



## تأثیرات آتش‌سوزی بر ویژگی‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی خاک‌های جنگلی

ساناز اشرفی سعیدلو<sup>۱\*</sup>، ندا مرادی<sup>۲</sup>، میرحسن رسولی صدقیانی<sup>۳</sup>

- ۱- محقق (Ph.D.)، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران؛ \*sanazashrafi92@yahoo.com
- ۲- دانشیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
- ۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اختلالات طبیعی در اکوسیستم‌های جنگلی، تأثیرات گسترده‌ای بر دینامیک خاک بر جای می‌گذارد و موجب تغییرات عمیق در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن می‌شود. این مطالعه، با رویکردی مروری و نظام‌مند، به تحلیل تأثیرات و پیامدهای آتش‌سوزی بر خصوصیات خاک جنگل بر اساس منابع علمی معتبر می‌پردازد. شواهد حاصل از مطالعات متعدد نشان می‌دهد که شدت و مدت زمان آتش، میزان رطوبت خاک، پوشش گیاهی، بافت و ترکیب خاک، و نیز شیب توپوگرافی از جمله عوامل تعیین‌کننده در نوع و میزان تغییرات پس از آتش‌سوزی هستند. در بعد فیزیکی، کاهش تخلخل، افزایش وزن مخصوص ظاهری، آب‌گریزی خاک، و افت ظرفیت نگهداشت آب از مهم‌ترین پیامدهای مشاهده‌شده‌اند. در حوزه شیمیایی، افزایش pH خاک، کاهش کربن آلی و نیتروژن کل، و تغییر در قابلیت دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه فسفر، از جمله اثرات شاخص هستند. در سطح بیولوژیکی نیز، آتش‌سوزی موجب کاهش تنوع و تراکم موجودات زنده خاک، از جمله جوامع میکروبی و بی‌مهرگان، و اختلال در فرآیندهای زیستی مانند معدنی‌سازی مواد آلی می‌گردد. درک عمیق از این فرآیندها می‌تواند نقش کلیدی در تدوین راهکارهای مدیریتی مبتنی بر بازسازی اکولوژیکی و احیای عملکردی خاک‌های آسیب‌دیده ایفا کند. بررسی‌های تحقیق حاضر می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی برنامه‌های احیا، مدیریت پایدار منابع خاک و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های جنگلی در برابر آتش‌سوزی‌های آینده، مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** آتش‌سوزی جنگلی، عملکرد خاک، جامعه میکروبی، چرخه مواد مغذی، مدیریت اکوسیستم

### مقدمه

جهان نقش مهمی در پویایی ساختارهای اکولوژیکی، بازتولید گونه‌های گیاهی، و تنظیم چرخه‌های عناصر غذایی ایفا می‌کند. در شرایط طبیعی، آتش می‌تواند بخشی از فرآیندهای احیای جنگل باشد؛ اما افزایش فراوانی، شدت و گستره آتش‌سوزی‌های جنگلی در دهه‌های اخیر (که تا حد زیادی ناشی از تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی، و گسترش فعالیت‌های انسانی است) موجب نگرانی‌های فزاینده‌ای درباره آثار کوتاه‌مدت و بلندمدت آن بر کارکرد اکوسیستم و سلامت خاک شده است (اشرفی سعیدلو، ۱۳۹۴؛ Hrelja et al., 2020).

خاک به‌عنوان زیربنای پایداری اکولوژیکی، اولین و یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی است که تحت تأثیر مستقیم حرارت ناشی از آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. حرارت بالا منجر به تخریب ساختار فیزیکی، تغییر ترکیبات شیمیایی، و تضعیف فعالیت زیستی خاک می‌شود. این تغییرات نه‌تنها بر خصوصیات خاک، بلکه بر توان بازسازی طبیعی اکوسیستم، حفظ تنوع زیستی و بهره‌وری جنگل نیز اثرگذارند (Chicco et al., 2023; Fernandez-Marcos, 2022; Khan, 2022).



مطالعات متعددی در سطح جهانی نشان داده‌اند که آتش‌سوزی می‌تواند تغییراتی چندلایه و پیچیده در ویژگی‌های فیزیکی (مانند تخلخل، نفوذپذیری و وزن مخصوص)، شیمیایی (نظیر pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و ترکیب عناصر غذایی)، و بیولوژیکی (شامل تنوع و تراکم میکروارگانیسم‌ها و فعالیت آنزیمی) خاک ایجاد کند (Chiroma et al., 2023; Marfella et al., 2024). درک سازوکارهای این تغییرات و ارزیابی شدت و ماندگاری آن‌ها از اهمیت بالایی در برنامه‌ریزی برای مدیریت پس از آتش‌سوزی برخوردار است.

هدف این مقاله، بررسی نظام‌مند و تحلیلی پیرامون تأثیرات آتش‌سوزی بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های جنگلی است. همچنین تلاش شده است تا با تبیین دقیق روندهای تغییر و عوامل مؤثر، زمینه‌ای برای توسعه راهبردهای احیایی و مدیریتی فراهم گردد که بتواند در ارتقاء تاب‌آوری خاک و پایداری اکوسیستم‌های جنگلی مؤثر واقع شود.

### تأثیرات آتش‌سوزی بر خواص فیزیکی خاک

خواص فیزیکی خاک شامل ویژگی‌ها و فرآیندهایی است که تحت تأثیر نیروهای فیزیکی شکل می‌گیرند و از طریق معیارها و پارامترهای قابل اندازه‌گیری توصیف می‌شوند. آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از عوامل محیطی مؤثر، تغییرات قابل توجهی در برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک ایجاد می‌کند که می‌توان آن‌ها را در چند دسته کلی طبقه‌بندی کرد: رنگ خاک، بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری خاک و ظرفیت نگهداری آب در خاک.

**رنگ خاک:** یکی از شاخص‌های حساس به حرارت است که با شدت و دمای آتش‌سوزی رابطه مستقیم دارد. در آتش‌سوزی‌ها با دمای بالا و شدت زیاد، ماتریس خاک به رنگ قرمز تغییر می‌یابد که ناشی از تغییر شکل اکسیدهای آهن در خاک است، در حالی که در آتش‌سوزی‌ها با شدت کم تا متوسط، سطح خاک معمولاً توسط لایه‌ای از خاکستر تیره یا خاکستری پوشیده می‌شود. تغییر رنگ خاک می‌تواند نشانگر تغییرات شیمیایی و ساختاری در خاک باشد و از آن به‌عنوان یک معیار غیرمستقیم برای ارزیابی اثرات حرارتی آتش استفاده می‌شود (Stoof et al., 2013).

**بافت خاک:** بافت خاک که شامل ترکیب درصدی شن، سیلت و رس است؛ معمولاً به‌طور مستقیم تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار نمی‌گیرد، چرا که اجزای معدنی آن دارای آستانه حرارتی بالایی هستند. با این حال، دمای بالای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند باعث شروع تغییرات در ساختار شبکه‌ای رس شود و در دماهای نزدیک به ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه، تخریب کامل ساختار داخلی آن رخ دهد. به‌علاوه، آتش‌سوزی می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم با ایجاد لایه‌های خاکستر و تغییر توزیع اندازه ذرات سطح خاک، بافت را در جهت افزایش درصد ذرات درشت‌تر تغییر دهد که این امر نفوذپذیری و سایر ویژگی‌های خاک را دستخوش تغییر می‌کند (Megremi et al., 2024; Francos et al., 2024).

**وزن مخصوص ظاهری خاک:** این شاخص که بیانگر جرم خاک خشک در واحد حجم کل خاک است؛ پس از آتش‌سوزی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً ناشی از متلاشی شدن ذرات خاک و پر شدن منافذ توسط خاکستر و ذرات رس است که باعث کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش چگالی ظاهری خاک می‌شود. این تغییرات منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری خاک و افزایش خطر فرسایش سطحی می‌گردد (Agbeshie et al., 2022).

**خاصیت آب‌گریزی خاک:** یکی از مهم‌ترین تغییراتی است که پس از آتش‌سوزی مشاهده می‌شود و به دلیل تشکیل ترکیبات آلی آب‌گریز بر سطح ذرات خاک ایجاد می‌شود. این خاصیت مانع نفوذ آب به درون خاک می‌شود و در نتیجه کاهش ظرفیت نگهداری آب و افزایش رواناب سطحی را به دنبال دارد. این پدیده معمولاً در خاک‌های خشک و در آتش‌سوزی‌هایی با شدت متوسط تا بالا بیشتر مشاهده می‌شود و با افزایش عمق خاک یا کاهش شدت آتش، به تدریج کاهش می‌یابد (Agbeshie et al., 2022).



## تأثیرات آتش‌سوزی بر خواص شیمیایی خاک

**واکنش و هدایت الکتریکی خاک:** واکنش خاک (pH) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که نشان‌دهنده نوع کاتیون‌های جذب شده بر سطح کلئیدهای خاک می‌باشد. مقادیر pH بالاتر از ۶ نشان‌دهنده حضور کافی کاتیون‌های بازی در سطح کلئیدها است. پس از آتش‌سوزی، افزایش pH خاک اغلب به دلیل تجزیه کند اسیدهای آلی رخ می‌دهد. در دماهای بالاتر از ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، سوختن کامل مواد آلی منجر به آزادسازی کاتیون‌های بازی مانند Ca، Mg، K و Na می‌شود که افزایش قابل توجهی در pH و اشباع بازی خاک ایجاد می‌کند. این افزایش pH معمولاً موقتی است و به دنبال بارندگی‌ها و فرایندهای شسته‌شدن، به مرور کاهش می‌یابد. همچنین هدایت الکتریکی خاک (EC) که معیار شوری خاک است، پس از آتش‌سوزی به دلیل آزادسازی یون‌های معدنی افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش کوتاه‌مدت بوده و در طول زمان به سطح اولیه بازمی‌گردد (اشرفی سعیدلو و همکاران، ۱۳۹۴a؛ Megremi et al., 2024; Hussain et al., 2024).

**ماده آلی خاک:** خاک بزرگترین مخزن کربن در سطح زمین است که بخش عمده‌ای از آن به شکل کربن آلی ذخیره شده است. کربن آلی خاک شامل سه بخش فعال، نیمه‌فعال و مقاوم است که هر یک زمان ماندگاری متفاوتی در خاک دارند. بخش فعال کربن آلی شامل مواد آلی نسبتاً تازه مانند بقایای گیاهی و میکروبی است که سریع‌تر تجزیه می‌شوند، در حالی که بخش مقاوم ممکن است قرن‌ها در خاک باقی بماند. آتش‌سوزی به صورت مستقیم از طریق اکسیداسیون مواد آلی و به طور غیرمستقیم از طریق تأثیر بر فعالیت میکروبی، چرخه کربن خاک را تغییر می‌دهد. شدت آتش‌سوزی، نوع خاک و شرایط محیطی تعیین‌کننده میزان و نوع تغییرات در مواد آلی خاک هستند. برخی مطالعات افزایش مواد آلی مقاوم در خاک را پس از آتش‌سوزی گزارش کرده‌اند که ناشی از تبدیل مواد آلی تازه به شکل‌های پایدارتر و محافظت‌شده در برابر تجزیه زیستی است. با این حال، از بین رفتن پوشش گیاهی و افزایش فرسایش پس از آتش‌سوزی می‌تواند منجر به کاهش مقدار کربن آلی خاک شود (اشرفی سعیدلو و رسولی صدقیانی، ۱۳۹۳؛ Megremi et al., 2024; Hološ et al., 2022).

## تغییرات عناصر غذایی پرمصرف خاک

**نیتروژن:** آتش‌سوزی موجب از دست رفتن نیتروژن خاک به ویژه از طریق تصعید می‌شود، به ویژه در آتش‌سوزی‌های شدید که دما تا ۶۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با این حال، تأثیر آتش‌سوزی بر ذخیره نیتروژن خاک ناپایدار بوده و بسته به شدت آتش‌سوزی، رطوبت خاک، فرسایش و شرایط محیطی می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. پس از آتش‌سوزی، بخش قابل توجهی از نیتروژن آلی خاک به شکل نیتروژن معدنی (آمونیم و نترات) تبدیل می‌شود که در دسترس گیاهان قرار می‌گیرد، اما این افزایش نیز موقتی است و در صورت عدم جذب توسط گیاهان، ممکن است از طریق آبشویی و فرسایش از دست برود (اشرفی سعیدلو و همکاران، ۱۳۹۴b).

**فسفر:** ذخیره اصلی فسفر در خاک بوده و تلفات آن از طریق تصعید و آبشویی کمتر از نیتروژن است. آتش‌سوزی موجب افزایش فوری فسفر قابل دسترس خاک و خاکستر می‌شود که ناشی از تبدیل فسفر آلی به فرم‌های غیرآلی و قابل جذب است. این افزایش معمولاً کوتاه‌مدت بوده و با گذشت زمان، فسفر جذب شده توسط اسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز یا به همراه رواناب از خاک خارج می‌شود (اشرفی سعیدلو و رسولی صدقیانی، ۱۳۹۳؛ Huerta et al., 2020).

**پتاسیم:** اثر آتش‌سوزی بر چرخه پتاسیم موقتی بوده و عمدتاً به دلیل آزادسازی کاتیون‌های پتاسیم در اثر سوختن مواد آلی افزایش می‌یابد. مقدار پتاسیم آزاد شده به نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و شرایط آب و هوایی پس از آتش‌سوزی وابسته است. بارندگی‌های شدید پس از آتش‌سوزی می‌تواند منجر به فرسایش خاکستر و از دست رفتن پتاسیم شود (اشرفی سعیدلو و رسولی صدقیانی، ۱۳۹۳؛ Huerta et al., 2020).



عناصر غذایی کم‌مصرف خاک: مقدار و ترکیب شیمیایی خاکستر ناشی از آتش‌سوزی با شدت آتش و نوع پوشش گیاهی رابطه مستقیم دارد. افزایش عناصر کم‌مصرف مانند منگنز، آهن، مس و روی پس از آتش‌سوزی به دلیل تغییرات pH و آزادسازی این عناصر از ساختارهای آلی و معدنی خاک رخ می‌دهد. با گذشت زمان و فرسایش، مقادیر این عناصر کاهش یافته و ممکن است به فرم‌های نامحلول تبدیل شوند که برای گیاهان قابل استفاده نیستند (اشرفی سعیدلو و رسولی صدقیانی، ۱۳۹۳؛ Huerta et al., 2020; Megremi et al., 2024).

در مجموع، آتش‌سوزی تأثیرات پیچیده و متغیری بر خواص شیمیایی خاک دارد که بسته به شدت آتش‌سوزی، نوع خاک، پوشش گیاهی و شرایط محیطی متفاوت است. افزایش موقت pH، هدایت الکتریکی، و در دسترس بودن برخی عناصر غذایی از جمله نتایج کوتاه‌مدت آتش‌سوزی است، در حالی که تأثیرات بلندمدت آن می‌تواند شامل تغییرات در ساختار مواد آلی خاک و کاهش منابع نیتروژن و فسفر باشد. این تغییرات زیربنای اکولوژیکی مهمی برای رشد مجدد پوشش گیاهی و بازیابی اکوسیستم‌های متأثر از آتش‌سوزی فراهم می‌آورند (Huerta et al., 2020).

### تأثیرات آتش‌سوزی بر خواص بیولوژیکی

**مزوفون و میکروفون خاک:** بی‌مهرگان خاکزی نقش مهمی در تجزیه لاشبرگ‌ها، معدنی شدن کربن و عناصر غذایی، تغییر و تبدیل و تشکیل ساختمان خاک ایفا می‌کنند. تأثیرات آتش‌سوزی بر این موجودات خاکزی به دو دسته اثرات مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. بطور کلی تأثیرات مستقیم آتش بر بی‌مهرگان خاکزی به دلیل توانایی تحرک آنها در خاک، در مقایسه با میکروارگانیسمها کمتر بوده و این اثرات می‌توانند به صورت مکانیسم‌های مختلفی از جمله مرگ و میر مستقیم یا مهاجرت اجباری رخ دهند. آتش می‌تواند از طریق تغییر ترکیب گونه‌های گیاهی، ساختار پوشش گیاهی، کاهش ضخامت لایه لاشبرگ سطحی و تغییر رطوبت و دمای خاک به طور غیرمستقیم جامعه بی‌مهرگان خاکزی را تحت تأثیر قرار دهد. احتراق می‌تواند منجر به افزایش pH خاک و نوسانات بیشتر دما و رطوبت شود و این تغییرات ایجاد شده در زیستگاه خاک، بندپایان را در معرض دما و نور بالاتری قرار می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهند که به دنبال وقوع آتش‌سوزی، جمعیت بندپایان به شکل‌های مختلف دستخوش تغییر قرار می‌گیرند (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024). پژوهش‌های انجام شده در جنگل‌های اکالیپتوس استرالیا حاکی از عدم تأثیرپذیری جمعیت بندپایان از آتش‌سوزی می‌باشد در حالی که برخی گزارش‌ها کاهش جمعیت بندپایان را تا حداقل ۵ سال پس از وقوع آتش‌سوزی نشان داده‌اند. این تغییرات به تخریب پوشش گیاهی، کاهش ضخامت افق‌های آلی فوقانی، کاهش مقدار آب و افزایش دمای خاک نسبت داده شده‌اند. مطالعات انجام شده بر روی تأثیر آتش‌سوزی بر خصوصیات خاک نشان دادند که آتش‌سوزی به صورت غیرمستقیم منجر به کاهش شدید بیومس و تعداد گونه‌هایی از بی‌مهرگان خاکزی می‌شود (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024).

**ماکروفون خاک:** ماکروفون خاک یکی از آشکارترین مؤلفه‌های تنوع زیستی در بیشتر اکوسیستم‌ها است و ارگانیزم‌های بزرگتر از دو میلی‌متر را در بر می‌گیرد و جمعیت آن‌ها به شیوه‌های مدیریتی اکوسیستم‌ها بستگی دارد. عموماً تأثیرات مستقیم آتش‌سوزی بر ماکروفون خاک در مقایسه با میکروارگانیسمها و گیاهان به دلیل توانایی تحرک آنها کمتر می‌باشد، این موجودات یا از آتش فرار می‌کنند یا به لایه‌های زیرین خاک می‌روند و میزان تأثیرپذیری از آتش را به حداقل می‌رسانند. آتش می‌تواند ماکروفون خاک را مستقیماً از طریق گرمای پدید آمده یا به طور غیرمستقیم با تغییر فاکتورهای خاکی و شرایط محیطی، دگرگون سازد. بنابراین پاسخ ماکروفون خاک به آتش می‌تواند سریع و کوتاه مدت یا کند و بلندمدت باشد. فاکتورهای محیطی ایجاد شده پس از آتش‌سوزی بر ماکروفون خاک خیلی روشن نبوده و گزارش‌ها گوناگونی در این رابطه وجود دارد که برخی اثرات مثبت و برخی وابسته به زمان و برخی دیگر منفی را نشان داده‌اند (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024).



**میکروارگانیسیم‌های خاک:** میکروارگانیسیم‌های خاک نقش اساسی در تنظیم چرخه‌های بیوژئوشیمیایی در اکوسیستم‌های خاکی بر عهده دارند چرا که تقریباً مسئول تجزیه تمام ترکیبات آلی می‌باشند. تأثیرات آتش بر میکروب‌های خاک بسته به شدت آتش‌سوزی و تغییر در برخی خواص خاک و شرایط زیست‌محیطی پس از آتش‌سوزی، متفاوت است. هر یک از این فاکتورها بسته به نوع ارگانیسیمی که در نظر گرفته می‌شود دارای طیف وسیعی از اثرات می‌باشند. اثر مستقیم و آبی آتش بر میکروب‌های خاک، کاهش زیست توده میکروبی است. حداکثر افزایش درجه حرارت در خاک سطحی اغلب به اندازه‌ای است که منجر به از بین رفتن اکثر میکروارگانیسیمها می‌شود. برخی از میکروارگانیسیمها در مقایسه با سایر میکروبها حساسیت بیشتری نسبت به حرارت دارند. مثلاً برخی از باکتری‌های نیتریفیکاتور، پروتوزوآها و قارچ‌های بدون اسپور در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد از بین می‌روند در حالی که گرمادوست بوده و در اثر تنش‌های حرارتی رشد می‌کنند (اشرفی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Agbeshie et al., 2022; Li et al., 2024).

**باکتری‌ها:** تأثیر آتش‌سوزی بر قارچ‌ها به مراتب بیشتر از باکتری‌ها می‌باشد. کاهش جمعیت باکتریایی خاک فقط در لایه‌های سطحی خاک گزارش شده است. برخی مطالعات حاکی از آنند که وقتی خاک به مدت ۱۵ دقیقه در معرض دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد جمعیت باکتری‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، در حالی که برخی دیگر نشان می‌دهند بین خاک‌های سوخته و شاهد از نظر تعداد باکتری‌ها تفاوت معناداری وجود ندارد، زیرا رطوبت بالای خاک مانع افزایش دما و سرعت گسترش آتش می‌شود. از طریق افزایش میزان انتقال گرما در خاک، فعالیت فیزیولوژیکی باکتریایی و میزان مقاومت آنها در برابر حرارت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میزان تأثیرپذیری گروه‌های مختلف باکتریایی از آتش‌سوزی و افزایش دما متفاوت است به طوری که باکتری‌های گرم منفی نسبت به انواع گرم مثبت حساسیت بیشتری نسبت به گرمایش دارند. برخی باکتری‌ها می‌توانند از طریق تشکیل فرم‌های مقاوم در دماهای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد زنده بمانند (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024).

تأثیرات غیرمستقیم آتش بر جمعیت باکتریایی بسته به میزان تغییر خصوصیات خاک در اثر وقوع آتش‌سوزی متفاوت است. از جمله تأثیرات کوتاه مدت آتش‌سوزی، افزایش قابل توجه باکتری‌های هتروتروف در خاک‌های سوخته است. این افزایش ناشی از رسوب خاکستر در سطح خاک و نیز توانایی بالای باکتری‌ها در استفاده از ترکیبات آلی محلول آزاد شده در اثر گرما می‌باشد. نتایج مطالعات پس از ایجاد خاکستر، دلیل اصلی افزایش فعالیت باکتریایی است. عوامل محیطی مانند بارندگی و عناصر معدنی آزاد شده در اثر احتراق مواد آلی نیز در افزایش تکثیر باکتری‌ها مؤثرند. در بلندمدت، جمعیت باکتری‌ها تمایل به بازگشت به سطوح قبل از آتش‌سوزی دارد که دلیل آن احیای پوشش گیاهی است، چرا که میکروارگانیسیمهایی که از طریق همزیستی مثبت، سینرژیسم و رقابت با گیاهان تعامل دارند به هرگونه تغییر در ترکیب گیاهی واکنش نشان می‌دهند.

**اکتینومیست‌ها:** رفتاری مشابه جمعیت باکتریایی در مورد اکتینومیست‌ها نیز مشاهده شده است. پس از وقوع آتش‌سوزی در چند سانتیمتری خاک سطحی جمعیت اکتینومیست‌ها به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، اما برخی محققان دریافته‌اند که احتراق تأثیری بر تعداد اکتینومیست‌های خاک سطحی ندارد. رطوبت خاک یکی از عواملی است که می‌تواند دلیل عدم تأثیرپذیری اکتینومیست‌ها از آتش‌سوزی را توضیح دهد. تیمارهای دمایی مختلفی برای جداسازی گونه‌های خاصی از اکتینومیست‌ها استفاده می‌شود، بطوریکه جداسازی برخی جنس‌ها در خاک هوا خشک به مدت یک ساعت در معرض دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد. میزان مقاومت گونه‌های مختلف به گرما در ارتباط با توانایی آنها برای تشکیل اسپور می‌باشد (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024).

آتش‌سوزی به صورت غیرمستقیم منجر به افزایش جمعیت اکتینومیست‌ها در طول چندین هفته پس از آتش‌سوزی می‌شود. رهاسازی عناصر موجود در خاکستر و افزایش pH و کاهش رطوبت شرایط مطلوبی برای رشد اکتینومیست‌ها ایجاد می‌کند، چرا که این میکروارگانیسیمها در خاک‌های قلیایی به وفور یافت می‌شوند و اسپور آنها قابلیت بقا در مکان‌های خشک و با دمای بالا را دارد.

**قارچ‌ها:** قارچ‌ها میکروارگانیسم‌هایی هستند که بیشتر تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار می‌گیرند. قارچ‌ها در دماهای پایین‌تری از باکتری‌ها در خاک از بین می‌روند و حساس‌ترین میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌شوند. در مطالعه‌ای، جمعیت قارچ‌ها به صورت چشمگیری پس از آتش‌سوزی کاهش یافته است. عمده‌ترین دلایل کاهش قارچ‌ها تأثیر مستقیم آتش، تغییر pH و افزایش مواد سمی خاک می‌باشند. فعالیت قارچ‌های میکوریز در خاک‌های سوخته کاهش می‌یابد. کاهش فعالیت قارچ‌ها باعث کاهش آنزیم‌های سلولاز و کیتیناز می‌شود، زیرا این آنزیم‌ها بیشتر توسط قارچ‌ها تولید می‌شوند. برخی مطالعات کاهش قارچ‌های زنده در لایه‌های سطحی خاک در پی آتش‌سوزی را گزارش کرده‌اند. به طور کلی قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها حساس‌ترند (Agbeshie et al., 2022; Francos et al., 2024).

**آنزیم‌ها:** آنزیم‌ها که نقش تسریع‌کننده واکنش‌های بیولوژیکی در خاک را دارند، با افزایش دما تا حدود ۶۰-۷۰ درجه سانتیگراد افزایش فعالیت و در دماهای بالاتر کاهش فعالیت دارند. فعالیت آنزیم‌ها پس از آتش‌سوزی کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش بیومس میکروبی، تغییر pH و کاهش ترکیبات آلی است. آنزیم فسفاتاز که نقش مهمی در آزادسازی فسفر دارد، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد ولی افزایش pH و فسفر خاکستر می‌تواند باعث افزایش فعالیت آن شود. فعالیت آنزیم سلولاز نیز کاهش می‌یابد که دلیل آن حساسیت قارچ‌ها به گرما است (اشرفی سعیدلو و همکاران، ۱۳۹۴؛ Huerta et al., 2020).

بطور کلی آتش‌سوزی‌ها تأثیرات گسترده و متنوعی بر خواص بیولوژیکی خاک دارند که شامل تغییر در جمعیت و فعالیت موجودات زنده خاک از جمله مزوفون، ماکروفون و میکروارگانیسم‌ها می‌شود. بندپایان و موجودات بزرگتر خاکی معمولاً به دلیل قابلیت جابجایی کمتر آسیب می‌بینند یا جمعیت‌شان کاهش می‌یابد، اما می‌توانند به مرور زمان بازسازی شوند. میکروارگانیسم‌ها، به ویژه قارچ‌ها، حساسیت بیشتری به آتش و افزایش دما دارند و کاهش قابل توجهی در جمعیت آن‌ها مشاهده می‌شود که این امر باعث تغییر در فرآیندهای تجزیه و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی خاک می‌گردد. باکتری‌ها و اکتینومیسیت‌ها تا حدی مقاوم‌تر هستند و در برخی شرایط حتی افزایش فعالیت نیز نشان می‌دهند. همچنین تغییرات ناشی از آتش در pH و ترکیب خاک، به ویژه آزاد شدن مواد معدنی و خاکستر، می‌تواند تأثیرات غیرمستقیم قابل توجهی بر زیست‌بوم خاک داشته باشد. نهایتاً، آتش‌سوزی باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های خاک می‌شود که پیامد آن کاهش کارایی فرآیندهای زیستی خاک و کاهش کیفیت اکوسیستم است، اما این تغییرات معمولاً با بازسازی پوشش گیاهی و گذشت زمان تا حدی اصلاح می‌شوند.

### نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

آتش‌سوزی جنگلی می‌تواند تغییرات عمیقی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ایجاد کند. این تغییرات می‌تواند بر رشد گیاهان و بازسازی طبیعی جنگل تأثیر بگذارد. درک این تغییرات و مکانیسم‌های ایجادکننده آنها برای توسعه راهکارهای مدیریتی مناسب ضروری است. پژوهش‌های آینده باید بر روی توسعه روش‌های مؤثر برای احیای خاک‌های آسیب‌دیده و درک بهتر تأثیرات ترکیبی آتش‌سوزی و تغییرات اقلیمی متمرکز شوند. همچنین، مطالعات بلندمدت برای ارزیابی دقیق مدت زمان لازم برای بازگشت ویژگی‌های خاک به حالت اولیه مورد نیاز است. این اطلاعات می‌تواند به ارگان‌های مرتبط با مدیریت جنگل در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مطلوب کمک نماید.

### منابع

۱. اشرفی سعیدلو، س.، رسولی صدقیانی، م.ح. (۱۳۹۳). تأثیر آتش‌سوزی بر میزان کربن آلی خاک و قابلیت دسترسی عناصر غذایی در جنگل‌های بلوط سردشت. تحقیقات کاربردی خاک، ۲ (۲): ۲۸-۳۹.



۲. اشرفی سعیدلو، س. (۱۳۹۴). بررسی تاثیرات آتش‌سوزی بر برخی خصوصیات بیولوژیکی و حاصلخیزی خاک‌های جنگلی سردشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

۳. اشرفی سعیدلو، س.، رسولی صدقیانی، م.ح.، برین، م. (۱۳۹۴ا). اثر جنگل‌زدایی ناشی از آتش‌سوزی بر برخی خصوصیات خاک‌های جنگلی سردشت. هشتمین کنفرانس ملی روز جهانی محیط‌زیست، ۲ تا ۳ تیر ماه، دانشگاه تهران. ۲۶۰.

۴. اشرفی سعیدلو، س.، رسولی صدقیانی، م.ح.، برین، م. (۱۳۹۴ب). تاثیر آتش‌سوزی بر میزان نیتروژن کل و معدنی در خاک‌های جنگلی (مطالعه موردی: جنگل‌های سردشت). هشتمین کنفرانس ملی روز جهانی محیط‌زیست، ۲ تا ۳ تیر ماه، دانشگاه تهران. ۲۶۳.

۵. اشرفی سعیدلو، س.، رسولی صدقیانی، م.ح.، برین، م. (۱۳۹۴ج). نقش آتش‌سوزی در تغییر فعالیت میکروبی خاک‌های جنگلی سردشت. چهارمین کنگره ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم، ۲۸ تا ۲۹ مرداد ماه، دانشگاه محقق اردبیلی. ۴-۱.

6. 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.
7. Chicco, J.M., Mandrone, G., Vacha, D. (2023). Effects of wildfire on soils: field studies and modelling on induced underground temperature variations. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1307569.
8. Chiroma, A.M., Alhassan, A.B. (2023). A Review of the Impact of Bush Burning on the Environment: Potential Effects on Soil Chemical Attributes. *International Journal of Science and Environment (IJSE)*, 3(3), 101-121.
9. Hussain, A., Ashraf, M.I., Hussain, S., Atif, M., Khan, B.A. (2024). Impacts of wildfire on soil characteristics in subtropical Chir Pine Forests of Murree, Pakistan. *International Journal of Applied and Experimental Biology*, 3(1), 61-67.
10. Fernandez-Marcos, M.L. (2022). Potentially toxic substances and associated risks in soils affected by wildfires: A review. *Toxics*, 10(1), 31.
11. Francos, M., Colino-Prieto, F., Sánchez-García, C. (2024). How mediterranean ecosystem deals with wildfire impact on soil ecosystem services and functions: a review. *Land*, 13(4), 407.
12. Hološ, S., Šurda, P., Lichner, L., Zvala, A., Piš, V. (2022). Fire-induced changes in soil properties depend on age and type of forests. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(4), 442-449.
13. Hrelja, I., Šestak, I., Bogunović, I. (2020). Wildfire impacts on soil physical and chemical properties-a short review of recent studies. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 85(4), 293-301.
14. Huerta, S., Fernández-García, V., Calvo, L., Marcos, E. (2020). Soil resistance to burn severity in different forest ecosystems in the framework of a wildfire. *Forests*, 11(7), 773.
15. Khan, B.A. (2022). Impacts of wildfire on soil characteristics in subtropical Chir Pine forests of Murree, Pakistan. *Experimental Biology*, 3(1), 61-67.
16. Li, X., Han, Y., Zhang, Y., Shao, Q., Dong, C., Li, J., Ding, B., Zhang, Y. (2024). Effects of wildfire on soil microbial communities in karst forest ecosystems of southern Guizhou Province, China. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(11), e01245-24.
17. Marfella, L., Mairota, P., Marzaioli, R., Glanville, H.C., Paziienza, G., Rutigliano, F.A. (2024). Long-term impact of wildfire on soil physical, chemical and biological properties within a pine forest. *European Journal of Forest Research*, 143(5), 1379-1399.
18. Megremi, I., Stathopoulou, E., Vorris, E., Kostakis, M., Karavoltos, S., Thomaidis, N., Vasilatos, C. (2024). Mediterranean wildfires' effect on soil quality and properties: a case from Northern Euboea, Greece. *Land*, 13(3), 325.
19. Stoof, C.R., Moore, D., Fernandes, P.M., Stoorvogel, J.J., Fernandes, R.E., Ferreira, A.J., Ritsema, C.J. (2013). Hot fire, cool soil. *Geophysical Research Letters*, 40(8), 1534-1539.



## Effects of Fire on the Biological, Chemical, and Physical Properties of Forest Soils

Sanaz Ashrafi-Saeidlou<sup>1\*</sup>, Neda Moradi<sup>2</sup>, Mir Hassan Rasouli-Sadaghiani<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Researcher (Ph.D.), Soil and Water Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran, \*sanazashrafi92@yahoo.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Soil and Water Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

### Abstract

Wildfire is recognized as one of the most significant natural disturbances in forest ecosystems, exerting extensive impacts on soil dynamics and causing profound changes in its physical, chemical, and biological properties. This study adopts a systematic review approach to analyze the effects and consequences of wildfire on forest soil characteristics, based on a comprehensive assessment of reputable scientific sources. Evidence from multiple studies indicates that fire-induced soil changes are strongly influenced by factors such as fire intensity and duration, pre-fire soil moisture, vegetation cover, soil texture and composition, and topographical slope. In terms of physical effects, reduced porosity, increased bulk density, soil water repellency, and diminished water-holding capacity are among the most notable outcomes. Chemically, wildfires often result in increased soil pH, decreased organic carbon and total nitrogen, and altered availability of essential nutrients, particularly phosphorus. Biologically, wildfire leads to a reduction in the diversity and abundance of soil organisms, including microbial communities and invertebrates, and disrupts key ecological processes such as organic matter mineralization. A thorough understanding of these processes is essential for developing management strategies focused on ecological restoration and the functional recovery of fire-affected soils. The evaluations of this review can serve as a foundation for designing rehabilitation programs, promoting sustainable soil resource management, and enhancing the resilience of forest ecosystems to future wildfires.

**Keywords:** Wildfire, Soil function, microbial community, Nutrient cycling, Ecosystem management