

## اثر سه سال آتش‌سوزی متوالی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یک خاک جنگلی در اطراف دریاچه زریوار مریوان

زاهد شریفی<sup>۱\*</sup>، چیاکو نظری<sup>۲</sup>، کیومرث محمدی‌سمانی<sup>۳</sup>، نقی شعبانیان<sup>۴</sup>

۱. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، سنندج

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جنگل‌داری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

۳. استادیار گروه جنگل‌داری و مرکز پژوهش و توسعه جنگل‌داری زاگرس شمالی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

۴. دانشیار گروه جنگل‌داری و مرکز پژوهش و توسعه جنگل‌داری زاگرس شمالی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، سنندج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۳/۱۱)

### چکیده

این پژوهش به منظور بررسی اثر سه سال آتش‌سوزی متوالی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۰-۵ سانتی‌متر) و خاک زیرسطحی (۵-۱۰ سانتی‌متر) در جنگل تپه درویش واقع در اطراف دریاچه زریوار مریوان انجام شد. تیمار شاهد نیز با شرایط یکسان در کنار منطقه سوخته و بدون اثر آتش‌سوزی انتخاب شد. از منطقه سوخته و شاهد هر یک سه نمونه تصادفی مرکب، از دو عمق یادشده، برداشته شد. نمونه‌ها برای بافت خاک، pH، هدایت الکتریکی (EC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، کربن آلی کل، نیتروژن کل و نیتروژن نیتراتی ( $\text{NO}_3^-$ -N) و آمونیومی ( $\text{NH}_4^+$ -N)، فسفر، پتاسیم، کلسیم، و منیزیم قابل دسترس و همچنین کربنات کلسیم معادل (TNV) با استفاده از روش‌های استاندارد تجزیه شدند. نتایج نشان داد به طور عموم آتش‌سوزی بر ویژگی‌های بررسی‌شده خاک سطحی بیشترین اثر و بر خاک زیرسطحی اثری میانه دارد. هدایت الکتریکی و TNV با بیشترین میزان در خاک سوخته تغییرات شایان توجه از خود نشان دادند. همچنین، میزان قابل دسترس نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم، و منیزیم پس از آتش‌سوزی افزایش یافت؛ در حالی که CEC در خاک سوخته‌شده در مقایسه با خاک شاهد بدون تغییر باقی ماند. میزان pH و مقدار کربن و نیتروژن کل خاک نیز افزایش اندکی در خاک سوخته‌شده از خود نشان دادند. همچنین بافت خاک با نشان دادن میزان کمتر رس در خاک سوخته‌شده سبک شد. در مجموع، نتیجه گرفته شد که آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثر چشمگیری دارد و سبب کاهش کیفیت خاک اراضی جنگلی می‌شود.

**کلیدواژگان:** آتش‌سوزی متوالی، خاک جنگلی، مریوان، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی.

### مقدمه

پژوهش‌ها نشان می‌دهند بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، و مینرالوژیکی اکوسیستم خاک به طور مستقیم یا غیرمستقیم تحت تأثیر آتش‌سوزی تغییر می‌کنند (Certini, 2005). تغییرات یادشده می‌توانند سودمند یا زیان‌بار باشند. مهم‌ترین اثر سودمند آتش بر اکوسیستم خاک افزایش حاصلخیزی کوتاه‌مدت آن ناشی از برگشت سریع عناصر غذایی طی سوختن پس‌مانده‌های آلی است. این افزایش حاصلخیزی می‌تواند سبب رشد تولیدات گیاهی و برتری یافتن برخی از گونه‌ها نسبت به سایر گونه‌های گیاهی در منطقه سوخته‌شده

شود. اما چنانچه گونه‌های گیاهی برتری یافته غیر بومی باشند یا عناصر حاصلخیزکننده همراه خاکستر سطح خاک بر اثر رواناب در فصول مرطوب به آب‌های سطحی و زیرسطحی داخل شوند و این آب‌ها را آلوده کنند و با در نظر گرفتن این اصل که یگانه وظیفه ماده آلی خاک افزایش حاصلخیزی خاک نیست، بلکه نقشی حیاتی در کل فرایندهای فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیک خاک دارد و در نهایت موجب بارآوری آن می‌شود، این یگانه اثر سودمند آتش‌سوزی در افزایش حاصلخیزی خاک نیز به اثری زیان‌بار تبدیل خواهد شد (Nardoto and da Cunha, Bustamante, 2003; Certini, 2005; Erickson and White, 2008). از آثار زیان‌بار آتش‌سوزی بر خاک می‌توان به مواردی همچون از بین رفتن جانداران خاک به طور مستقیم (کشته شدن یا آسیب دیدن) یا غیر مستقیم (از طریق تغییر در کمیّت

می‌شود که خود می‌تواند گرمایش زمین را تشدید کند. Greene و همکاران (1990) گزارش کردند هفت سال آتش‌سوزی بی‌درپی باعث نابودی کامل جنگل‌های نهان‌دانه<sup>۲</sup> اوکاواله<sup>۲</sup> در استرالیا شد. همچنین، Chansuk (1990) طی پنج سال آتش‌سوزی خاک‌های جنگلی دیپتروکراپ<sup>۳</sup> در فیلیپین در رابطه با فسفر، پتاسیم، کلسیم، و منیزیم به ترتیب افزایشی برابر ۵۳/۸، ۴۱/۶، ۱۲۰/۰، و ۱۲۸/۱ درصد را در خاک سوخته نسبت به شاهد گزارش کردند. بنابراین، در این پژوهش چگونگی تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بعد از سه سال آتش‌سوزی متوالی در جنگل‌های بلوط (تپه<sup>۴</sup> درویش) اطراف دریاچه<sup>۵</sup> زریوار مریوان در استان کردستان بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

منطقه<sup>۶</sup> بررسی شده بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی واقع در شهرستان مریوان در استان کردستان بود. این جنگل در ضلع شمالی شهرستان مریوان مشرف به دریاچه<sup>۷</sup> زریوار، به نام تپه<sup>۸</sup> درویش، واقع است. تپه اقلیمی این منطقه نیمه‌خشک مدیترانه‌ای است. به گونه‌ای که میانگین بارندگی و دمای هوای سالیانه آن به ترتیب ۹۹۱/۲ میلی‌متر و ۱۳/۷ °C است. فرم رویشی این جنگل‌ها بیشتر شاخه‌زاد و گونه‌های غالب آن برودار<sup>۹</sup> و دارماز<sup>۱۰</sup> است (شکل ۱).

در منطقه<sup>۱۱</sup> مورد پژوهش آتش‌سوزی، با منشأ انسانی، که سه سال متوالی (در تابستان سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳) رخ داده است، به منزله<sup>۱۲</sup> تیمار پژوهش شناسایی شد. برای اجتناب از خطاهای ناشی از تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، نمونه‌های شاهد در مجاورت نمونه‌های تیمار، به گونه‌ای که اثری از آتش‌سوزی در آن محل محرز نشد، انتخاب شد. برای نمونه‌برداری یک راستای نمونه‌برداری عمود بر شیب محل آتش‌سوزی به گونه‌ای انتخاب شد که تفاوت‌های فیزیوگرافی، توپوگرافی (ویژگی‌های شیب و ارتفاع)، مواد مادری، و پوشش گیاهی در محل‌های تکرار نمونه‌برداری وجود نداشته باشد. سپس، از هر دو عمق ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری خاک تیمار و شاهد سه نمونه<sup>۱۳</sup> تصادفی، که هر یک پنج زیرنمونه داشتند، نمونه‌برداری شد. پس از آمیختن زیرنمونه‌ها، حدود ۲ کیلوگرم آن در کیسه‌های پلاستیکی تمیز ریخته شد و ویژگی‌های محل نمونه‌برداری روی کیسه‌ها نوشته شد و نمونه‌ها برای آزمایش‌ها

و کیفیت ماده<sup>۱۴</sup> آلی و زیستگاه آن‌ها (Verma and Jayakumar, 2012)، از دست رفتن عناصر غذایی خاک به‌ویژه کربن و نیتروژن (Johnson and Curtis, 2001)، از بین رفتن درختان و گیاهان کف جنگل، کاهش پایداری ساختمان خاک از طریق کاهش ماده<sup>۱۵</sup> آلی، کاهش نفوذپذیری در اثر تخریب ساختمان و گرفتگی منافذ خاک به وسیله<sup>۱۶</sup> خاکستر به‌جامانده از آتش‌سوزی، و دفع آب<sup>۱۷</sup> ناشی از پوشیده شدن ذرات خاک با یک لایه<sup>۱۸</sup> نازک از ماده<sup>۱۹</sup> آلی اشاره کرد. همه<sup>۲۰</sup> این مسائل سبب تغییر چرخه<sup>۲۱</sup> هیدرولوژیکی، بیولوژیکی، و شیمیایی خاک و در معرض قرار دادن آن برای فرسایش و در نهایت تخریب خاک می‌شود (Certini, 2005; Neary et al., 2005; Erickson and White, 2008).

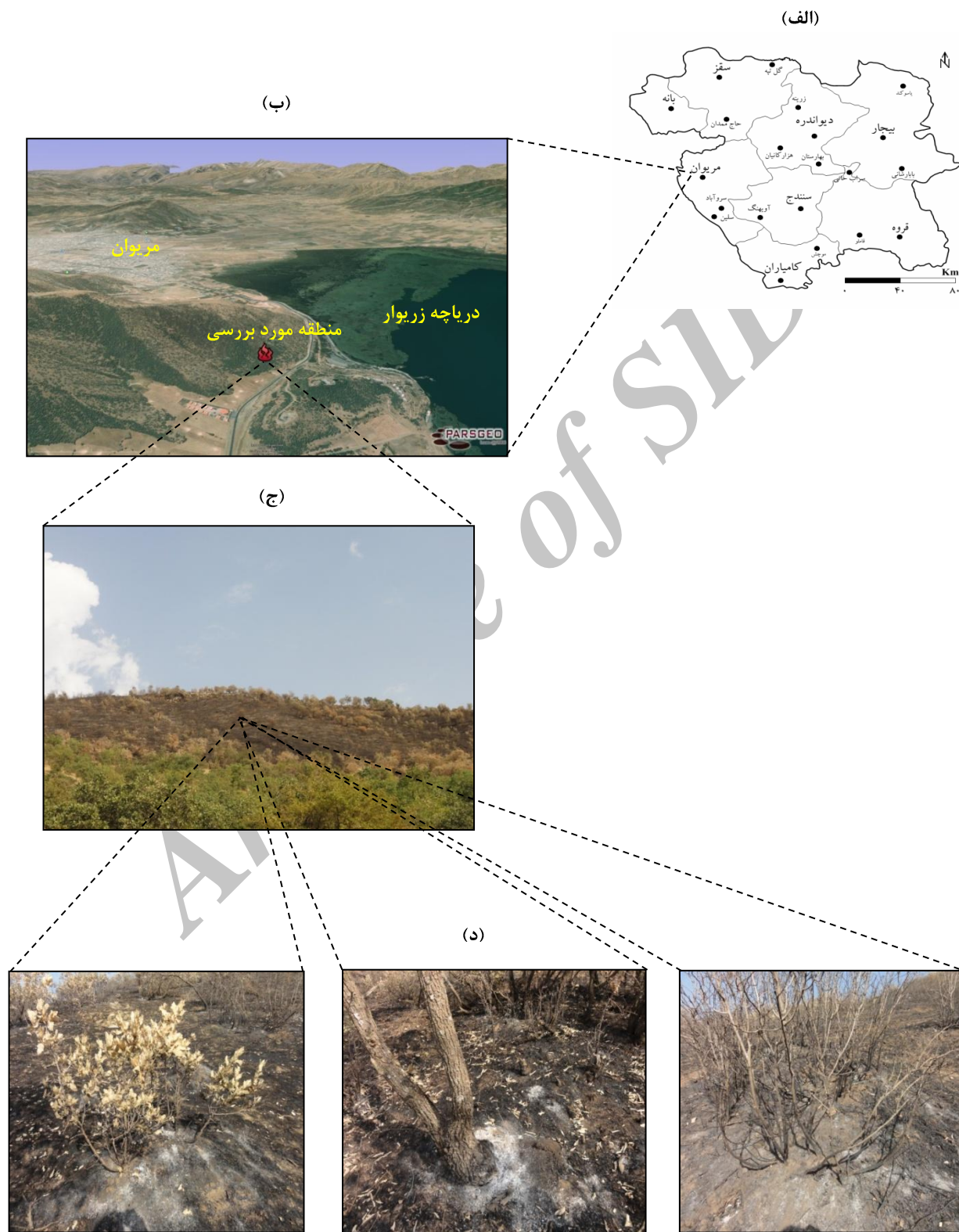
بسته به ویژگی‌های خاک (میزان رطوبت، میزان مواد آلی، توان هدایت گرمایی، نوع بافت)، رژیم آتش‌سوزی (شدت، مدت، تکرار، فصل، نوع آتش‌سوزی)، و شرایط محیطی (نوع پوشش گیاهی، نوع اقلیم منطقه، توپوگرافی) آثار آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک می‌تواند کوتاه‌مدت، درازمدت، یا دائمی باشد (Certini, 2005; Doerr and Cerda, 2005). حتی اگر تکرار سالیانه آتش‌سوزی، از این نظر که ممکن است میزان سوخت را برای آتش‌سوزی‌های بعدی بکاهد، سودمند باشد، از اینکه به خاک فرصت بازآوری داده نمی‌شود و آثار زیان‌بار سال‌های قبل نیز به طور تجمعی در خاک باقی می‌مانند و همچنین خاک به دلیل عاری شدن از پوشش گیاهی در برابر فرسایش ناشی از ضربات قطرات باران بی‌حفاظ می‌شود، در مقایسه با آتش‌سوزی‌هایی که با توالی کمتری رخ می‌دهند، اکوسیستم خاک را با سرعت بیشتری به سمت کاهش بارآوری و تخریب می‌راند (Cerda et al., 1995; Zabowski et al., 2007; Riddell and Suzanne et al., 2008). مثلاً Riddell و همکاران (2012) گزارش کردند تکرار سالیانه آتش‌سوزی سبب فشرده شدن و سله بستن سطح خاک می‌شود که خود می‌تواند نفوذپذیری خاک را کاهش دهد و میزان رواناب و فرسایش خاک را تشدید کند. همچنین Brye (2006) گزارش کرد دوازده سال آتش‌سوزی مکرر در یک چمنزار سبب کاهش چشمگیر میزان شوری و میزان قابل دسترس آهن و منگنز خاک شد. Thornley and Cannell (2004) نیز با مدل‌سازی اثر تکرار آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک گزارش کردند آتش‌سوزی‌های متوالی در طولانی‌مدت سبب کاهش بارآوری و میزان ذخیره<sup>۲۲</sup> کربن خاک و از طرفی دیگر سبب رهاسازی کربن و نیتروژن خاک به اتمسفر

2. Oakvale  
3. Dipterocarp  
4. *Quercus brantii* Lindl  
5. *Quercus infectoria*

1. Water repellency

عبور داده شده و برای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شدند.

بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، پس از هواخشک شدن و برداشتن پسماندهای درشت گیاهی و خرده‌سنگ‌ها و نرم کردن کلوخه‌ها نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری



شکل ۱. نقشه استان کردستان (الف)، محل منطقه بررسی شده در شهرستان مریوان (ب)، نمای نزدیک از منطقه بررسی شده (ج)، نمایی از خاک و درختان خسارت‌دیده (د).

عمق بررسی شده به دست نیامد (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد سه سال آتش‌سوزی متوالی سبب شده بافت خاک درشت‌تر (سبک‌تر) شود. در هماهنگی با این پژوهش Heidary Ghorbani and Dashtaki (2013) پس از گذشت ۱، ۲۰ و ۳ سال از آتش‌سوزی کاهشی به ترتیب برابر ۵/۸، ۶/۲ و ۷/۳ درصد برای رس و افزایشی به ترتیب برابر ۲/۰، ۲/۰ و ۴/۰ درصد برای شن در منطقه سوخته‌شده در مقایسه با شاهد برای خاک سطحی (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) گزارش کردند. همچنین Ketterings and Bigham (2000) اعلام کردند پس از آتش‌سوزی بافت خاک درشت‌تر می‌شود و علت آن به وجود آمدن ذرات در اندازه‌شن از اجزای رس و سیلت در اثر حرارت است. اما Granged *et al.* (2011a) علت درشت شدن بافت خاک را پس از گذشت سه سال از آتش‌سوزی جداسازی انتخابی ذرات ریز خاک (رس و سیلت) و کاهش آن‌ها در اثر فرایندهای فرسایش اعلام کردند. همچنین Hubbert *et al.* (2006) به نتایجی مشابه دست یافتند. اما علت درشت شدن بافت خاک در اثر آتش‌سوزی را آبیگری<sup>۱</sup> رس‌ها در دمای بالا گزارش کردند. محققان زیادی هم علت تبدیل ذرات ریز به اندازه‌شن را کلسیمی شدن سلیکات‌های آهن و آلومینیوم در درجه حرارت بالا می‌دانند (Terefe *et al.*, 2008; Parlak, 2011).

#### pH خاک، شوری (EC) و مواد قلیایی خنثی‌شونده معادل کربنات کلسیم (TNV)

میزان pH در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در خاک سوخته‌شده (۷/۶) در مقایسه با شاهد (۷/۴) اندکی افزایش یافت. اما این میزان افزایش از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ )؛ در حالی که میزان pH در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده و شاهد به طور مساوی برابر ۷/۵ به دست آمد (شکل ۲). میزان هدایت الکتریکی (EC) در هر دو عمق بررسی شده در خاک سوخته‌شده در مقایسه با شاهد افزایش یافته بود. اما این افزایش در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در خاک سوخته‌شده (۱/۵۲  $\text{dSm}^{-1}$ ) در مقایسه با شاهد (۰/۴۰  $\text{dSm}^{-1}$ ) بسیار معنادار بود ( $P < 0.01$ ). همچنین میزان این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده به میزان ۰/۲۹  $\text{dSm}^{-1}$  و در منطقه شاهد به میزان ۰/۲۳  $\text{dSm}^{-1}$  به دست آمد (شکل ۲)؛ که حاکی از افزایش ناچیز شوری در منطقه سوخته‌شده نسبت به شاهد در عمق یادشده است.

مواد قلیایی خنثی‌شونده معادل کربنات کلسیم<sup>۲</sup> (TNV)

آنالیزهای انجام‌شده در این پژوهش شامل بافت خاک، به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، میزان کربن آلی کل به روش خشک، از طریق سوزاندن در کوره (Nelson and Sommers, 1996)، میزان pH و شوری هر دو در سوسپانسیون نسبت ۱ به ۲ (خاک به آب) به ترتیب به کمک دستگاه pH متر (Model 744, Metrohm Pty Ltd., Herisau, Switzerland) و EC متر (Model 712, Metrohm Pty Ltd., Herisau, Switzerland) اندازه‌گیری شدند. همچنین، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) به روش Rowell (1994)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Loeppert and Sparks, 1996)، میزان نیتروژن قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با کلرید پتاسیم ۲ مولار و تقطیر عصاره به دست آمده (Bremner and Keeney, 1965)، میزان پتاسیم و کلسیم و منیزیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم نرمال، و اندازه‌گیری پتاسیم به روش نشر اتمی به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر (Model BWB-1, Technology, UK Ltd.) و کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری (Botha and Webb., 1952) در عصاره به دست آمده، فسفر به روش رنگ‌سنجی (Murphy and Riley, 1962) به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (Model Cary 50, Varian Australia Pty Ltd. Mulgrave, Victoria)، و نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری شدند (Bremner and Mulvaney, 1982).

داده‌های به دست آمده، با بهره‌گیری از نرم‌افزار SAS9، برای به دست آوردن میانگین و خطای استاندارد تجزیه و تحلیل آماری شدند. جهت مقایسه میانگین میزان پارامترهای بررسی شده در عمق‌های مختلف بین منطقه سوخته و شاهد از آزمون t استفاده شد. همچنین، نمودارهای مربوطه به کمک نرم‌افزار EXCEL رسم شدند.

## یافته‌ها و بحث

### بافت خاک

بافت خاک در هر دو منطقه سوخته و شاهد در هر دو عمق بررسی شده به طور یکسان لومی‌رسی‌سیلتی به دست آمد. اما درصد رس در منطقه سوخته‌شده در هر دو عمق، یعنی ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری، به ترتیب ۹/۱ و ۴/۰ درصد نسبت به شاهد کاهش نشان داد. در حالی که درصد شن در منطقه سوخته در هر دو عمق، یعنی ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری، به ترتیب ۸/۸ و ۵/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد؛ اگرچه این میزان تغییرات از نظر آماری معنادار نبودند ( $P < 0.05$ ). در زمینه میزان سیلت تفاوت چشمگیری در منطقه سوخته و شاهد در هر دو

1. Dehydration  
2. Total Neutralizing Value

۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده و شاهد تقریباً به طور مساوی به ترتیب ۵/۰ و ۵/۱ درصد به دست آمد (جدول ۱). میزان نیتروژن کل خاک روندی همانند کربن آلی خاک نشان داد؛ طوری که در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در خاک سوخته‌شده (۰/۴۴٪) در مقایسه با شاهد (۰/۳۵٪) افزایش یافته بود. اما این میزان افزایش از نظر آماری معنادار نیست ( $P < 0.05$ )؛ در حالی که میزان نیتروژن کل در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده و شاهد به طور مساوی (۰/۳۲٪) به دست آمد (جدول ۱).

همان‌گونه که گفته شد، در این پژوهش کربن و نیتروژن کل خاک به ترتیب افزایشی برابر ۲۷/۷ و ۲۵/۷ درصد را در خاک روئین منطقه سوخته‌شده نسبت به خاک شاهد از خود نشان دادند. همچنین میزان نیتروژن کل خاک روندی همانند کربن آلی خاک نشان داد. از آنجا که بیشتر نیتروژن خاک به شکل آلی است، می‌توان این یافته‌ها را با اندازه ماده آلی منطقه سوخته و شاهد در دو عمق مورد بررسی وابسته دانست. در تأیید مطلب یادشده در این پژوهش رابطه خطی پیرسون بین نیتروژن کل و میزان کربن آلی کل ۰/۷۴ به دست آمد، که این رابطه در پایه آماری ۰/۰۱ معنادار بود. گزارش‌های زیادی در هماهنگی با نتایج این پژوهش وجود دارد. Zabowski *et al.* (2007) گزارش کردند آتش‌سوزی بهاره، طی دو سال، در جنگل‌های ملی مالهور<sup>۲</sup> واقع در امریکا افزایشی برابر ۱۹/۶ و ۱۰ درصد، به ترتیب برای کربن و نیتروژن آلی کل در افق روئین خاک، ایجاد کرد. همچنین Oluwole *et al.* (2008) طی بیست‌وپنج سال آتش‌سوزی متوالی در مراتع افریقای جنوبی افزایشی برابر ۱۵/۸ و ۵۴/۸ درصد را، به ترتیب، در کربن و نیتروژن کل خاک مشاهده کردند. این محققان اعلام کردند نیتروژن و کربن روندی مشابه نشان دادند. همچنین Zhao *et al.* (2012) افزایشی برابر ۳۸/۱ درصد برای دو سال آتش‌سوزی پی‌درپی بهاره و افزایشی برابر ۱۹/۰ درصد برای دو سال آتش‌سوزی پی‌درپی پاییزه را برای کربن آلی کل خاک در دشت سانجیانگ<sup>۳</sup> واقع در شمال شرقی چین گزارش کردند. محققان زیادی دلایل افزایش کربن و نیتروژن کل خاک را پس از آتش‌سوزی چنین اعلام کردند که اگرچه در اثر آتش‌سوزی کربن آلی خاک کاهش می‌یابد، به دلایلی مانند اضافه شدن پس‌مانده‌های گیاهی نیمه‌سوخته و ریشه‌های مرده ناشی از درختان با تاج بلند و همچنین گیاهان کف جنگل پس از

همه کربنات‌ها و مواد قلیایی خاک را شامل می‌شود؛ که به وسیله اسید خنثی و بر حسب درصد و معادل کربنات کلسیم بیان می‌شوند. در این پژوهش میزان TNV در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متر در منطقه سوخته‌شده و شاهد به ترتیب ۱۱/۷ و ۲/۲ درصد به دست آمد. همچنین میزان این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده به میزان ۸/۸ درصد و در منطقه شاهد به میزان ۰/۲۵ درصد به دست آمد (جدول ۱). این نتایج نشان می‌دهد میزان TNV در هر دو عمق بررسی‌شده در خاک سوخته‌شده در مقایسه با شاهد، طی سه سال آتش‌سوزی متوالی، افزایش شایان توجهی یافته است و این افزایش در پایه آماری ۵ درصد در هر دو عمق خاک بررسی‌شده معنادار بود.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند در عرصه‌های سوخته در اثر رها شدن یون‌های ناشی از سوختن مواد آلی و همچنین تولید و تمرکز اکسیدها، هیدروکسیدها، و کربنات‌های فلزات قلیایی و قلیایی-خاکی از جمله پتاسیم، سدیم، کلسیم، و منیزیم ناشی از سوختن مواد آلی میزان شوری و مواد قلیازا در خاک افزایش می‌یابد (Ulery *et al.*, 1993; Certini, 2005; Iglesias, 2010). افزایش pH و EC خاک در اثر ترکیبات یادشده حاصل از آتش‌سوزی ممکن است طی یک فصل مرطوب در اثر شسته شدن خاکستر به وسیله رواناب حاصل از بارندگی از بین برود (Naidu and Srivasuki, 1994; Hernandez *et al.*, 1997; Certini, 2005). اما گزارش‌هایی نیز وجود دارد که افزایش pH و EC خاک در اثر ترکیبات حاصل از آتش‌سوزی می‌تواند به گونه دوام‌دار، حتی پس از گذشت چندین سال، در خاک باقی بماند (Heidary and Ghorbani Dashtaki, 2013). بنابراین در این پژوهش آثار باقی‌مانده دو سال آتش‌سوزی گذشته و سال جاری، که در زمان نمونه‌برداری بارندگی رخ نداده بود، می‌تواند میزان افزایش pH، TNV، و EC به‌دست‌آمده در عرصه سوخته‌شده را نسبت به شاهد روشن کند. افزون بر موارد یادشده Iglesias (2010) گزارش کرد تکرار دوباره آتش‌سوزی در جنگل‌های مونته‌پلیر<sup>۱</sup> در جنوب فرانسه سبب افزایش ۴۱/۳ و ۱۱/۳ درصدی TNV به ترتیب در عمق ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در خاک سوخته‌شده نسبت به شاهد شده است.

#### کربن آلی و نیتروژن کل

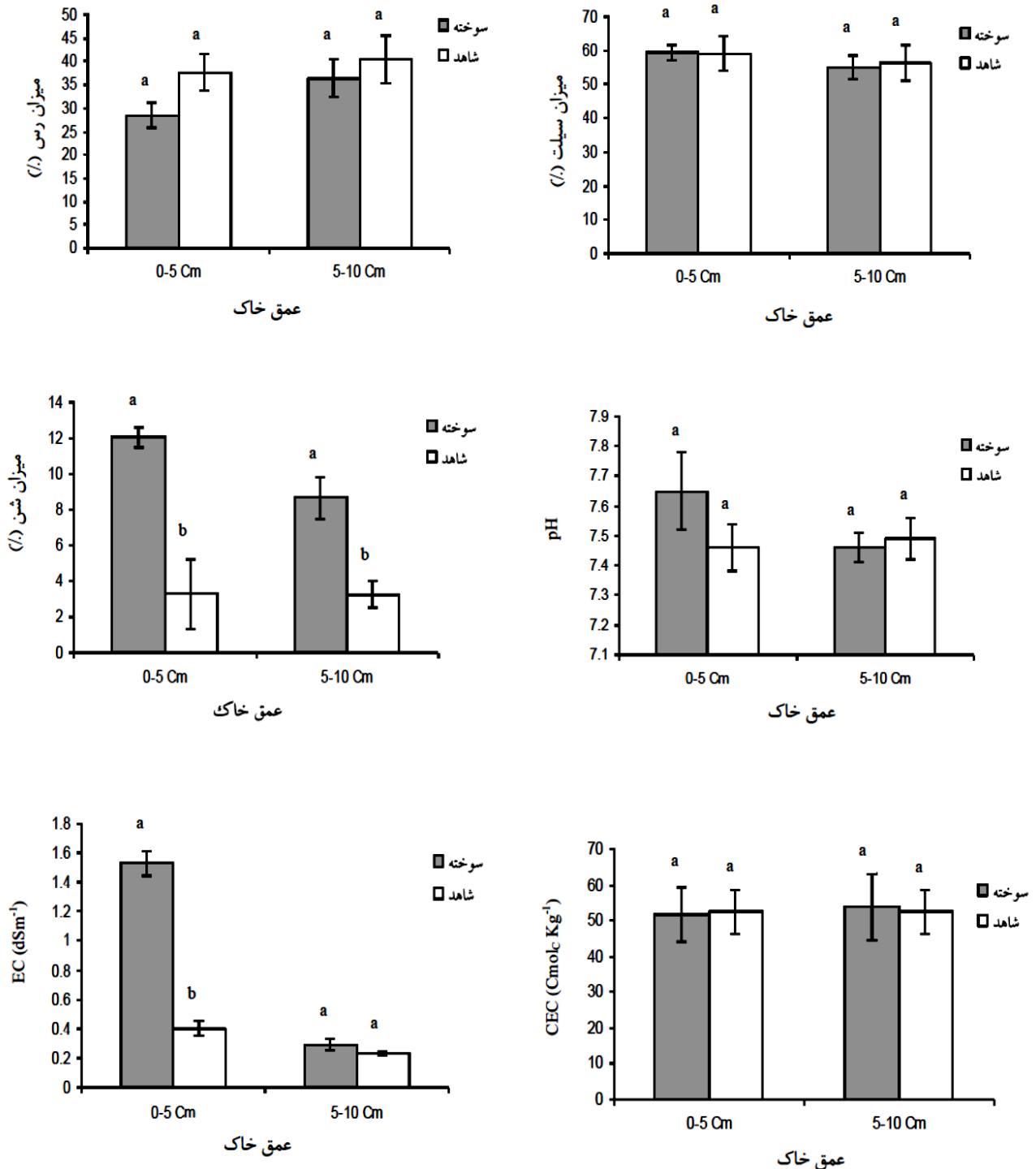
نتایج این پژوهش نشان داد میزان کربن آلی در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در خاک سوخته‌شده (۰/۶۹٪) در مقایسه با شاهد (۰/۵۴٪) افزایش یافته است. اما این میزان افزایش از نظر آماری معنادار نیست ( $P < 0.05$ )؛ در حالی که میزان کربن آلی در عمق

2. Malheur  
3. Sanjiang

1. Montpellier

Fynn *et al.* (2011 b). اما یافته‌های این پژوهش با یافته‌های (2003)، که گزارش کردند آتش‌سوزی هر ساله خاک سبب کاهش ماده آلی خاک نسبت به شاهد می‌شود، هماهنگ نیست.

آتش‌سوزی به خاک و همچنین سوختن لایه آلی (افق O) سطح خاک و در نهایت تلفیق همه آن‌ها با افق معدنی سطحی خاک، پس از آتش‌سوزی، کربن و نیتروژن کل خاک افزایش می‌یابد (Johnson and Curtis, 2001; Certini, 2005; Terefe *et al.*, 2008; Oluwole *et al.*, 2008; Granged *et al.*, 2011 a and



شکل ۲. میزان (میانگین ± خطای استاندارد) درصد رس، سیلت، شن، CEC، pH، و شوری در خاک سوخته‌شده و شاهد در دو عمق مختلف در منطقه بررسی شده (بر اساس آزمون t، در یک عمق خاص ستون‌هایی که حروف یکسان دارند در پایه آماری ۵ درصد اختلاف معناداری با هم ندارند).

جدول ۱. میزان (میانگین  $\pm$  خطای استاندارد) برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک سوخته شده و شاهد در دو عمق مختلف در منطقه بررسی شده\*

پارامتر	عمق خاک (cm)	تیمار	مقدار
کربن آلی (%)	۰-۵	سوخته	۶۹ $\pm$ ۰٫۶۵ a
		شاهد	۵۴ $\pm$ ۰٫۴۵ a
	۵-۱۰	سوخته	۵۰ $\pm$ ۰٫۳۸ a
		شاهد	۵۱ $\pm$ ۰٫۱۴ a
نیترژن کل (%)	۰-۵	سوخته	۰٫۴۴ $\pm$ ۰٫۰۴ a
		شاهد	۰٫۳۵ $\pm$ ۰٫۰۱ a
	۵-۱۰	سوخته	۰٫۳۲ $\pm$ ۰٫۰۴ a
		شاهد	۰٫۳۲ $\pm$ ۰٫۰۴ a
نیترژن نیتراتی (NO <sub>3</sub> -N) (ppm)	۰-۵	سوخته	۱۰٫۶ $\pm$ ۰٫۵ a
		شاهد	۶٫۹ $\pm$ ۰٫۶ b
	۵-۱۰	سوخته	۴٫۲ $\pm$ ۰٫۴ a
		شاهد	۴٫۹ $\pm$ ۰٫۵ a
نیترژن آمونیومی (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N) (ppm)	۰-۵	سوخته	۱۳۷٫۷ $\pm$ ۱۳٫۰ a
		شاهد	۲۰٫۵ $\pm$ ۲٫۰ b
	۵-۱۰	سوخته	۲۰٫۴ $\pm$ ۴٫۸ a
		شاهد	۸٫۳ $\pm$ ۰٫۶ a
فسفر قابل دسترس (ppm)	۰-۵	سوخته	۳۶٫۳ $\pm$ ۲٫۶ a
		شاهد	۲۶٫۶ $\pm$ ۲٫۰ b
	۵-۱۰	سوخته	۳۱٫۰ $\pm$ ۵٫۸ a
		شاهد	۲۰٫۸ $\pm$ ۴٫۱ a
پتاسیم قابل دسترس (ppm)	۰-۵	سوخته	۱۳۱۶٫۹ $\pm$ ۱۵۵٫۷ a
		شاهد	۷۰۳٫۰ $\pm$ ۱۰۷٫۱ b
	۵-۱۰	سوخته	۶۲۳٫۳ $\pm$ ۵۴٫۷ a
		شاهد	۴۹۰٫۵ $\pm$ ۸۷٫۳ a
کلسیم قابل دسترس (ppm)	۰-۵	سوخته	۴۹۸۶٫۷ $\pm$ ۲۵۴٫۷ a
		شاهد	۳۰۶۶٫۷ $\pm$ ۷۰٫۵ b
	۵-۱۰	سوخته	۳۲۸۰٫۰ $\pm$ ۴۶٫۲ a
		شاهد	۲۷۴۶٫۷ $\pm$ ۲۶۷ b
منیزیم قابل دسترس (ppm)	۰-۵	سوخته	۱۴۴٫۰ $\pm$ ۲۷٫۷ a
		شاهد	۸۰٫۰ $\pm$ ۱۶٫۰ a
	۵-۱۰	سوخته	۱۷۶٫۰ $\pm$ ۱۶٫۰ a
		شاهد	۱۶۸٫۰ $\pm$ ۲۴٫۰ a
کربنات کلسیم معادل (TNV) (%)	۰-۵	سوخته	۱۱٫۷ $\pm$ ۱٫۹ a
		شاهد	۲٫۲ $\pm$ ۰٫۴ b
	۵-۱۰	سوخته	۸٫۸ $\pm$ ۳٫۲ a
		شاهد	۰٫۲۵ $\pm$ ۲٫۰ b

\* بر اساس آزمون t، در هر ردیف (عمق) اعداد با حروف یکسان در پایه آماری ۵ درصد اختلاف معناداری با هم ندارند.

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)  $54.0 \text{ Kg}^{-1}$  و در منطقه شاهد  $52.5 \text{ Cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  به دست آمد (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد تفاوت چشمگیری در هر دو عمق بررسی شده بین منطقه سوخته شده و شاهد در رابطه با CEC وجود ندارد ( $P < 0.05$ ). این مسئله به خوبی شناخته شده است که میزان رس، ماده آلی، و هیدروکسیدهای فلزات به ویژه

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) نتایج این پژوهش نشان داد میزان CEC در عمق ۰ تا ۵ سانتی متری در منطقه سوخته شده و شاهد به ترتیب  $51.8$  و  $52.4 \text{ Cmol}_c \text{ Kg}^{-1}$  به دست آمد. همچنین میزان این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی متری در منطقه سوخته شده  $\text{Cmol}_c$

اثر آتش‌سوزی بر افزایش میزان پتاسیم قابل دسترس در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۱۳۱۶/۹ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۷۰۳/۰ ppm) بسیار معنادار بود ( $P < 0.05$ ). در حالی که هرچند این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۶۲۳/۳ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۴۹۰/۵ ppm) افزایش یافته بود، این افزایش از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ ) (جدول ۱).

در روندی مشابه با نیتروژن و پتاسیم قابل دسترس، میزان فسفر قابل دسترس نیز در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده نسبت به منطقه شاهد افزایش معناداری نشان داد ( $P < 0.05$ ); طوری که میزان این پارامتر در عمق یادشده در منطقه سوخته‌شده ۳۶/۳ ppm و در منطقه شاهد ۲۶/۶ ppm به دست آمد. همچنین میزان این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۳۱/۰ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۲۰/۸ ppm) افزایش یافته بود. اما این افزایش از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ ) (جدول ۱).

همچنین در این پژوهش اثر آتش‌سوزی بر افزایش میزان کلسیم قابل دسترس در هر دو عمق بررسی‌شده بسیار معنادار بود ( $P < 0.05$ ); طوری که میزان این پارامتر در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده و شاهد به ترتیب ۴۹۸۶/۷ و ۳۰۶۶/۷ ppm به دست آمد. همچنین در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده ۳۲۸۰/۰ ppm و در منطقه شاهد ۲۷۴۶/۷ ppm به دست آمد (جدول ۱)، در حالی که هرچند میزان منیزیم قابل دسترس در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۱۴۴/۰ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۸۰/۰ ppm) افزایش یافته بود، این افزایش از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ ) (جدول ۱). اما منیزیم قابل دسترس در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۱۷۶/۰ ppm) نسبت به شاهد (۱۶۸/۰ ppm) افزایش ناچیزی نشان داد (جدول ۱).

از نتایج یادشده می‌توان نتیجه گرفت میزان قابل دسترس عناصر پرمصرف اولیه گیاه یعنی نیتروژن، فسفر، و پتاسیم و پرمصرف ثانویه گیاه یعنی کلسیم و منیزیم پس از آتش‌سوزی به‌ویژه در خاک روئین به طور چشمگیر افزایش می‌یابد. صرف‌نظر از چگونگی تغییرات عناصر غذایی خاک در طول زمان، پس از آتش‌سوزی، پژوهش‌ها نشان می‌دهند به طور عموم پس از آتش‌سوزی میزان کل عناصر غذایی خاک کاهش می‌یابد، اما میزان قابل دسترس عناصر بیشتر می‌شود (Certini, 2005; Kutiel and Naveh, 1987; Marcos et al., 2007). در هماهنگی با این پژوهش Zabowski و همکاران (2007) گزارش کردند میزان نیتروژن و فسفر قابل دسترس خاک طی دو سال

آهن و آلومینیوم از عوامل اصلی در به وجود آمدن بارهای ثابت و بارهای وابسته به pH در میزان کل CEC خاک‌اند (Bohn et al., 1985). در هماهنگی با مطلب یادشده در این پژوهش رابطه خطی پیرسون بین CEC و میزان رس و کربن آلی به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۵۰ به دست آمد؛ که به ترتیب در پایه آماری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ معنادار بود. گزارش‌های بسیاری وجود دارد که در اثر آتش‌سوزی از میزان آهن قابل دسترس خاک، به دلیل تبدیل به هیدروکسیدهای آهن، کاسته می‌شود (Khanna and Raison, 1986; Brye et al., 2002; Garcia-Marcoand and Gonzalez-Prieto, 2008; Yusiharni and Gilkes, 2010). گزارش‌هایی در دست است که کربن سیاه (Liang et al., 2006) و چرکول (Zabowski et al., 2007)، که پس از آتش‌سوزی به خاک اضافه می‌شوند، CEC خاک را افزایش می‌دهند. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، هنگام نمونه‌برداری کربن سیاه به‌وضوح در سطح منطقه دیده می‌شد. بنابراین، به نظر می‌رسد میزان افزایش pH، ماده آلی، کربن سیاه، چرکول، و هیدروکسیدهای فلزات در منطقه سوخته‌شده کاهش CEC ناشی از کاهش رس را جبران کرده و میزان CEC در هر دو عمق بررسی‌شده خاک سوخته‌شده و شاهد با هم برابر شده باشند. افزون بر آنچه یاد شد، Coultts (1945) گزارش کرد اثر آتش‌سوزی بر CEC خاک بسیار ناچیز و گذراست. همچنین Zabowski و همکاران (2007) طی دو سال آتش‌سوزی متوالی پاییزه میزان CEC را در خاک سوخته‌شده بدون تغییر و مساوی با شاهد به دست آوردند.

#### نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، و منیزیم قابل دسترس

اثر آتش‌سوزی بر افزایش میزان نیتروژن قابل دسترس در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده نسبت به منطقه شاهد بسیار چشمگیر بود ( $P < 0.05$ ); طوری که میزان آمونیاک ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) در عمق یادشده در منطقه سوخته‌شده ۱۳۷/۷ ppm و در منطقه شاهد ۲۰/۵ ppm به دست آمد. در حالی که هرچند میزان آمونیاک در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۲۰/۴ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۸/۳ ppm) افزایش یافته بود، این افزایش از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ ) (جدول ۱). در روندی مشابه با آمونیاک، میزان نترات ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ) در عمق ۰ تا ۵ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۱۰/۶ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۶/۹ ppm) افزایش معناداری نشان داد ( $P < 0.05$ ). در حالی که میزان این پارامتر در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری در منطقه سوخته‌شده (۴/۲ ppm) نسبت به منطقه شاهد (۴/۹ ppm) کاهش ناچیزی نشان داد، که از نظر آماری معنادار نبود ( $P < 0.05$ ) (جدول ۱).



خاک طی سه سال آتش‌سوزی باشد. از این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت آتش‌سوزی به دلیل بازگرداندن مواد آلی ناشی از افتادن اندام‌های هوایی گیاهان سوخته شده سبب افزایش ماده آلی خاک می‌شود. از طرف دیگر، سوختن مواد آلی سبب رهاسازی عناصر و افزایش غنای عناصر معدنی قابل دسترس خاک می‌شود. بنابراین، به نظر می‌رسد آتش‌سوزی حاصلخیزی خاک را بالا می‌برد. اما به دلایلی که در ادامه می‌آید هیچ‌گاه آتش‌سوزی برای جنگل، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، همچون ایران، توصیه نمی‌شود:

۱. از یک سو اثر افزایش حاصلخیزی خاک کوتاه‌مدت و گذراست. از سوی دیگر به نظر می‌رسد خاک جنگلی که به حالت پایدار (کلیماکس) خود رسیده است، از نظر حاصلخیزی، مشکلی نداشته باشد. همچنین افزایش ناگهانی قابلیت دسترسی عناصر در خاک ممکن است سبب برتری یافتن برخی گونه‌های گیاهی غیر بومی و ایجاد رقابت بر سر منابع رشد با گونه‌های بومی شود. نیز ممکن است این عناصر به آب‌های سطحی و زیرزمینی شسته شوند و آلودگی این آب‌ها و خطرهایی مانند غنی شدن آب‌ها از عناصر یادشده را در پی داشته باشد. زیرا وقوع این وضعیت در اثر افزایش فرسایش و آبدوی ناشی از آثار ثانویه آتش‌سوزی دور از انتظار نیست.

۲. بی‌حفاظ شدن خاک در اثر از بین رفتن پوشش گیاهی، گرفتگی منافذ خاک در اثر خاکستر، و در نهایت کاهش پایداری ساختمان خاک ناشی از آتش‌سوزی‌های پی‌درپی در درازمدت می‌تواند سبب افزایش آبدوی در سطح خاک جنگل و در معرض فرسایش قرار گرفتن آن شود.

۳. از بین رفتن جانداران خاک و محل زندگی آن‌ها و تغییر اکولوژی جنگل ناشی از آتش‌سوزی در درازمدت می‌تواند جنگل را با خطرهای فراوانی روبه‌رو کند. بنابراین، نویسندگان این مقاله پیشنهاد می‌کنند برای جلوگیری از تخریب بیشتر رویشگاه‌های طبیعی باید به پیش‌گیری از آتش‌هایی که منشأ انسانی دارند و خاموش کردن به‌موقع آن بیشتر توجه شود. آموزش علوم سلامت محیط و بالا بردن آگاهی عمومی در این زمینه بسیار مهم است.

## REFERENCES

- Bohn, H. L., McNeal, B. L. and O'Connor, G. A. (1985). *Soil chemistry*. Wiley Interscience, New York.
- Botha, C. R. and Webb, M. M. (1952). The versenate method for the determination of calcium and magnesium in mineralized waters containing large concentrations of interfering ions: *Institute of Water Engineers Journal*: 6.

آتش‌سوزی متوالی پاییزه به طور چشمگیر در مقایسه با شاهد افزایش می‌یابد. همچنین Oluwole و همکاران (2008) طی بیست‌وپنج سال آتش‌سوزی متوالی در مراتع افریقای جنوبی برای فسفر و کلسیم و منیزیم قابل دسترس به ترتیب افزایشی برابر ۱۷/۱ و ۲۹/۰ و ۱۰۹/۱ درصدی در مناطق سوخته نسبت به شاهد گزارش کردند. این پژوهندگان علت افزایش فسفر قابل دسترس خاک را، پس از آتش‌سوزی، برگشت فسفر ناشی از سوختن مواد آلی و علت ماندن آن را تحرک کم فسفر در خاک اعلام کردند. اما اینکه این محققان میزان پتاسیم قابل دسترس را در منطقه سوخته شده پس از بیست‌وپنج سال آتش‌سوزی متوالی کمتر از شاهد (به میزان ۹/۸٪) به دست آوردند با نتایج این پژوهش هماهنگی ندارد. در هماهنگی با این پژوهش Chansuk (1990) طی پنج سال آتش‌سوزی متوالی در خاک‌های جنگلی دیپتروکراپ واقع در فیلیپین در رابطه با فسفر، پتاسیم، کلسیم، و منیزیم به ترتیب افزایشی برابر ۵۳/۸، ۴۱/۶، ۱۲۰، و ۱۲۸/۱ درصد در خاک سوخته شده نسبت به شاهد گزارش کرد. همچنین Suzanne و همکاران (2008) اعلام کردند تکرار چهار بار آتش‌سوزی، یک سال در میان، سبب افزایش کربن آلی کل (۳٪)، فسفر قابل دسترس (۳۸٪)، نیتروژن کل (۸٪)، آمونیوم (۱۵۸٪)، و نترات (۳۴۸/۱٪) در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک سوخته شده در مقایسه با شاهد شده است.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد اثر سه سال آتش‌سوزی پی‌درپی بر ویژگی‌های مورد بررسی خاک به‌ویژه افزایش میزان شوری و کربنات کلسیم معادل و همچنین میزان قابل دسترس نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم، و منیزیم قابل مشاهده است. اثر آتش‌سوزی در لایه سطحی به دلیل شدت و تماس بیشتر آتش‌سوزی در این لایه نسبت به لایه زیرسطحی بیشتر بود. دلیل این وضعیت می‌تواند عمق نفوذ متفاوت گرما در این دو لایه باشد. اما گاه علت افزایش پارامترهای مورد بررسی در خاک عمقی عرصه سوخته شده در مقایسه با شاهد می‌تواند ناشی از آب‌شویی عناصر و سایر مواد ناشی از سوختگی به عمق پایین‌تر

- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 56, 464-465.
- Bremner, J. M. and Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen total. In: Page, A. L. et al. *Method of soil analysis*. Part 2. American Society of Agronomy Inc Madison, Wisconsin USA., Pp. 595-624.

- Bremner, J. M. and Keeney D. R. (1965). Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Analytica Chimica Acta*, 32, 485-495.
- Brye, K. R. (2006). Soil physiochemical changes following 12 years of annual burning in a humid-subtropical tallgrass prairie: A hypothesis. *Acta Oecologica*, 30, 407-413.
- Brye, K. R., Norman, J. M., and Gower, S. T. (2002). The fate of nutrients following three and six-year burn intervals in restored tallgrass prairie in Wisconsin. *American Middle Nature*, 148, 28-42.
- Cerda, A., Imeson, A. C., and Calvo, A. (1995). Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, and southeast Spain. *Catena*, 24, 289-304.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143 (1), 1-10.
- Chansuk U. (1990). Effects of fire frequencies on soil properties in dry dipterocarp forest at Sakaerat, Changwat Nakhonratchasima. Thesis. Kasetsart University.
- Coults, J. R. H. (1945). Effects of veld burning on base exchanging capacity of soils. *South African Journal of Science*, 41, 218-224.
- Doerr, S. H. and Cerda, A. (2005). Fire effects on soil system functioning: new insights and future challenges. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 339-342.
- Erickson, H. E. and White R. (2008). Soils under fire: Soils Research and the Joint Fire Science Program. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- Fynn, R. W. S., Haynes, R. J., and O'Connor, T. G. (2003). Burning causes long-term changes in soil organic matter content of a South African grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(5), 677-687.
- Garcia-Marco, S. and Gonzalez-Prieto, S. (2008). Short- and medium-term effects of fire and fire-fighting chemicals on soil micronutrient availability. *Science of Total Environment*, 407, 297-303.
- Granged, A. J. P., Jordán A., Zavala, L. M., Muñoz-Rojas, M., and Mataix-Solera, J. (2011b). Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia). *Geoderma*, 167-168, 125-134.
- Granged, A. J. P., Zavala, L. M., Antonio, J., and Bárcenas-Moreno, G. (2011a). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, 164, 85-94.
- Greene, R. S. B., Chartres, C. J., and Hodgkinson K. C. (1990). The Effects of Fire on the Soil in a Degraded Semi-arid Woodland. I. Cryptogam Cover and Physical and Micromorphological Properties. *Australian Journal of Soil Research*, 28, 755-77.
- Heidary, J. and Ghorbani Dashtaki, Sh. (2013). The effect of fire on soil quality in semi-steppe rangelands of Karsanak, Chaharmahal and Bakhtiari. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20 (2). (In Farsi).
- Hernandez, T., Garcia, C., and Reinhardt, I. (1997). Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology Fertile Soils*, 25 (1), 109-116.
- Hubbert, K. R., Preisler, H. K., Wohlgemuth, P. M., Graham, R. G., and Narog, M. G. (2006). Prescribed burning effects on soil physical properties and water repellency in a steep chaparral watershed, Southern California, USA. *Geoderma*, 130, 284-298.
- Iglesias, M. T. (2010). Effects of fire frequency on nutrient levels in soils of Aleppo pine forests in southern France. *Lazarus*, 31, 147-152.
- Johnson, W. J. and Curtis, P. S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage: Meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140 (2,3), 227-238.
- Ketterings, Q. M. and Bigham, J. M. (2000). Soil color as an indicator of slash-and-burn fire severity and soil fertility in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1826-1833.
- Khanna, P. K. and Raison, R. J. (1986). Effect of fire intensity on solution chemistry of surface soil under a Eucalyptus pauciflora forest. *Australian Journal of Soil Research*, 24, 423-34.
- Kutiel, P. and Naveh, Z. (1987). The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil*, 104, 269-274.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizao, F. J., Petersen, J., and Neves, E. G. (2006). Blackcarbon increases cation exchange capacity insoils. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1719-1730.
- Loeppert, R. H. and Sparks, D. L. (1996). Carbonate and gypsum, P 437-475. In: Sparks, D. L. (Ed.), *Methods of soil analysis*, Part 3, chemical method, SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Marcos, E., Tarrega, R., and Luis, E. (2007). Changes in a Humic Cambisol heated (100-500 °C) under laboratory conditions: The significance of heating time. *Geoderma*, 138, 237-243.
- Murphy, J. and Riley J. P. A. (1962). Modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- Naidu, C. V. and Srivasuki, K. P. (1994). Effect of forest fire on soil characteristics in different areas of Seshachalam hills. *Annals of Forestry*, 2 (1), 166-173.
- Nardoto, G. B. and da Cunha Bustamante, M. M. (2003). Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in savannas of Central

- Brazil. *Pesquisa Agropecuária dos Brasil, Brasilia*, 38 (8), 955-962.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., and DeBano, L. F. (2005). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station 4. 250 p
- Nelson, D. W. and Sommers L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods; Sparks, D.L., (ed), SSSA Book Series No. 5; Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin, 961-1010.
- Oluwole, F. A., Sambo J. M., and Sikhalazo D. (2008). Long-term effects of different burning frequencies on the dry savannah grassland in South Africa. *African Journal of Agricultural Research*, 3 (2), 147-153.
- Parlak, M. (2011). Effect of heating on some physical, chemical and mineralogical aspects of forest soil. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19, 143-152.
- Riddell, E. S., Khan, A., Mauck, B., Ngcobo, S., Pasi, J., and Pickles, A. (2012). Preliminary assessment of the impact of long-term fire treatments on in situ soil hydrology in the Kruger National Park. *Koedoe*, 54(1), Art. #1070, 7 pages. From <http://dx.doi.org/10.4102/koedoe.v54i1.1070>.
- Rowell, D. L. (1994). *Soil Science: Methods and Applications*, 345. Longman Group, Harlow.
- Suzanne, M., Prober, A. D., Ian, D., Lunt, B., Kevin, R., and Thiele, C. (2008). Effects of fire frequency and mowing on a temperate, derived grassland soil in south-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 17, 586-594.
- Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F., and Espejo, R. (2008). Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils: A laboratory study. *Geoderma*, 143, 273-280.
- Thornley, J. H. M. and Cannell, M. G. R. (2004). Long-term effects of fire frequency on carbon storage and productivity of boreal forests: a modeling study. *Tree Physiology*, 24, 765-773.
- Ulery, A. L., Graham, R. C., and Amrhein, C. (1993). Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil Science*, 156 (1), 358-364.
- Verma, S. and 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), 168-176.
- Yusiharni, E. and Gilkes, R. J. (2010). Soil minerals recover after they are damaged by bushfires. In *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, August 1-6 2010, Brisbane, Australia, from <http://www.iuss.org>.
- Zabowski, D., Thies, W. G., Hatten, J., and Ogden, A. (2007). *Soil Response to Season and Interval of Prescribed Fire in a Ponderosa Pine Forest of the Blue Mountains, Oregon*. JFSP Research Project Reports. Paper 120.
- Zhao, H., Tong, D.Q., Lin, Q., Lu, X., and Wang, G. (2012). Effect of fires on soil organic carbon pool and mineralization in a Northeastern China wetland. *Geoderma*, 189-190, 532-539.