, pp. 37–65, 2017.
- [41] B. M. Rodriguez-Cardona, A. A. Coble, and A. S. Wymore, "Wildfire impacts on soil phosphorus availability and cycling: A global meta-analysis," *Glob. Change Biol.*, vol. 30, no. 1, p. e17032, 2024.
- [42] M. S. Johnson, K. Lajtha, and A. K. Aufdenkampe, "Phosphorus availability in wildfire ash: A comparative study," *Geoderma*, vol. 431, p. 116358, 2024.
- [43] L. F. DeBano, D. G. Neary, and P. F. Ffolliott, *Fire's Effects on Ecosystems*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1998.
- [44] X. Ubeda, P. Pereira, and L. Outeiro, "Effects of fire on soil nutrients and chemical properties," in *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Enfield, NH, USA: Science Publishers, 2005, pp. 85–102.
- [45] F. Pérez, M. T. Fontúrbel, and J. A. Vega, "Potassium release following wildfires of varying intensity," *For. Ecol. Manage.*, vol. 529, p. 120687, 2023.

