

مقایسه برخی شاخص‌های فیزیکی-شیمیایی و میکروبی خاک در سال‌های پس از آتش سوزی در جنگل‌های زاگرس شهرستان پاوه

مصطفی صادقی فر، علی بهشتی آل آقا¹ و مرتضی پوررضا

دانش آموخته علوم و مهندسی خاک دانشگاه رازی؛ mostafa.sadeghi29@yahoo.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه رازی؛ Beheshti1969@yahoo.com

استادیار گروه منابع طبیعی دانشگاه رازی؛ pourreza@razi.ac.ir

دریافت: 95/8/21 و پذیرش: 96/7/12

چکیده

با افزایش فراوانی آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های زاگرس، بررسی کیفیت خاک در کوتاه و بلندمدت بسیار با اهمیت است. در این پژوهش تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و ویژگی‌های میکروبی در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت پس از آتش‌سوزی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور، در یک رویشگاه سه تیمار پساآتش‌سوزی با زمان‌های 1، 3 و 10 سال پس از آتش‌سوزی انتخاب و به ترتیب با $TSF=1$ ، $TSF=3$ و $TSF=10$ نشان داده شد. در نزدیک‌ترین نقطه به هر تیمار، یک شاهد نیز برای هر یک از تیمارها در نظر گرفته و به ترتیب با $C1$ ، $C3$ و $C10$ نشان داده شد. نمونه‌برداری از عمق 0 تا 20 سانتی‌متری انجام شد. در مجموع با در نظر گرفتن 3 تیمار پساآتش‌سوزی و 3 شاهد و هر کدام با 4 تکرار در مجموع تعداد 24 نمونه مرکب خاک برداشته شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و میکروبی خاک به منظور مقایسه تغییرات آنها در سال‌های پس از آتش‌سوزی اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که تغییر معنی‌داری در بافت خاک مشاهده نشد. رطوبت خاک در تیمار $TSF=1$ کاهش معنی‌داری یافت اما در تیمارهای $TSF=3$ و $TSF=10$ به سطح قبل از آتش‌سوزی برگشت. جرم مخصوص ظاهری در تیمارهای $TSF=1$ و $TSF=3$ کاهش یافت اما تیمار $TSF=10$ با $C1$ اختلاف معنی‌داری نداشت. pH ، CEC ، EC و P در تیمار $TSF=1$ افزایش معنی‌داری نسبت به $C1$ نشان داد. در تیمارهای $TSF=3$ و $TSF=10$ ، مقدار pH و CEC به سطح قبل از آتش‌سوزی برگشته اما EC و P خاک نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار داشتند. کربن آلی و نیتروژن کل در همه زمان‌های پس از آتش‌سوزی کاهش معنی‌دار داشت. نسبت $C:N$ خاک تغییر معنی‌داری نشان نداد. کربن زی توده میکروبی یک سال پس از آتش‌سوزی کاهش معنی‌داری نشان داد، اما در تیمار $TSF=3$ و $TSF=10$ اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشت. تنفس برانگیخته در تیمار $TSF=1$ به طور معنی‌داری افزایش یافت اما در تیمارهای $TSF=3$ و $TSF=10$ کاهش معنی‌دار داشت. تنفس پایه در تیمارهای $TSF=1$ ، $TSF=3$ و $TSF=10$ کاهش معنی‌داری نسبت به شاهدشان نشان دادند. کسر متابولیک در تیمارهای $TSF=1$ و $TSF=3$ افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان داد اما در تیمار $TSF=10$ به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت. کسر میکروبی در تیمار $TSF=1$ نسبت به شاهد کاهش یافت اما در تیمار $TSF=3$ افزایش در تیمار $TSF=10$ به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت. با توجه به نتایج آنالیز چند متغیره (تشخیصی) همه تیمارها از یکدیگر تفکیک شدند. گرچه جداسازی تیمارها بر اساس ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک نسبت به ویژگی‌های میکروبی خاک بهتر انجام شده بود. نتیجه‌گیری شد که در جداسازی تیمارها، مهم‌ترین متغیرهای فیزیکی-شیمیایی شامل هدایت الکتریکی، نیتروژن، ظرفیت تبادل کاتیونی و فسفر و مهم‌ترین متغیرهای میکروبی شامل کربن زی توده میکروبی، تنفس پایه و برانگیخته و کسر میکروبی بودند.

واژه‌های کلیدی: تنفس خاک، کربن زی توده میکروبی، کسر متابولیک

¹ نویسنده مسئول، آدرس: کرمانشاه، دانشگاه رازی، گروه علوم و مهندسی خاک

مقدمه

در دوره زندگی انسان خاک منبعی غیر قابل تجدید، محیطی پویا، مؤثر بر بارخیزی محصولات و از عوامل تعادل زیست محیطی می‌باشد (دوران و زایس، 2000). کیفیت خاک می‌تواند توسط عوامل مختلفی مختل شود. آتش‌سوزی از مهم‌ترین اتفاقاتی است که می‌تواند اختلالاتی را در اکوسیستم‌های جنگلی به بار آورد که به طور کلی اثرات پیچیده‌ای بر محیط خاک دارد (سردا و دوئر، 2005 و جیمز-گونزالس و همکاران، 2016). در جنگلداری نوین، آتش‌سوزی به دلیل اینکه پوشش گیاهی را از بین می‌برد و حاصل‌خیزی خاک را کاهش می‌دهد پدیده‌ای مخرب در نظر گرفته می‌شود (کارا و بولات، 2009). سالانه حدود $5/1 \times 10^8$ هکتار از جنگل‌های جهان در اثر آتش‌سوزی از بین می‌روند که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد (ژیانگ و همکاران، 2014). در دهه اخیر آتش‌سوزی جنگل‌ها از مهم‌ترین مخاطرات زیست محیطی در سراسر جهان بوده که بسته به شدت آتش‌سوزی، مشخص شده است که آتش‌سوزی تغییرات مهمی در خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک‌ها ایجاد می‌کند (دبانو و همکاران، 1998).

در اکوسیستم‌های مختلف مانند مراتع، بوت‌زارها و جنگل‌ها از شاخص‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک برای بررسی تغییرات به وجود آمده در خاک پس از آتش‌سوزی استفاده می‌شود (پوررضا و همکاران، 2014). اما بسیاری از پژوهشگران معتقدند شاخص‌های بیوشیمیایی و بیولوژیک در نشان دادن تغییرات به وجود آمده در خاک پس از آتش‌سوزی نسبت به شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی مناسب‌ترند، زیرا این شاخص‌ها به تغییرات محیطی حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. بنابراین برای ارزیابی تغییرات ایجاد شده در خاک پس از آتش‌سوزی اغلب از شاخص‌های میکروبی چون بیومس میکروبی، تنفس خاک، فعالیت‌های آنزیمی، تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) و کسر متابولیکی (qCO_2) استفاده می‌شود (مارتینز - سالگادو و همکاران، 2010).

مقدار، فراوانی و فعالیت میکروارگانیسم‌ها وجود عناصر غذایی و حاصل‌خیزی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (جنکینسون و لاد، 1981). میکروارگانیسم‌های خاک از مهم‌ترین عوامل مسئول برای فرآیندهای انتقال انرژی، چرخه عناصر غذایی و تجزیه لاشبرگ‌ها می‌باشند (ماریناری و همکاران، 2006). بیومس میکروبی که نشان‌دهنده مقدار جمعیت میکروبی خاک است، نقش‌های متعددی در خاک ایفا می‌کند و می‌تواند مستقیماً تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار بگیرد. پس از آتش‌سوزی،

نقش بیومس میکروبی در چرخه عناصر غذایی هنوز شناخته نشده است (ژیانگ و همکاران، 2014). در سطح خاک بیومس میکروبی ممکن است به طور کامل در اثر حرارت ناشی از آتش‌سوزی از بین برود. در طی آتش‌سوزی عناصر غذایی از بیومس میکروبی آزاد شده و به وسیله روان‌آب و فرسایش حمل می‌شوند به طوری که در آتش‌سوزی شدید ممکن است بیومس میکروبی خاک به طور کامل از بین رود (ودریک و همکاران، 2002).

تنفس خاک یا چرخه کربن که شامل جذب و آزادسازی کربن در خاک می‌باشد از مهم‌ترین و متداول‌ترین شاخص‌هایی است که به عنوان شاخص کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (بهشتی آل آقا و همکاران، 1390 و مونوز- روجاس و همکاران، 2016).

تنفس خاک از موجودات ریزوسفر، تجزیه مواد آلی و فعالیت ریشه‌ها منشأ می‌گیرد (لو و ژو، 2010). این فرآیند ژئوبوشیمیایی به طور نزدیکی با حاصل‌خیزی خاک در ارتباط است و منعکس‌کننده سطح فعالیت‌های میکروبی می‌باشد و توانایی خاک را برای حمایت از رشد گیاهان نشان می‌دهد (ری و همکاران، 2011). تنفس خاک دومین جریان بزرگ کربن در اکوسیستم‌های جنگلی به شمار می‌رود و تغییرات ایجاد شده در آن به وسیله عوامل مختلف از جمله آتش‌سوزی قابل چشم‌پوشی نیست (مونوز- روجاس و همکاران، 2016). بسیاری از پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که آتش‌سوزی اثرات منفی مهمی بر تنفس خاک با از بین بردن میکروارگانیسم‌ها یا کاهش فعالیت آن‌ها دارد (کیویو و همکاران، 2009).

در طی دهه اخیر، تعداد و وسعت آتش‌سوزی در اکوسیستم جنگل‌های زاگرس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. آتش‌سوزی در این مناطق ممکن است به صورت طبیعی یا مصنوعی ایجاد شود که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد. جنگل‌های زاگرس از مهم‌ترین رویشگاه‌های بلوط در ایران به شمار می‌روند که آمارها نشان می‌دهد در دهه اخیر تعداد آتش‌سوزی در این جنگل‌ها افزایش داشته است (پوررضا و همکاران، 2014).

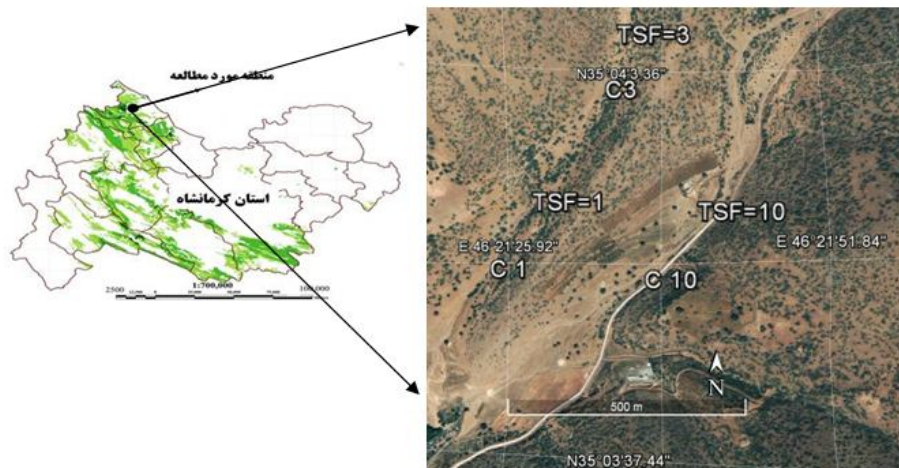
به دلیل داشتن تاج گسترده در درختان این جنگل‌ها نوع آتش‌سوزی در آن‌ها سطحی می‌باشد. ولی ناهمگنی پراکنش مواد سوختنی در کف جنگل می‌تواند منجر به آتش‌سوزی‌های مختلف شود (پوررضا و همکاران، 2014). بنابراین در این جنگل‌ها در زمان آتش‌سوزی، خاک سطحی مستقیماً در معرض گرمای آتش‌سوزی بوده و بسته به شدت آتش‌سوزی برخی ویژگی‌های آن می‌تواند دگرگون شود. هدف از این پژوهش پاسخ به پرسش‌های زیر است: 1- در سال‌های پس از آتش-

درجه، 21 دقیقه، 21 ثانیه و عرض‌های جغرافیایی 35 درجه، 04 دقیقه، 09 ثانیه و 35 درجه، 03 دقیقه، 45 ثانیه قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا به طور متوسط 1560 متر می‌باشد (شکل 1). آب و هوای منطقه مورد پژوهش معتدله سرد و میانگین سالانه بارندگی 674 میلی‌متر و میانگین سالانه دما 12/5 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. خاک این منطقه از نظر رده بندی خاک در دو گروه بزرگ Typic Xerorthent و Lithic Xerorthent جای می‌گیرد. مهم‌ترین گونه گیاهی این منطقه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) می‌باشد که به دلیل دخالت و تخریب به فرم رویشی شاخه‌زاد دیده می‌شوند. شایان ذکر است که توانایی جست‌دهی این گونه بعد از قطع درختان و یا تنش آتش‌سوزی، باعث تغییر فرم رویشی این درختان به صورت شاخه‌زاد شده است و هر درخت به جای یک ساقه واحد، شامل جست‌های فراوانی بر روی یک کنده است که اصطلاحاً جست‌گروه گفته می‌شود (فتاحی، 2000). تراکم درختان در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین 182 جست‌گروه در هکتار می‌باشد.

سوزی روند بهبود ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک سریعتر است یا ویژگی‌های بیولوژیک خاک؟ 2- آیا ویژگی‌های بیولوژیک در مقایسه با ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی، شاخص مناسب‌تری برای بررسی تغییرات خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی هستند؟ 3- کدامیک از ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیک خاک سهم مهمتری در بیان تغییرات در خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی را دارند؟ با پاسخ‌دهی به این سه پرسش عمده، در گام اول می‌توان روند بهبودی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیک خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی را تعیین و سپس مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیک خاک را در پاسخ به آتش- سوزی شناسایی نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های شاخه زاد بلوط زاگرس، واقع در شهرستان پاوه در استان- کرمانشاه بود که از نظر مختصات جغرافیایی در محدوده طول‌های جغرافیایی 46° درجه، 22 دقیقه، 03 ثانیه و 46



شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان کرمانشاه و تیمارهای آتش‌سوزی (TSF=1, TSF=3, TSF=10) به همراه شاهد‌ها (C1, C3, C10)

شرایط توپوگرافی نیز تا حد امکان مشابه انتخاب شدند (شیب و جهت اصلی جغرافیایی نسبتاً یکسان). لازم به ذکر است که در این رویشگاه و در این مطالعه انجام مانورهای نظامی دلیل اصلی وقوع آتش‌سوزی بوده است. با توجه به اینکه به طور کلی جنگل‌های زاگرس دارای تاج پوشش باز هستند و درختان از هم فاصله نسبتاً زیاد دارند آتش‌سوزی از طریق تاج درختان گسترش نمی‌یابد، بلکه از طریق پوشش علفی سطحی گسترش پیدا می‌کند. از آنجا که شدت آتش‌سوزی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار

به منظور ارزیابی و مقایسه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیک خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی در منطقه مورد نظر (شکل 1) سه مکان به نحوی انتخاب شدند که زمان پس از آتش‌سوزی (Time Since Fire) آن‌ها متفاوت بود و شامل 1، 3 و 10 سال پس از آتش‌سوزی می‌شد. این سه مکان مشخص شده در نزدیکی یکدیگر قرار داشته و دارای فاصله یک کیلومتری از یکدیگر بودند و هر سه مکان از نظر بافت خاک و پوشش گیاهی منطقه یکسان بودند و همچنین از نظر

همچنین در هر منطقه نمونه‌های دست‌نخورده به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه برداشت گردید. نمونه‌ها به صورت کاملاً تصادفی و از عمق 0-20 سانتی‌متری خاک برداشته شدند. نمونه‌ها پس از ورود به آزمایشگاه از الک دو میلی‌متری برای آزمایشات فیزیکی و شیمیایی و الک چهار میلی‌متری برای آزمایشات بیولوژیک عبور داده شدند تا بقایای گیاهی حذف گردد.

پس از آماده‌سازی خاک برای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، هدایت الکتریکی خاک (EC) و pH با استفاده از دستگاه کندانکتومتر و دستگاه pH متر در آب مقطر اندازه‌گیری شدند (به ترتیب با نسبت خاک به آب 1:5 و 1:2/5) (مکلین، 1982). رطوبت اشباع خاک با آون خشک‌کردن نمونه‌های خاک به مدت 24 ساعت اندازه‌گیری شد. کربن آلی خاک (OC) به روش والکی-بلاک (1934)، بافت خاک به روش هیدرومتری (بایکاس، 1962) و فسفر خاک به روش واتانابه و اولسن (1965) تعیین گردید. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز با روش توصیف شده توسط ریمنت و لیونز (2011) اندازه‌گیری شد. نیتروژن خاک با روش کج‌لدال (برمنر، 1996) و جرم مخصوص ظاهری نیز بر طبق روش پیشنهاد شده توسط راولز (1983) اندازه‌گیری گردید. همچنین پس از آماده‌سازی خاک برای آزمایشات بیولوژیک، تنفس پایه (BR) و تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) به ترتیب از طریق به دام انداختن و اندازه‌گیری CO₂ در طی یک دوره هفت روزه و شش ساعته تعیین شدند (لف و نانپری، 1995). کربن بیومس میکروبی (MBC) با روش انکوباسیون-تدخین اندازه‌گیری شد (هوروات و پل، 1994). کسر متابولیکی (qCO₂) نیز با روش توصیف شده توسط سومان و همکاران (2006) اندازه‌گیری شد. تمامی آزمایشات در دو تکرار انجام شدند.

ابتدا نرمال بودن داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. همگن بودن واریانس تیمارها با استفاده از آزمون لون (Levene's test) در سطح 5% و 1% مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اختلاف ویژگی‌های مورد بررسی بین تیمارهای مختلف آتش‌سوزی و شاهد‌ها از تجزیه واریانس یکطرفه و سپس آزمون توکی در سطح احتمال 5 درصد استفاده شد. به منظور جداسازی گروه‌ها و یافتن مهم‌ترین ترکیب خطی از بین متغیرهای اندازه‌گیری شده در جداسازی گروه‌ها، از آنالیز تشخیصی (Discriminant analysis) استفاده شد. این آنالیز برای شاخص‌های فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیک به صورت جداگانه انجام شد تا قابلیت هر دسته از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک شامل فیزیکی-

بر دگرگونی خاک می‌باشد در این پژوهش سعی شد که همه تیمارهای آتش‌سوزی دارای سوختگی با شدت متوسط باشند. به منظور تعیین شدت آتش‌سوزی از شاخص‌های ارائه شده توسط پوررضا و همکاران (2014) استفاده شد که برای جنگل‌های شاخه‌زاد زاگرس مناسب است. با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، آتش‌سوزی با شدت کم مربوط به پوشش علفی کف جنگل (نیری و همکاران، 2005) و آتش‌سوزی متوسط و شدید مربوط به میکروسایت اطراف و داخل جست‌گروه‌ها است که بار مواد آلی و سوختنی فراوان است (پوررضا و همکاران، 2014). یکی از شاخص‌های مهم برای جداسازی آتش-سوزی متوسط و شدید، در نظر گرفتن تعداد جست‌های از بین رفته است (پوررضا و همکاران، 2014). در آتش-سوزی شدید بیش از 90 درصد جست‌ها سوخته می‌شوند و از بین می‌روند در حالی که در آتش‌سوزی متوسط فقط جست‌های ریز از بین می‌روند. بنابراین با توجه به قطر جست‌ها و رویش قطری آن‌ها می‌توان با استفاده از این شاخص شدت آتش‌سوزی را حتی پس از 10 سال نیز تعیین نمود. برای این پژوهش زمان‌های پس از آتش-سوزی (Time Since Fire) به عنوان تیمارهای این پژوهش در نظر گرفته شد که شامل: TSF=1، TSF=3 و TSF=10 که به ترتیب مربوط به 1، 3 و 10 سال پس از آتش‌سوزی می‌شد. در هر یک از مکان‌های انتخاب شده همه جست‌گروه‌ها دچار سوختگی شده بودند.

بنابراین محدوده انتخاب شده بر اساس گستره آتش‌سوزی تعیین شد ولی شدت آتش‌سوزی در هر یک از آنها متفاوت بود. بدین معنی که در برخی از جست-گروه‌ها سوختگی کامل (سوختگی شدید) و در برخی دیگر به طور بخشی (شدت متوسط) مشاهده شد که برای همگن شدن در همه مکان‌های انتخاب شده، شدت آتش-سوزی متوسط در نظر گرفته شد. به عبارتی در داخل هر یک از مکان‌های انتخاب شده، شدت‌های مختلف آتش‌سوزی دیده می‌شد ولی با توجه به اینکه فراوانی شدت آتش‌سوزی متوسط بیشتر بود و همچنین براساس شاخص‌های ذکر شده قابل تشخیص بود، شدت آتش‌سوزی متوسط برای این بررسی در نظر گرفته شد. همچنین برای کاهش خطاهای متغیرهای محیطی، در نزدیکترین نقطه به هر تیمار یک شاهد (Control) در نظر گرفته شد که شامل C1، C3، و C10 و به ترتیب مربوط تیمارهای 1، 3 و 10 سال پس از آتش‌سوزی بود. در هر مکان انتخاب شده و شاهد مربوط به آن تعداد 4 نمونه ترکیبی از خاک (در مجموع 24 نمونه) به صورت تصادفی و از عمق 0-20 سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد.

آن (C1) با مقدار 6/92 افزایش یافته اما در تیمارهای TSF=3 و TSF=10، pH خاک به ترتیب با مقادیر 7/16 و 6/57 اختلاف معنی‌داری با شاهد آنها (C3 و C10) به ترتیب با مقادیر 7/18 و 6/61 نشان نداد (جدول 2). مقایسه pH خاک در تیمارهای سوخته (TSF=1، TSF=3، TSF=10) با هم نشان داد که TSF=3 و TSF=10 اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشته ولی افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار TSF=10 داشتند (جدول 2). همچنین اختلاف معنی‌داری بین pH خاک در تیمارهای شاهد با یکدیگر نیز مشاهده نشد (جدول 2).

کربن آلی در یک، سه و ده سال پس از سوختن (TSF=1، TSF=3، TSF=10) به ترتیب با مقادیر 6/88، 6/73 و 6/21 درصد کاهش معنی‌داری با شاهدشان (C1، C3 و C10) به ترتیب با مقادیر 9/46، 8/68 و 8/76 درصد نشان دادند. همچنین اختلاف معنی‌داری در بین تیمارهای سوخته با یکدیگر از نظر مقدار کربن آلی خاک مشاهده نشد. مقایسه مقدار کربن آلی خاک در شاهدها (C1، C3 و C10) با یکدیگر نیز نشان داد که در C1، مقدار کربن آلی خاک نسبت به C3 و C10 به طور معنی‌داری بیشتر است ولی بین تیمارهای C3 و C10 اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

مقدار نیتروژن نیز در تیمارهای TSF=1، TSF=3، TSF=10 به ترتیب با مقادیر 0/56، 0/57 و 0/51 درصد نسبت به شاهدشان (C1، C3 و C10) به ترتیب با مقادیر 0/78، 0/72 و 0/72 درصد کاهش معنی‌داری نشان دادند. به دیگر سخن، مقادیر کربن و نیتروژن خاک حتی ده سال پس از آتش‌سوزی نیز به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود نیافتند (جدول 2). همچنین اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای سوخته با یکدیگر از نظر مقدار نیتروژن خاک مشاهده نشد. مقایسه مقدار نیتروژن خاک در تیمارهای شاهد (C1، C3 و C10) با یکدیگر نیز نشان داد که در C1، مقدار نیتروژن خاک نسبت به C3 و C10 به طور معنی‌داری بیشتر است گرچه اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای C3 و C10 مشاهده نشد. با توجه به مقادیر به دست آمده از کربن آلی و نیتروژن تفاوت معنی‌داری در نسبت C:N در زمان‌های پس از سوختن مشاهده نشد. مقدار C:N خاک در تیمارهای یک، سه و ده سال پس از سوختن به ترتیب برابر 11/92، 11/86 و 11/94 بود که اختلاف معنی‌داری با شاهدشان به ترتیب با مقادیر 12/1، 12/05 و 12/05 نداشت (جدول 2). به علاوه اختلاف معنی‌داری در مقدار C:N در بین تیمارهای سوخته نیز در مقایسه با یکدیگر و

شیمیایی و بیولوژیک در جداسازی تیمارهای مورد بررسی مقایسه شود. آماره Lambada-Wilks برای انتخاب متغیرهایی که به روش گام به گام وارد تجزیه شدند، استفاده شد. معنی‌داری ورود و خروج متغیرها به مدل با استفاده از آزمون F بررسی شد. در این آنالیز ترکیب خطی متغیرهایی که هم‌راستا هستند مؤلفه‌ها را تشکیل داده و نمره‌های هر یک از نمونه‌ها در راستای مؤلفه‌ها تعیین می‌شود. هر یک از نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار Excel ترسیم گردیدند. در ضمن تمامی آنالیزها با نرم افزار SPSS v. 22 IBM پردازش گردید (IBM SPSS 2013).

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک

نتایج مربوط به آنالیز واریانس یکطرفه نشان داد که به جز بافت خاک و نسبت C:N اختلاف معنی‌داری ($P < 0.001$) بین تیمارهای مختلف مورد بررسی (TSF=1، TSF=3، TSF=10، C1، C3 و C10) از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک وجود دارد (جدول 1).

بافت خاک منطقه در هر سه تیمار لومی بود و تفاوت معنی‌داری در درصد شن، سیلت و رس خاک‌های تحت آتش‌سوزی در مقایسه با قطعات شاهد در تمام زمان‌های پس از آتش‌سوزی مشاهده نشد (جدول 2). نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها نشان داد که رطوبت اشباع خاک در تیمار یک سال پس از سوختن (TSF=1) با مقدار 57/39 درصد در مقایسه با شاهد (C1) با مقدار 77/87 درصد، به طور معنی‌داری کاهش یافت اما در تیمارهای سه سال پس از سوختن (TSF=3) و ده سال پس از سوختن (TSF=10) رطوبت خاک به ترتیب با مقادیر 77/39 و 64/42 درصد تفاوت معنی‌داری با شاهدشان (C3 و C10) به ترتیب با مقادیر 76/53 و 65/5 درصد نشان نداد (جدول 2). مقایسه تیمارهای سوخته (TSF=1، TSF=3، TSF=10) با هم نیز نتایج نشان داد که تیمارهای TSF=3 و TSF=10، اختلاف معنی‌داری از نظر رطوبت اشباع با هم ندارند ولی تیمار TSF=1 به طور معنی‌داری دارای رطوبت اشباع کمتری نسبت به تیمارهای TSF=3 و TSF=10 است (جدول 2). البته مقایسه میانگین شاهدها (C1، C3 و C10) با یکدیگر نیز نشان داد که بین C1 و C3 اختلاف معنی‌داری از نظر رطوبت اشباع وجود ندارد ولی این دو شاهد با C10 اختلاف معنی‌داری دارند.

در مورد pH خاک نتایج نشان داد که تیمار TSF=1 با مقدار 7/29 به طور معنی‌داری نسبت به شاهد

همچنین تیمارهای شاهد در مقایسه با یکدیگر مشاهده نشد (جدول 2).

جرم مخصوص ظاهری (BD) در تیمارهای TSF=1 و TSF=3 به ترتیب با مقادیر 1/15 و 1/23 گرم بر سانتی‌مترمکعب در مقایسه با شاهدشان (C1 و C3) به ترتیب با مقادیر 1/27 و 1/32 گرم بر سانتی‌مترمکعب کاهش معنی‌داری نشان داد ولی در تیمار TSF=10 با مقدار 1/25 گرم بر سانتی‌مترمکعب به سطح قبل از آتش-سوزی بهبود یافت و اختلاف معنی‌داری نسبت به C10 با مقدار 1/25 گرم بر سانتی‌مترمکعب از خود نشان نداد (جدول 2). مقایسه جرم مخصوص ظاهری خاک در بین تیمارهای سوخته با یکدیگر (TSF=1، TSF=3، TSF=10) نشان داد که در تیمار TSF=1 مقدار جرم مخصوص ظاهری به طور معنی‌داری کمتر از مقدار آن در تیمارهای TSF=3 و TSF=10 می‌باشد ولی اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار TSF=3 و TSF=10 وجود ندارد. البته با مقایسه مقدار جرم مخصوص ظاهری در بین تیمارهای شاهد با یکدیگر (C1، C3 و C10) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار C1 و C10 وجود ندارد ولی تیمار C3 به طور معنی‌داری جرم مخصوص ظاهری بیشتری نسبت به C1 و C10 دارد (جدول 2).

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در تیمار TSF=1 با مقدار 33/21 میلی‌اکی‌والان بر 100 گرم به طور معنی‌داری در مقایسه با C1 با مقدار 24/59 میلی‌اکی‌والان بر 100 گرم افزایش نشان داد اما در تیمارهای TSF=3 و TSF=10 با مقادیر 30/64 و 26/41 میلی‌اکی‌والان بر 100 گرم نسبت به شاهدشان (C3 و C10) به ترتیب با مقادیر 30/94 و 27/47 میلی‌اکی‌والان بر 100 گرم تفاوت معنی‌داری نشان نداد و به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت (جدول 1). مقایسه میانگین تیمارهای TSF=1، TSF=3 و TSF=10 با یکدیگر نشان داد که مقدار CEC در تیمار TSF=1 بطور معنی‌داری بیشتر از TSF=3 و TSF=10 بود. همچنین مقدار آن در تیمار TSF=3 نیز به طور معنی‌داری بیشتر از TSF=10 بود (جدول 2). مقایسه تیمارهای شاهد نیز با یکدیگر نشان از وجود تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شاهد بود به طوری که C3 به طور معنی‌داری دارای بیشترین مقدار بود نسبت به C1 و C10 بود و از طرفی نیز در C10 نیز مقدار CEC به طور معنی‌داری بیشتر از C1 بود (جدول 2).

هدایت الکتریکی (EC) در تیمار TSF=1 با مقدار 0/23 دسی‌زیمنس بر متر به طوری معنی‌داری نسبت به C1 با مقدار 0/16 دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت اما در تیمارهای TSF=3 و TSF=10 سال پس از

آتش‌سوزی به ترتیب با مقادیر 0/15 و 0/1 دسی‌زیمنس بر متر کاهش معنی‌داری نسبت به C3 و C10 به ترتیب با مقادیر 0/18 و 0/18 دسی‌زیمنس بر متر نشان دادند. مقایسه میانگین تیمارهای سوخته با یکدیگر نشان داد که مقدار EC در تیمار TSF=1 به طور معنی‌داری بیشتر از مقدار آن در تیمارهای TSF=3 و TSF=10 است ولی اختلاف معنی‌داری بین مقدار EC در تیمار TSF=3 و TSF=10 مشاهده نشد (جدول 2). همچنین در مقایسه میانگین EC در تیمارهای شاهد با یکدیگر نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

فسفر خاک در تیمار TSF=1 با مقدار 41/25 میلی‌گرم بر کیلوگرم به طور معنی‌داری نسبت به C1 با مقدار 13/85 میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش نشان داد ولی تیمارهای TSF=3 و TSF=10 به ترتیب با مقادیر 13/95 و 36/8 میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش معنی‌داری نسبت به C3 و C10 به ترتیب با مقادیر 24/8 و 56/92 میلی‌گرم بر کیلوگرم نشان دادند (جدول 2). مقایسه تیمارهای آتش‌سوزی با یکدیگر نشان داد که مقدار فسفر خاک در تیمار TSF=1 و TSF=10 به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار TSF=3 بود و اختلاف معنی‌داری میان TSF=1 و TSF=10 مشاهده نشد (جدول 2).

ویژگی‌های میکروبی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس ویژگی‌های میکروبی خاک نشان داد که بین همه تیمارهای مورد بررسی (TSF=1، TSF=3، TSF=10، C1، C3 و C10) اختلاف معنی‌داری ($P < 0.001$) از نظر ویژگی‌های میکروبی خاک وجود دارد (جدول 3). نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال 5 درصد نشان داد که تنفس پایه خاک (BR) در تیمارهای TSF=1 با مقدار 66/29 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز اختلاف معنی‌داری با C1 با مقدار 71/39 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز داشت ولی در TSF=3 با مقدار 74/14 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز اختلاف معنی‌داری با C3 با مقدار 79/69 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز نشان نداد. اما باز هم در تیمار TSF=10، تنفس پایه خاک با مقدار 58/10 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز کاهش معنی‌داری نسبت به C10 با مقدار 80/23 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز نشان داد (جدول 4). با مقایسه میانگین تنفس پایه خاک در تیمارهای سوخته نیز مشاهده شد که در تیمار TSF=1 تنفس پایه کاهش یافته و سپس در تیمار TSF=3 افزایش و باز هم در تیمار TSF=10 کاهش یافت. البته مقایسه میانگین تنفس پایه در تیمارهای شاهد نشان داد که

فقط بین شاهد‌های C1 و C10 هم اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول 4).

جدول 1- آنالیز واریانس یکطرفه مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در تیمارهای آتش سوزی و شاهد آنها

| ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی | منبع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات | F | سطح معنی داری |
|----------------------------|--------------|------------|----------------|---------|---------------|
| کربن آلی (%) | بین تیمارها | 5 | 7/177 | 227/733 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/032 | | |
| | کل | 23 | | | |
| نیتروژن (%) | بین تیمارها | 5 | 0/047 | 324/104 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/001 | | |
| | کل | 23 | | | |
| pH | بین تیمارها | 5 | 0/381 | 54/49 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/007 | | |
| | کل | 23 | | | |
| EC (dS/m) | بین تیمارها | 5 | 0/07 | 76/67 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/001 | | |
| | کل | 23 | | | |
| C:N | بین تیمارها | 5 | 0/340 | 1/902 | 0/144 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/180 | | |
| | کل | 23 | | | |
| P (mg/kg) | بین تیمارها | 5 | 1165/036 | 223/478 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 5/213 | | |
| | کل | 23 | | | |
| رطوبت اشباع (%) | بین تیمارها | 5 | 295/636 | 23/347 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 12/663 | | |
| | کل | 23 | | | |
| CEC (meq/100g) | بین تیمارها | 5 | 42/048 | 84/54 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/497 | | |
| | کل | 23 | | | |
| BD (g/cm ³) | بین تیمارها | 5 | 0/021 | 21/1 | 0/000 |
| | درون تیمارها | 18 | 0/001 | | |
| | کل | 23 | | | |

اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول 4). با مقایسه این شاخص در تیمارهای سوخته (TSF=1، TSF=3 و TSF=10)، اختلاف معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد (جدول 4). همچنین مقایسه شاهد‌ها نیز با یکدیگر (C1، C3 و C10) نشان داد که مقدار این شاخص در شاهد‌های C1 و C3 اختلاف معنی‌داری ندارد ولی مقدار این شاخص در این دو شاهد به طور معنی‌داری کمتر از مقدار آن در C10 است (جدول 4).

کسر متابولیک (qCO_2) با مقدار $1 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$ در تیمار TSF=1 به طور معنی‌داری بیشتر از آن در C1 با مقدار $0/26 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$ بود (جدول 4). به طور مشابه این شاخص در تیمار TSF=3 با مقدار $0/80 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$ نسبت به C3 با مقدار $0/49 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$ اختلاف معنی‌داری نشان داد. همچنین بین ارزش این شاخص در تیمار TSF=10 با مقدار $0/77 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$ و C10 با مقدار $1/24 \mu\text{g C g MBC}^{-1} \text{ day}^{-1}$

جدول 2- مقایسه میانگین متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک در تیمارها (میانگین \pm اشتباه معیار) با استفاده از آزمون توکی ($P < 0.05$)

| ده سال پس از آتش‌سوزی | | سه سال پس از آتش‌سوزی | | یک سال پس از آتش‌سوزی | | متغیر فیزیکی - شیمیایی |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| شاهد (C10) | سوخته (TSF=10) | شاهد (C3) | سوخته (TSF=3) | شاهد (C1) | سوخته (TSF=1) | |
| 8/76 \pm 0/12 ^b | 6/21 \pm 0/18 ^{cd} | 8/68 \pm 0/15 ^b | 6/73 \pm 0/16 ^c | 9/46 \pm 0/28 ^a | 6/88 \pm 0/14 ^c | کربن آلی (%) |
| 0/72 \pm 0/01 ^b | 0/51 \pm 0/02 ^{cd} | 0/72 \pm 0/07 ^b | 0/56 \pm 0/15 ^c | 0/78 \pm 0/02 ^a | 0/57 \pm 0/01 ^c | نیترژن (%) |
| 6/61 \pm 0/05 ^{bc} | 6/57 \pm 0/05 ^{bc} | 7/18 \pm 0/07 ^{ab} | 7/16 \pm 0/15 ^a | 6/92 \pm 0/08 ^b | 7/29 \pm 0/06 ^a | pH |
| 0/18 \pm 0/00 ^{bc} | 0/11 \pm 0/01 ^d | 0/18 \pm 0/01 ^{bc} | 0/15 \pm 0/01 ^d | 0/16 \pm 0/00 ^{cd} | 0/23 \pm 0/01 ^a | EC (ds/m) |
| 12/05 \pm 0/08 | 11/94 \pm 0/07 | 12/05 \pm 0/11 | 11/86 \pm 0/16 | 12/1 \pm 0/19 | 11/92 \pm 0/15 | C:N |
| 56/92 \pm 2/9 ^a | 36/8 \pm 1/6 ^b | 24/8 \pm 1/79 ^c | 13/95 \pm 0/87 ^d | 13/85 \pm 1/14 ^d | 41/25 \pm 3/88 ^b | P (mg/kg) |
| 65/5 \pm 0/96 ^b | 64/42 \pm 1/46 ^{bc} | 76/53 \pm 2/9 ^a | 77/39 \pm 0/6 ^a | 77/87 \pm 5/19 ^a | 57/39 \pm 3/02 ^c | رطوبت اشباع (%) |
| 27/47 \pm 0/58 ^c | 26/41 \pm 0/78 ^c | 30/94 \pm 0/49 ^b | 30/64 \pm 0/78 ^b | 24/59 \pm 0/78 ^d | 33/21 \pm 0/76 ^a | CEC (meq/100g) |
| 1/25 \pm 0/01 ^b | 1/25 \pm 0/03 ^b | 1/32 \pm 0/02 ^a | 1/23 \pm 0/02 ^b | 1/27 \pm 0/02 ^b | 1/15 \pm 0/02 ^c | BD (g/cm ³) |
| لومی | لومی | لومی | لومی | لومی | لومی | بافت خاک |

حروف الفبای مشابه در هر ردیف نشان‌دهنده نداشتن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 0/05 می‌باشد. BD: جرم مخصوص ظاهری؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ P: فسفر فراهم، EC: هدایت الکتریکی؛ C:N: نسبت کربن به نیترژن؛ pH: واکنش خاک

جدول آنالیز واریانس یکطرفه مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در تیمارهای آتش‌سوزی و شاهد آنها

| سطح معنی داری | F | میانگین مربعات | درجه آزادی | منبع تغییرات | ویژگی‌های میکروبی |
|---------------|--------|----------------|------------|--------------|--|
| 0/000 | 19/397 | 285/669 | 5 | بین تیمارها | BR(mg/CO ₂ kg day ⁻¹) |
| | | 14/727 | 18 | درون تیمارها | |
| | | | 23 | کل | |
| 0/000 | 18/000 | 46464/000 | 5 | بین تیمارها | SIR(mg/CO ₂ kg day ⁻¹) |
| | | 2581/33 | 18 | درون تیمارها | |
| | | | 23 | کل | |
| 0/000 | 67/278 | 12535/505 | 5 | بین تیمارها | MBC(mg/C kg day ⁻¹) |
| | | 186/323 | 18 | درون تیمارها | |
| | | | 23 | کل | |
| 0/000 | 7/612 | 0/596 | 5 | بین تیمارها | qCO ₂ (μg C g MBC ⁻¹ day ⁻¹) |
| | | 0/078 | 18 | درون تیمارها | |
| | | | 23 | کل | |
| 0/000 | 44/339 | 1/907 | 5 | بین تیمارها | C _{MBC} :C _{org} (%) |
| | | 0/043 | 18 | درون تیمارها | |
| | | | 23 | کل | |

BR: تنفس پایه؛ SIR: تنفس برانگیخته؛ MBC: کربن بیومس میکروبی؛ qCO₂: کسر متابولیک؛ C_{MBC}:C_{org}: کسر میکروبی

62/12 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز اختلاف معنی‌داری نشان نداد و به عبارتی به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت (جدول 4). مقایسه میانگین تیمارهای سوخته با یکدیگر (TSF=1، TSF=3 و TSF=10) نشان داد که میانگین کربن بیومس میکروبی در تیمارهای TSF=1 و TSF=10 به طور معنی‌داری کمتر از مقدار آن در تیمار TSF=3 است و همچنین میانگین کربن بیومس میکروبی

میانگین کربن بیومس میکروبی (MBC) در تیمار TSF=1 با مقدار 36/94 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز اختلاف معنی‌داری با C1 با مقدار 167/68 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز نشان داد. اما در تیمار TSF=3 و TSF=10 میانگین کربن بیومس میکروبی با مقادیر به ترتیب 67/81 و 158/73 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز، با میانگین آن در C3 و C10 به ترتیب با مقادیر 136/62 و

میکروبی در تیمارهای شاهد (C1، C3 و C10) نشان داد که همه تیمارها با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند.

در تیمار TSF=1 به طور معنی‌داری کمتر از مقدار آن در تیمار TSF=10 بود. مقایسه میانگین کربن بیومس

جدول 4- مقایسه میانگین متغیرهای میکروبی خاک در تیمارها (میانگین \pm اشتباه معیار) با استفاده از آزمون توکی ($P < 0.05$)

| ویژگی‌های میکروبی | یک سال پس از آتش‌سوزی | | سه سال پس از آتش‌سوزی | | ده سال پس از آتش‌سوزی | |
|--|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | سوخته (C1) | شاهد (TSF=1) | سوخته (C3) | شاهد (TSF=3) | سوخته (C10) | شاهد (TSF=10) |
| BR(mg/CO ₂ kg day ⁻¹) | 71/39 \pm 4/07 ^{bc} | 66/29 \pm 2/44 ^d | 79/69 \pm 2/68 ^{ab} | 74/14 \pm 2/43 ^c | 80/23 \pm 1/29 ^a | 58/10 \pm 7/14 ^d |
| SIR(mg/CO ₂ kg day ⁻¹) | 374 \pm 44/1 ^d | 506 \pm 44/0 ^{bc} | 682 \pm 44/0 ^a | 506 \pm 44/2 ^{bc} | 616 \pm 71/6 ^{ab} | 484 \pm 50/8 ^{cd} |
| MBC(mg/C kg day ⁻¹) | 167/68 \pm 2/8 ^a | 36/94 \pm 4/5 ^d | 136/62 \pm 8/1 ^b | 158/73 \pm 4/4 ^{ab} | 62/12 \pm 4/8 ^{cd} | 67/81 \pm 11/8 ^c |
| qCO ₂ (μ g C g MBC ⁻¹ day ⁻¹) | 0/26 \pm 0/07 ^b | 1/20 \pm 0/43 ^a | 0/49 \pm 0/09 ^b | 0/80 \pm 0/10 ^a | 1/24 \pm 0/35 ^a | 0/77 \pm 0/36 ^{ab} |
| C _{MBC} :C _{org} (%) | 1/77 \pm 0/05 ^b | 0/53 \pm 0/13 ^d | 1/57 \pm 0/19 ^b | 2/36 \pm 0/19 ^a | 0/70 \pm 0/11 ^{cd} | 1/09 \pm 0/39 ^c |

حروف الفبای مشابه در هر ردیف نشان‌دهنده نداشتن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 0/05 می‌باشد. BR: تنفس پایه؛ SIR: تنفس برانگیخته؛ MBC: کربن بیومس میکروبی؛ qCO₂: کسر متابولیک؛ C_{MBC}:C_{org}: کسر میکروبی

میکروبی در C10 به طور معنی‌داری کمتر از C1 و C3 بوده ولی اختلاف معنی‌داری بین C1 و C3 مشاهده نشد (جدول 4).

آنالیز تشخیصی

نتایج آنالیز تشخیصی شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی نشان داد که از میان متغیرهای اندازه‌گیری شده، چهار متغیر شامل: EC، P، N، CEC و وارد مدل شدند و ترکیب خطی آن‌ها منجر به تشکیل چهار مؤلفه شد (جدول 5). مؤلفه یک و دو با بیان واریانس 55/1 و 30/1 درصد به ترتیب بیشترین سهم را در جداسازی گروه‌ها از یکدیگر داشتند. این دو مؤلفه در مجموع بیش از 85 درصد واریانس گروه‌ها را بیان نمودند (جدول 6). نمودار پراکنش نمونه‌ها (شکل 2، الف) بر اساس نمرات به دست آمده از آنالیز تشخیصی نشان داد که تیمارهای آتش‌سوزی نسبت به تیمارهای شاهد کاملاً جداسازی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیمارهای آتش‌سوزی شامل ده سال پس از آتش (TSF=10)، سه سال پس از آتش (TSF=3) و یک سال پس از آتش (TSF=1) همگی در سمت چپ مؤلفه یک به عنوان مؤلفه اصلی این آنالیز و شاهد‌های آن‌ها شامل C10، C3 و C1 همگی در سمت راست مؤلفه یک قرار گرفته‌اند. نتایج آنالیز تشخیصی ویژگی‌های میکروبی خاک نشان داد که از میان متغیرهای اندازه‌گیری شده، چهار متغیر شامل کسر میکروبی، بیومس میکروبی، تنفس پایه و تنفس برانگیخته وارد مدل شدند و ترکیب خطی آن‌ها منجر به تشکیل چهار مؤلفه شد (جدول 3). مؤلفه یک و دو با بیان واریانس 58/4 و 33/4 درصد به ترتیب بیشترین سهم را در جداسازی گروه‌ها از

میانگین تنفس برانگیخته (SIR) در تیمار TSF=1 با مقدار 506 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز افزایش معنی‌داری نسبت به C1 با مقدار 374 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز نشان داد (جدول 4). در تیمارهای TSF=3 و TSF=10 این شاخص با مقادیر 506 و 484 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز نسبت به C3 و C10 به ترتیب با مقادیر 682 و 616 میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز کاهش معنی‌داری نشان داد. با مقایسه میانگین تنفس برانگیخته در تیمارهای سوخته با یکدیگر (TSF=1، TSF=3 و TSF=10)، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. با مقایسه تیمارهای شاهد با یکدیگر (C1، C3، C10)، اختلاف معنی‌داری بین میانگین تنفس برانگیخته در C3 و C10 مشاهده نشد ولی این دو شاهد با C1 اختلاف معنی‌داری نشان دادند (جدول 4).

کسر میکروبی (C_{MBC}:C_{org}) در تیمار TSF=1 با مقدار 0/53 درصد نسبت به C1 با مقدار 1/77 درصد کاهش اما در تیمار TSF=3 با مقدار 2/36 درصد افزایش معنی‌داری نسبت به C3 نشان داد. در تیمار TSF=10 با مقدار 1/09 درصد در مقایسه با C10 با مقدار 0/70 درصد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول 4). با مقایسه تیمارهای سوخته با یکدیگر (TSF=1، TSF=3 و TSF=10)، مقدار کسر میکروبی در تیمار TSF=3 افزایش معنی‌داری نسبت به تیمارهای TSF=1 و TSF=10 نشان داد، گرچه اختلاف معنی‌داری بین تیمار TSF=1 و TSF=10 مشاهده نشد. با مقایسه تیمارهای شاهد با یکدیگر (C1، C3، C10) نیز مشاهده شد که کسر

ملاحظه است اما در دهمین سال به کمترین مقدار خود رسیده است که نشان از بهبود تدریجی خاک به سطح قبل از آتش‌سوزی دارد اگرچه برخی ویژگی‌ها حتی پس از ده سال نیز هنوز به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود نیافته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیمارهای آتش‌سوزی شامل ده سال پس از آتش (TSF=10)، سه سال پس از آتش (TSF=3) و یک سال پس از آتش (TSF=1) به عنوان مؤلفه اصلی این آنالیز و شاهدهای آن‌ها شامل C10، C3 و C1 می‌باشد.

یکدیگر داشتند. این دو مؤلفه در مجموع بیش از 92 درصد واریانس گروه‌ها را بیان نمودند (جدول 6). نمودار پراکنش نمونه‌ها (شکل 2، ب) بر اساس نمرات به دست آمده از آنالیز تشخیصی نشان داد که تیمارهای آتش‌سوزی نسبت به تیمارهای شاهد در آنالیز تشخیصی شاخص‌های میکروبی مشابه با شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی جداسازی نشده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات در اولین سال پس از آتش-سوزی اتفاق افتاده است. تغییرات در سومین سال نیز قابل

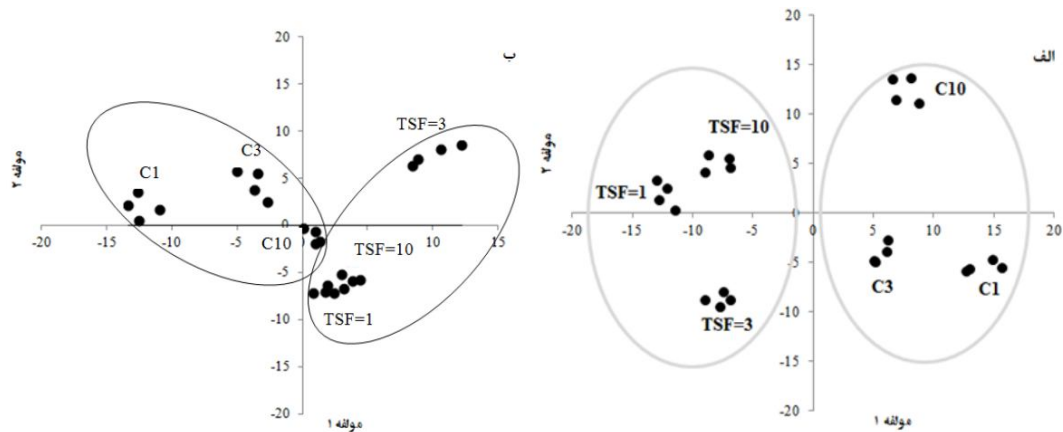
جدول 5- ضرایب استاندارد شده متغیرها مربوط به هر یک از مؤلفه‌ها

| مؤلفه‌ها | متغیرها | | | | |
|--------------------------|---------|-------|--------|--------|------------------------------------|
| | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی | -0/845 | 0/656 | -0/045 | -0/714 | EC |
| | 0/118 | 0/054 | 1/039 | 0/043 | P |
| | 0/292 | 0/188 | 0/003 | 1/218 | N |
| | 0/870 | 0/510 | -0/388 | -0/042 | CEC |
| ویژگی‌های میکروبی | -0/737 | 0/156 | 0/486 | 0/736 | C _{mic} :C _{org} |
| | 0/411 | 0/156 | -0/115 | -5/655 | MBC |
| | -0/659 | 0/403 | 1/226 | 1/242 | BR |
| | 0/603 | 0/813 | 0/146 | -0/135 | SIR |

BR: تنفس پایه؛ SIR: تنفس برانگیخته؛ MBC: کربن بیومس میکروبی؛ CO₂q: کسر متابولیک؛ C_{MBC}:C_{org}؛ کسر میکروبی BD: جرم مخصوص ظاهری؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ P: فسفر فراهم، EC: هدایت الکتریکی؛ C:N: نسبت کربن به نیتروژن؛ pH: واکنش خاک

جدول 6- مقادیر کانونی محاسبه شده برای مؤلفه‌ها و مقدار واریانس توجیه شده توسط آن‌ها

| مؤلفه | مقدار ویژه | واریانس% | واریانس تجمعی% |
|--------------------------|------------|----------|----------------|
| ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی | 1 | 124/955 | 55/1 |
| | 2 | 68/266 | 30/1 |
| | 3 | 30/595 | 13/5 |
| | 4 | 2/968 | 1/3 |
| ویژگی‌های میکروبی | 1 | 63/154 | 58/4 |
| | 2 | 36/131 | 33/4 |
| | 3 | 8/053 | 7/4 |
| | 4 | 0/792 | 0/7 |



شکل 2- نمودار پراکنش نمونه‌های تیمارهای آتش سوزی در امتداد مولفه‌های آنالیز تشخیصی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک (الف) و ویژگی‌های بیولوژیک خاک (ب)؛ TSF=1: 1 سال پس از آتش سوزی، TSF=3: 3 سال پس از آتش سوزی، TSF=10: 10 سال پس از آتش سوزی، C1، C3 و C10 به ترتیب شاهد‌های تیمارهای آتش سوزی هستند

بحث

ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک

لایه آبریز از ترکیبات آلی باشد که در اثر سوختن ماده آلی بر سطح ذرات خاک ایجاد می‌شود که از آن با نام آبریزی خاک یاد می‌شود (دبانو، 1981). اما رطوبت اشباع خاک بعد از سه و ده سال به بهبودی کامل رسید و تفاوتی نسبت به تیمار شاهد نشان نداد. مقایسه تیمارهای سوخته با یکدیگر نشان‌دهنده کاهش رطوبت اشباع هم در تیمار یکسال و هم در تیمار ده سال پس از آتش سوزی است ولی با توجه به اختلاف معنی‌دار این ویژگی در بین تیمارهای شاهد، مقایسه تیمارهای سوخته با یکدیگر منطقی نیست و بهتر است که هر یک با شاهد خود مقایسه شود. مقادیر بالای pH خاک در سال اول پس از آتش سوزی می‌تواند در نتیجه سوختن ناقص ماده آلی و تولید خاکستر (به دلیل غلظت بالای عناصری چون پتاسیم، کلسیم و منیزیم) باشد (مونوز - روجاس و همکاران، 2016). اما کاهش و بهبود pH با زمان‌های سه و ده سال پس از آتش سوزی می‌تواند نتیجه فرآیند آبشویی خاکستر از خاک باشد. در مقایسه تیمارهای سوخته با یکدیگر نیز نشان داده شد که تنها در تیمار یکسال پس از آتش سوزی بلکه در تیمار سه سال پس از آتش سوزی نیز افزایش معنی‌داری در pH خاک نسبت به تیمار ده سال پس از آتش سوزی مشاهده شد و مشابه بودن pH خاک در تیمارهای شاهد دلیل بر نبودن اختلاف ذاتی بین خاک مکان‌های مورد مطالعه است. بنابراین روند تغییرات pH خاک در اثر گذشت زمان پس از آتش سوزی در اینجا قابل مشاهده است که پس از ده سال pH خاک می‌تواند به شرایط پیش از آتش سوزی بهبود یابد.

معنی‌دار نبودن تغییرات بافت خاک در زمان‌های پس از آتش سوزی نشان‌دهنده این است که آتش سوزی در مناطق مورد بررسی به دماهای بالا نرسیده و اجزای تشکیل‌دهنده بافت خاک آستانه دمایی بالایی دارند و برای تغییر بافت خاک دماهای بالایی باید بر خاک اعمال شود (یولری و گراهام، 1993). کاهش در جرم مخصوص ظاهری یک سال و سه سال پس از آتش سوزی نسبت به شاهد ممکن است به دلیل تنک بودن درختان باشد که حجم زیادی خاکستر تولید نشده بود که بتواند لایه ضخیمی خاکستر در سطح خاک ایجاد نماید و باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شود. اما جرم مخصوص ظاهری ده سال بعد از آتش سوزی به سطح قبل از آتش سوزی بهبود یافت که می‌تواند ناشی از تخلیه کامل خاکستر از پروفیل خاک و بهبود آن باشد. مونوز - روجاس و همکاران (2016) نیز نشان دادند که یک سال پس از آتش سوزی، جرم مخصوص ظاهری تیمار شاهد به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای سوخته بود. گرچه در مقایسه تیمارهای سوخته با یکدیگر، کاهش معنی‌دار فقط در تیمار یکسال پس از آتش سوزی مشاهده شد. البته مقایسه بین شاهد‌های مورد بررسی نشان‌دهنده وجود اختلاف ذاتی معنی‌دار بین جرم مخصوص ظاهری خاک مکان‌های مورد بررسی است و بهتر است که تیمارهای آتش سوزی نسبت به شاهد خود مقایسه شوند. کاهش در رطوبت اشباع خاک یک سال بعد در تیمارهای آتش - سوزی در مقایسه با شاهد می‌تواند ناشی از تشکیل یک

سوزی) است و سپس می‌تواند به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یابد. افزایش فسفر خاک در اولین سال پس از آتش‌سوزی می‌تواند به دلیل سوختن ماده آلی و رهاسازی فسفر موجود در ترکیب ماده آلی به داخل خاک باشد (پوررضا و همکاران، 2014). افزایش غلظت برخی عناصر ماکرو و میکرو چون فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم بعد از آتش‌سوزی در بسیاری از مطالعات مشاهده شده است (نیری و همکاران، 2005). سرتینی (2005) اعلام داشت که در دماهای بالا آتش‌سوزی فسفر می‌تواند تصعید و کاهش یابد که به نظر می‌رسد در این پژوهش دما به اندازه کافی افزایش نیافته است. مقایسه تیمارهای سوختگی باهم نشان‌دهنده روندی افزایشی، سپس کاهش و در نهایت بازهم افزایشی به ترتیب برای تیمارهای یکسال، سه سال و ده سال پس از آتش‌سوزی نشان داد.

از طرفی با مقایسه مقدار فسفر در خاک‌های شاهد می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مکان‌های مورد بررسی از نظر مقدار فسفر خاک در پیش از آتش‌سوزی با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند و به همین دلیل بهتر است که تغییر در مقدار فسفر خاک در هر یک از تیمارهای آتش‌سوزی با توجه به شاهد آن مورد مقایسه قرار گیرد. یک سال بعد از آتش‌سوزی افزایش در غلظت ظرفیت تبادل کاتیونی ممکن است به علت سوختن ماده آلی و آزادسازی عناصر غذایی ماده آلی به درون خاک صورت گرفته باشد یا به این علت باشد که بار این خاک‌ها وابسته به pH است. اما سه و ده سال بعد ظرفیت تبادل کاتیونی روندی کاهشی داشت و به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت که این کاهش در سال سوم و دهم ممکن است ناشی از جذب توسط گیاهان و فعالیت‌های میکروبی باشد (تثبیت نیتروژن و نیتریفیکاسیون). مقایسه تیمارهای سوختگی با یکدیگر نیز نشان‌دهنده افزایش CEC در کوتاه مدت پس از آتش‌سوزی (سال اول) و سپس روند کاهشی در سال‌های سه و ده پس از آتش‌سوزی بوده و به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافتند. اگرچه مقایسه شاهد‌های مکان‌های مورد بررسی نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در مقدار CEC خاک در زمان پیش از آتش‌سوزی است و به همین خاطر بهتر است که هر تیمار سوختگی با شاهد مربوط به خود مقایسه شود. در این راستا مونوز- روجاس و همکاران (2016) در پژوهش خود هیچ تغییری در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی چه در کوتاه مدت، چه در میان مدت و بلندمدت نیز مشاهده نکردند. براساس نتایج چند متغیره آنالیز تشخیصی، با در نظر گرفتن همه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده، نتیجه-

در باره تغییرات pH خاک با گذشت زمان پس از آتش‌سوزی، فیشر و بینکلی (2000) نیز گزارش دادند که pH خاک پس از آتش‌سوزی افزایش می‌یابد و بهبود این روند نیازمند یک دوره چند ماهه تا چند ساله می‌باشد، اما زمان بهبود آن دقیقاً مشخص نیست. در این مطالعه، بر اساس نتایج محتوای کربن آلی در همه سال‌های پس از آتش‌سوزی کاهش یافت که این موضوع نشان‌دهنده این است که دما در طول آتش‌سوزی به حدی رسیده است که باعث از بین رفتن ماده آلی شود زیرا سوختن و از بین رفتن ماده آلی در دمای 220 تا 460 درجه سلسیوس اتفاق می‌افتد (دبانو و همکاران، 1998)، بنابراین به نظر می‌رسد که در این مطالعه کاهش کربن آلی می‌تواند ناشی از بین رفتن پوشش گیاهی به خصوص لاشبرگ‌ها و اکسید شدن ماده آلی باشد.

کاهش در مقدار نیتروژن نیز در این بازه زمانی می‌تواند ناشی از دمای پایین تبخیر نیتروژن باشد. گرچه با مقایسه شاهد‌ها می‌توان نتیجه گرفت که محتوای کربن آلی و نیتروژن خاک مکان‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری به غیر از اثر آتش‌سوزی دارند به طوری که خاک مربوط به شاهد یکسال پس از آتش‌سوزی دارای محتوای کربن و نیتروژن بیشتری نسبت به خاک شاهد سه و ده سال پس از آتش‌سوزی است ولی با این وجود نیز کاهش محتوای کربن و نیتروژن در تیمارهای سوخته کاملاً مشهود است. توافق گسترده‌ای بین محققان وجود دارد که آتش‌سوزی باعث کاهش ماده آلی خاک می‌شود (سرتینی، 2005 و فرناندز و همکاران، 1999). هولدن و همکاران (2013) گزارش کردند که 15 سال زمان نیاز است تا کربن آلی به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یابد. عدم تغییر نسبت C:N نیز در دوره زمانی در نظر گرفته شده به دلیل کاهش کربن آلی و نیتروژن می‌باشد. افزایش هدایت الکتریکی خاک یک و سه سال بعد از آتش‌سوزی می‌تواند دلیلی بر افزایش نمک‌های محلول باشد که در اثر سوختن ماده آلی آزاد می‌شوند (بارسیناس- مورنو و همکاران، 2011). اما ده سال بعد کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی در مقایسه با شاهد می‌تواند در نتیجه تثبیت نمک‌ها، بارش باران و فرآیندهای آبشویی باشد که باعث شسته شدن نمک‌ها و کاهش غلظت آن‌ها می‌شود. مقایسه تیمارهای سوختگی باهم و از طرفی شاهد‌های آنها با یکدیگر نشان‌دهنده این است که هدایت الکتریکی در خاک این مناطق اختلاف معنی‌داری در زمان پیش از آتش‌سوزی نداشته و تغییرات بوجود آمده ناشی از آتش‌سوزی است و روند آن طوری است که به خوبی نشان‌دهنده افزایش هدایت الکتریکی در کوتاه مدت (یک سال پس از آتش

گیری شد که در همه تیمارهای مربوط به زمان‌های پس از آتش‌سوزی حتی در تیمار ده سال پس از آتش‌سوزی نیز تغییرات معنی‌داری ایجاد شد. به عبارتی از نظر متغیرهای مورد بررسی به طور کلی نمونه‌های آتش‌سوزی شده اختلاف معنی‌دار نسبت به نمونه‌های شاهد (نسوخته) نشان دادند و توسط ویژگی‌هایی شامل P, N, EC و CEC به طور واضحی از یکدیگر جداسازی شدند.

ویژگی‌های میکروبی

آتش‌سوزی اثرات کوتاه‌مدت منفی بر بیومس میکروبی و اثرات کوتاه- میان‌مدت مثبت بر تنفس خاک داشت. یک سال پس از آتش‌سوزی تنها 22% بیومس میکروبی موجود در قطعات شاهد در تیمارهای آتش‌سوزی مشاهده گردید. این تفاوت ممکن است ناشی از توقف تأمین باقی‌مانده‌های گیاهی و جانوری و ماده آلی از لاشبرگ‌ها یا به دلیل از بین رفتن مایکوریزا در نتیجه از بین رفتن ریشه‌های گیاهی پس از آتش‌سوزی باشد (پیتیکانن و فریتز، 1995). این یافته‌ها در توافق با گزارشات برخی مطالعات گذشته است (مبوه‌ای و همکاران، 2006 و هرناوندز و همکاران، 1997). یافته‌های این مطالعه همچنین در توافق با مشاهدات وانگ و همکاران (2006) است که گزارش کردند آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های جنگلی باعث کاهش خیلی معنی‌دار در کربن بیومس میکروبی می‌شود. از سوی دیگر این نتایج در تضاد با گزارشات پژوهشگرانی چون لیو و همکاران (2007) است که گزارش کردند کربن بیومس میکروبی پس از وقوع آتش‌سوزی روندی افزایشی دارد. مقایسه تیمارهای آتش‌سوزی با یکدیگر نشان داد که کربن بیومس میکروبی خاک در کوتاه مدت کاهش، در میان‌مدت افزایش و سپس در بلندمدت نیز کاهش می‌یابد. البته مقایسه خاک‌های شاهد حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار در مقدار کربن بیومس میکروبی خاک در زمان پیش از آتش‌سوزی است و بهتر است که تغییر در کربن بیومس میکروبی خاک‌های سوخته نسبت به شاهدشان در نظر گرفته شود. در مطالعات مختلف گزارش شده که آتش‌سوزی اثرات متغیری روی بیومس میکروبی خاک دارد که این اثرات وابسته به شدت و مدت آتش‌سوزی می‌باشد (مبوه‌ای و همکاران، 2006). بنابراین با مقایسه هریک از تیمارهای سوختگی با شاهد مربوط به خود، می‌توان نتیجه گرفت که بهبود بیومس میکروبی کربن سه و ده سال بعد به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافته و این بهبود می‌تواند ناشی از اقلیم مرطوب منطقه مورد بررسی (باران زیاد، دما کم) باشد (کارا و بولات، 2009). این نتایج موافق با یافته‌های پاین (1984) است

که گزارش کرد اثرات آتش‌سوزی بر کربن بیومس میکروبی موقتی بوده و در کوتاه‌مدت به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود می‌یابد. همچنین مک و همکاران (2008) به این نتیجه رسیدند که این شاخص در کمتر از چهار سال می‌تواند به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یابد. از سوی دیگر دومنتت و همکاران (1996) در مطالعات خود گزارش کردند حتی 11 سال بعد از آتش‌سوزی بیومس میکروبی همچنان روندی کاهشی دارد.

کاهش تنفس پایه در تیمار یکسال پس از آتش‌سوزی می‌تواند در اثر کاهش شدید جمعیت میکروبی خاک باشد که مقایسه بیومس میکروبی خاک تایید کننده این موضوع می‌تواند باشد. همانطور که مشاهده شد تنفس میکروبی خاک پس از سه سال افزایش معنی‌داری نسبت به سال اول پس از آتش‌سوزی نشان داد که البته این افزایش در کربن بیومس میکروبی این تیمار نیز مشاهده می‌شود. همچنین کاهش تنفس میکروبی در تیمار ده سال پس از آتش‌سوزی نیز می‌تواند به دلیل کاهش دوباره بیومس میکروبی خاک باشد. تنفس خاک که به طور کلی شاخصی برای نشان دادن میزان فعالیت میکروبی خاک است در شرایط یکسان بودن بیومس میکروبی هم می‌تواند متفاوت باشد (اندرسون، 2003). به عبارتی با داشتن بیومس میکروبی ثابت ولی با تغییر در شرایط خاک و ایجاد آشفستگی در شرایط خاک، تنفس میکروبی خاک می‌تواند افزایش یابد (اندرسون، 2003) که نسبت تغییرات تنفس به بیومس خاک به عنوان یک شاخص مهم برای نشان دادن وجود آشفستگی در خاک معرفی شده است که به آن کسر متابولیک گفته می‌شود (اندرسون، 2003).

تغییراتی که در تنفس میکروبی خاک با توجه به شاهد تیمارها دیده می‌شود هم می‌تواند ناشی از تغییر در بیومس میکروبی خاک و هم ناشی از آشفستگی ایجاد شده در خاک باشد. بنابراین بهتر است که تغییرات تنفس میکروبی خاک با توجه به تغییر در بیومس میکروبی و شاخص کسر متابولیک بررسی شود که در ادامه به تغییرات این شاخص پرداخته شده است. اما اگر تنها تنفس خاک در نظر گرفته شود این نتایج می‌تواند با نتایج پژوهش‌های دیگر قابل مقایسه باشد. به طوری که نتایج پژوهش هولدن و همکاران (2013) نشان داد که آتش-سوزی ممکن است باعث کاهش تنفس خاک حتی تا 12 سال بعد در جنگل‌های شمالی آلاسکا شود. همچنین برک و همکاران (1997) گزارش کردند که هفت سال نیاز است تا تنفس خاک به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یابد که این زمان مورد نیاز برای بازسازی تنفس گیاهان، بهبود کیفیت لاشبرگ یا فعالیت‌های میکروبی در خاک می‌باشد.

سوزی بهبود یافت و تفاوت چشمگیری با قطعات شاهد نشان نداد. مطابق با نتایج ما، آنالیزها نشان می‌دهند که کسر متابولیکی اغلب با افزایش بیومس میکروبی و محتوای رس کاهش می‌یابد (مونوز-روجاس و همکاران، 2016a).

افزایش معنی‌دار تنفس برانگیخته یک سال بعد از آتش‌سوزی می‌تواند به دلیل حجم زیاد مواد آلی که به صورت ناقص سوخته‌اند و آماده تجزیه میکروبی هستند باشد (ودریک و همکاران، 2002). این نتایج در تضاد با یافته‌های پوررضا و همکاران (2014) می‌باشد که گزارش کردند یک سال پس از آتش‌سوزی تنفس برانگیخته در تیمارهای آتش‌سوزی کاهش می‌یابد. اما این شاخص مفید کیفیت خاک سه و ده سال بعد در مقایسه با شاهد کاهش یافت که این امر می‌تواند ناشی از مصرف مواد آلی زیاد در اولین سال پس از آتش‌سوزی و عدم جایگزینی این مواد در سال‌های پس از آتش‌سوزی باشد و باعث عدم بازگشت تعادل در مخازن کربن برای سالیان طولانی شود. با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار بین خاک شاهد‌های مورد بررسی که دلالت بر اختلاف پیش از آتش‌سوزی دارد، در این مورد نیز تأکید بر این بود که مقایسه میزان تغییرات این ویژگی در هر تیمار سوختگی با شاهد مربوط به آن انجام شود نه تیمارهای سوختگی با هم.

نسبت کربن بیومس میکروبی به کربن آلی خاک ($C_{mic}:C_{org}$) می‌تواند به عنوان شاخص مفید کیفیت به خاک‌های مختلف با درصد‌های مختلف ماده آلی اجازه دهد با یکدیگر مقایسه شوند (بالوتا و همکاران، 2003). به طور کلی اگر خاکی شروع به تخریب و تجزیه کند، مخازن کربن میکروبی با سرعت بیشتری نسبت به ماده آلی شروع به کاهش می‌نمایند و در نتیجه به دنبال آن این نسبت کاهش خواهد یافت (اندرسون، 2003 و کارا و بالوت، 2007). در این مطالعه، این نسبت در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری در اولین سال پس از آتش‌سوزی پایین‌تر بود. این کاهش احتمالاً به دلیل افزایش تدریجی کربن آلی خاک در سایت‌های تحت آتش‌سوزی بود. پایین بودن این نسبت به معنی کارایی کمتر استفاده از سویسترا-های آلی توسط بیومس میکروبی است (اندرسون، 2003). افزایش این شاخص در مقایسه با شاهد سه سال پس از آتش‌سوزی می‌تواند به دلیل رشد سریع جمعیت میکروبی خاک به خصوص گونه‌های فرصت‌طلب در نتیجه شرایط اقلیمی مناسب منطقه از جمله دمای پایین و معتدل و باران‌های پی در پی منطقه مورد بررسی باشد. مونوز-روجاس و همکاران (2016a) گزارش کردند این شاخص مهم بیولوژیک پنج سال پس از آتش‌سوزی در مقایسه با

در مقایسه همچنین می‌توان به یافته‌های مشابه در پژوهش دی‌آسکولی و همکاران (2005) اشاره کرد که گزارش کردند یک سال پس از آتش‌سوزی تنفس خاک در تیمارها کاهش یافت. از سوی دیگر، این نتایج در تضاد با یافته‌های فیورتو و همکاران (2005) است که گزارش کردند پس از آتش‌سوزی، تنفس پایه اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای تحت آتش‌سوزی و شاهد نداشت. همچنین بارسیناس-مورنو و همکاران (2011) گزارش کردند فوراً پس از آتش‌سوزی تنفس خاک افزایش یافت اما 32 ماه بعد به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت. وجود گزارش‌های متفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع اکوسیستم و به پیرو آن تفاوت در پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک قبل از آتش‌سوزی، شرایط اقلیمی، شدت آتش‌سوزی و شرایط بعد از آتش‌سوزی باشد (بارسیناس-مورنو و همکاران 2011).

اما همانطور که در نتایج مشاهده شد مقدار بالای کسر متابولیک (qCO_2) در تیمارهای یک و سه سال پس از آتش‌سوزی در مقایسه با شاهد نشان داد که این امر می‌تواند به تجزیه مواد آلی و حذف منابع باقی‌مانده‌های آلی نسبت داده شود (مونوز-روجاس و همکاران، 2016a). پژوهش‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد یک سال پس از آتش‌سوزی کسر متابولیکی خاک کاهش می‌یابد (بارسیناس-مورنو و همکاران، 2011 و دی-آسکولی و همکاران، 2005). با این حال گزارشی متضاد این یافته‌ها نیز وجود دارد (مونوز-روجاس و همکاران، 2016a). افزایش در کسر متابولیکی یک سال پس از آتش‌سوزی مخالف با یافته‌های هراندز و همکاران (1997) است که گزارش کردند 9 ماه پس از آتش‌سوزی تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آتش‌سوزی و شاهد وجود نداشت. البته مقایسه تیمارهای آتش‌سوزی با یکدیگر حاکی از نبود اختلاف معنی‌دار بین آنها از نظر کسر متابولیکی بود ولی وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای شاهد (C_3 با C_{10} و C_3 با C_{10}) نشان‌دهنده اختلاف ذاتی بین خاک‌های مکان‌های مورد بررسی در پیش از آتش‌سوزی بود. بنابراین بهتر است که مقایسه تیمارهای آتش‌سوزی با توجه به تغییراتی که نسبت به شاهد خود داشته‌اند انجام شود نه نسبت به هم. همچنین در این راستا نتایج این مطالعه در توافق با یافته‌های مونوز-روجاس و همکاران (2016a) است که گزارش کردند کسر متابولیکی یک سال پس از آتش‌سوزی در اوج خود بود اما پنج سال بعد روندی کاهشی داشت و به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت. ده سال پس از وقوع آتش‌سوزی کسر متابولیکی خاک به سطح قبل از آتش-

و فسفر خاک از مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که به زمانی بیشتر از ده سال برای بهبود به سطح قبل از آتش-سوزی نیاز دارند. نتایج نشان داد آتش‌سوزی در این جنگل‌ها اثرات مهمی بر این شاخص‌های بیولوژیک دارد. در خاک‌های تحت آتش‌سوزی، عناصر غذایی در نتیجه رسوب خاکستر برای میکروارگانیسم افزایش یافته که در نتیجه آن بهبود سریع بیومس میکروبی انجام شده. یافته-های مختلف درباره شاخص‌های میکروبی پیشنهاد می‌کند که متغیرهای میکروبیولوژیکی شاخص‌های حساس‌تری برای برآورد اثرات آتش‌سوزی هستند. نسبت کربن بیومس به کربن آلی خاک شاخصی مفید برای پیش‌وضعیت کربن آلی خاک است که شاخصی حساس‌تر از کربن آلی برای خاک‌های تحت آتش‌سوزی می‌باشد. در این مطالعه کسر میکروبی نسبت به کسر متابولیک، شاخص مهم‌تری در جداسازی گروه‌ها از یکدیگر بود (بر طبق نتایج آنالیز تشخیصی). مشخص گردید که در توافق با بسیاری از پژوهشگران که گذشت زمان‌های طولانی را برای بهبود تنفس خاک پس از آتش‌سوزی پیشنهاد کرده‌اند، این شاخص به مدتی بیش از ده سال برای بازگشت به سطح قبل از آتش‌سوزی نیاز دارد. بنابراین نتایج آنالیز تشخیصی که همه ویژگی‌ها و میزان تغییرات آنها را با هم تحلیل می‌کند، نشان می‌دهد که حتی با گذشت زمان‌های طولانی پس از آتش‌سوزی چه ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و چه ویژگی‌های میکروبی خاک به طور کامل به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود نیافته و سیستم خاک به زمانی فراتر از ده سال برای بهبود نیاز دارد.

فوراً و یک سال پس از آتش‌سوزی افزایش معنی‌دار یافت اما هفت سال بعد به سطحی تقریباً معادل فوراً و یک سال پس از آتش‌سوزی رسید و 14 سال بعد باز روندی افزایشی داشت. این شاخص ده سال بعد از آتش‌سوزی به سطح قبل از آتش‌سوزی بهبود یافت و تفاوتی در مقایسه با شاهد نشان نداد.

در این مطالعه، برخی شاخص‌های میکروبی تنها یک و سه سال پس از آتش‌سوزی دچار تغییرات شدند و برخی دیگر حتی پس از ده سال روندی کاهشی داشتند. براساس نتایج چند متغیره آنالیز تشخیصی، نشان داده شد که از بین ویژگی‌های میکروبی اندازه‌گیری شده برخی از آنها شامل کسر میکروبی، بیومس میکروبی، تنفس پایه و تنفس می‌توانند به عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها در جداسازی تیمارهای مربوط به زمان‌های پس از آتش-سوزی باشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقایسه تغییرات شاخص‌های فیزیکی-شیمیایی و میکروبی خاک در سال‌های پس از آتش‌سوزی انجام شد تا هم چگونگی پاسخ کوتاه‌مدت و بلندمدت هر یک از این شاخص‌ها تعیین شود و هم سهم هر یک از شاخص‌ها در جداسازی مناطق آتش‌سوزی شده در سال‌های مختلف مشخص شود. پس از آنالیزهای مختلف، مشخص گردید برخی شاخص‌های فیزیکی خاک دچار تغییرات نشدند و برخی دیگر به زمانی کمتر از ده سال برای بهبود نیاز داشتند. بیشتر شاخص‌های شیمیایی خاک در پایان ده سال به سطح قبل از آتش‌سوزی بازگشتند. از میان این ویژگی‌ها کربن آلی خاک، نیتروژن

فهرست منابع:

1. بهشتی آل آقا، ع.، ف. رئیسی و ا. گلچین. 1390. تأثیر تغییر کاربری اراضی از مرتع به زمین زراعی بر شاخص‌های میکروبیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 25 (3): 548-562.
2. Alef, K., and P. Nannipieri. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London, UK.
3. Anderson, T.H. 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 98:285-293.
4. Balota, E.L., A. Colozzi-Filho, D.S. Andrade, and R.P. Dick. 2003. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*. 38:15-20.
5. Bárcenas-Moreno, G., F. García-Orenes, J. Mataix-Solera, G. Mataix-Beneyto, and E. Baath. 2011. Soil microbial recolonisation after a fire in a Mediterranean forest. *Biology and Fertility of Soils*. 47(3):261-272.
6. Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.

7. Burke, R.A., R.G. Zepp, M.A. Tarr, W.L. Miller, and B.J. Stocks. 1997. Effect of fire on soil-atmosphere exchange of methane and carbon dioxide in Canadian boreal forest sites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 102:29289-29300.
8. Cerda, A., and S. Doerr. 2005. Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*. 14(4):423-437.
9. Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*. 143:1-10.
10. D'Ascoli, R., F.A. Rutigliano, R.A. De Pascale, A. Gentile, and A.V. De Santo. 2005. Functional diversity of the microbial community in Mediterranean maquis soils as affected by fires. *International Journal of Wildland Fire*. 14:355-363.
11. DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state of the art. USDA Forest Service General Technical Report PSW.
12. DeBano, L.F., D.G. Neary, and P.F. Ffolliott. 1998. *Fire's Effects on Ecosystems*. John Wiley and Sons, New York, 333 pp.
13. Doran, J.W., and M.R. Zeiss. 2000. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied soil ecology*. 15:3-11.
14. Dumontet, S., H. Dinel, A. Scopa, A. Mazzatura, and A. Saracino. 1996. Postfire soil microbial biomass and nutrient content of a pine forest soil from dunal Mediterranean environment. *Soil Biology and Biochemistry*. 28:1467-1475.
15. Fattahi, M., N. Ansari, H.R. Abbasi, and M. Khan Mohammadi. 2000. Management of Zagros forests (case study: Darbadam forests in province of Kermanshah, Iran). Basic study, No.240. Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, in Iranian. 474 pp.
16. Fernandez, I., A. Cabaneiro, T. Carballas. 1999. Carbon mineralization dynamics in soils after wildfires in two Galician forests. *Soil Biology and Biochemistry*. 31:1853-1865.
17. Fioretto, A., S. Papa, and A. Pellegrino. 2005. Effects of fire on soil respiration, ATP content and enzyme activities in Mediterranean maquis. *Applied Vegetation Science* 8:13-20.
18. Fisher, R F., and D. Binkley. 2000. *Ecology and management of forest soils*. New York, John Wiley and Sons.
19. Hernandez, T., C. Garcia, and I. Reinhardt. 1997. Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology and Fertility of Soils*. 25:109-116.
20. Holden, S.R., A. Gutierrez, and K.K. Treseder. 2013. Changes in Soil Fungal Communities, Extracellular Enzyme Activities, and Litter Decomposition across a Fire Chronosequence in Alaskan Boreal Forests. *Ecosystems*. 16:34-46.
21. Horwath, W.R., and E.A. Paul. 1994. Microbial biomass. P 753- 773, In: D.R. Buxton (Eds), *Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties*. SSSA Book Series, No.5. Madison, Wisconsin, USA.
22. Jenkinson, D.S., and J.N. Ladd. 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. P 415-471, In: A.E. Paul, J.N. Ladd (Eds), *Soil Biochemistry*. Dekker, New York.
23. Jiménez-González, M.A., J.M De la Rosa, N.T. Jiménez-Morillo, G. Almendros, J.A. González-Pérez, and H. Knicker. 2016. Post-fire recovery of soil organic matter in a Cambisol from typical Mediterranean forest in Southwestern Spain. *Science of the Total Environment*. 572:1414-1421.
24. Kara, O., and I. Bolat. 2007. Impact of alkaline dust pollution on soil microbial biomass carbon. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 31:181-187.
25. Kara, O., and I. Bolat. 2009. Short-term effects of wildfire on microbial biomass and abundance in black pine plantation soils in Turkey. *Ecological Indicators*. 9:1151-1155.

26. Luo, Y., and X. Zhou. 2010. *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, San Diego, CA, 316p.
27. Mabuhay, J.A., N. Nakagoshi, and Y. Isagi. 2006. Soil microbial biomass, abundance, and diversity in a Japanese red pine forest: first year after fire. *Journal of Forest Research*. 11:165-173.
28. Mack, M.C., K.K. Treseder, K.L. Manies, J.W. Harden, E.A. Schuur, J.G. Vogel, J.T. Randerson, and F.S. Chapin. 2008. Recovery of aboveground plant biomass and productivity after fire in mesic and dry black spruce forests of interior Alaska. *Ecosystems*. 11:209-25.
29. Marinari, S., R. Mancinelli, E. Campiglia, and S. Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*. 6:701-711.
30. Martinez-Salgado, M.M., V. Gutiérrez-Romero, M. Janssens, and R. Ortega-Blu. 2010. Biological soil quality indicators: a review. P 319-328, In: A. Mendez-Vilas (Eds), *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*. Formatex Research Center, Spain.
31. McLean, O.P. 1982. Soil PH and lime requirement. P 199-224, In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and biological properties*, Medison.
32. Muñoz-Rojas, M., T.E. Erickson, D. Martinia, K.W. Dixon, and D.J. Merritt. 2016a. Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. *Ecological Indicators*. 63:14-22.
33. Muñoz-Rojas, M., W. Lewandrowski, T.E. Erickson, K.W. Dixon, and D.J. Merritt. 2016b. Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: Effects of vegetation type and environmental factors. *Science of the Total Environment*. 572:1385-1394.
34. Neary, D.G., K.C. Ryan, and L.F. DeBano. 2005. *Wildland fire in ecosystems Effects of fire on soil and water*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-42-vol 4, Ogden, UT.
35. Pietikainen, J., and H. Fritze. 1995. Clear-cutting and prescribed burning in coniferous forest: comparison of effects on soil fungal and total microbial biomass, respiration activity and nitrification. *Soil Biology and Biochemistry*. 27:101-109.
36. Pourreza, M., S.M. Hosseini, A.A. Safari Sinegani, M. Matinizadeh, and W.A. Dick. 2014. Soil microbial activity in response to fire severity in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests, Iran, after one year. *Geoderma*. 213:95-102.
37. Pyne, S.J. 1984. *Introduction to wildland fire: fire management in the United States*. Wiley, New York.
38. QU, L., K. Ma, X. Xu, L. Wang, and K. Sasa. 2009. Effects of post-fire conditions on soil respiration in boreal forests with special reference to Northeast China forests. *Frontiers of Biology in China*. 4(2):180-186
39. Rawls, W.J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analyses and organic matter content. *Soil Science*. 135:123-125.
40. Rayment, G.E., and D.J. Lyons. 2011. *Soil Chemical methods—Australasia*. CSIRO Publishing, Australia.
41. Rey, A., E. Pegoraro, C. Oyonarte, A. Were, P. Escribano, and J. Raimundo. 2011. Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (*Stipa tenacissima* L.) semiarid ecosystem in the SE of Spain. *Soil Biology and Biochemistry*. 43:393-403.
42. Suman, A., M. Lal, A.K. Singh, and A. Gaur. 2006. Microbial biomass turnover in Indian subtropical soils under different sugarcane intercropping systems. *Agronomy Journal*. 98(3):698-704

43. Ulery, A.L., and R.C. Graham. 1993. Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Science Society of America Journal*. 57:135-140.
44. Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37:29-37.
45. Wang, X., H.S. He, X. Li, Y. Chang, Y. Hu, C. Xu, R. Bu, and F. Xie. 2006. Simulating the effects of reforestation on a large catastrophic fire burned landscape in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*. 225:82-93.
46. Watanabe, F.S., and S.R. Olsen. 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Science Society of America*. 29:677-678.
47. Wuthrich, C., D. Schaub, M. Weber, P. Marxer, and M. Conedera. 2002. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. *Catena*. 48:201-215.
48. Xiang, X., Y. Shi, J. Yang, J. Kong, X. Lin, H. Zhang, J. Zeng, and H. Chu. 2014. Rapid recovery of soil bacterial communities after wildfire in a Chinese boreal forest: *Scientific Reports*, 4p.

Comparing Some Physicochemical and Microbial Indices of Soil in Different Years after Fire in Zagros Forests in Paveh County

M. Sadeghifar, A. Beheshti Ale Agha¹, and M. Pourreza

M.Sc. Graduate student, Razi University; E-mail: mostafa.sadeghi29@yahoo.com

Assistant Professor, Razi University; E-mail: beheshti1969@yahoo.com

Assistant Professor, Razi University; pourreza@razi.ac.ir

Received: November, 2016 and Accepted: October, 2017

Abstract

With increase in fire frequency in the Zagros forests, long term and short term evaluation of soil quality is very important. In this study, changes in some physicochemical and microbial properties of soils were compared in short, medium and long-term after fire. For this purpose, three post-fire treatments were selected and labeled as TSF=1, TSF=3 and TSF=10 years after fire. In the nearest neighbor of each fire treatment a relevant unburned area was selected as the control and labeled as C1, C3 and C10, corresponding to the post-fire treatments. Soil sampling was performed from the depth of 0-20 cm in 4 replications. Overall, 24 composite soil samples were collected for post-fire treatments and their relevant controls. Some physicochemical and microbial properties were measured in soil samples. Results showed no changes in soil texture. Soil saturated moisture decreased for TSF=1, while it was recovered for TSF=3 and TSF=10. Soil bulk density decreased both in TSF=1 and TSF=3, while no changes were observed for TSF=10 compared to C10. There was a significant increase in soil pH, CEC, EC, and P for TSF=1 compared to C1. However, for TSF=3 and TSF=10, pH and CEC were recovered to the pre-fire level and soil P and EC were significantly lower than their controls. Soil organic carbon and N remained significantly lower than their control in all treatments. No significant change was observed in soil C:N ratio in any treatment. Microbial carbon biomass significantly decreased for TSF=1 compared to C1, while no significant changes were observed for TSF=3 and TSF=10 compared to C3 and C10, respectively. Soil induced respiration increased significantly for TSF=1, while it decreased significantly for TSF=3 and TSF=10 controls. Soil basal respiration significantly decreased in all post-fire treatments compared to their controls. Metabolic quotient significantly increased for TSF=1 and TSF=3, however, it recovered in TSF=10 to the pre-fire level. There was a significant decrease in microbial quotient for TSF=1, however, it increased significantly for TSF=3 and recovered to the pre-fire level for TSF=10. All the treatments were significantly discriminated using multivariate analysis (discriminant analysis). It was concluded that EC, N, CEC, and P were the most important physicochemical properties while microbial biomass carbon, basal and induced respiration, and microbial quotient were the most important microbial properties of soil for discriminating treatments.

Keywords: Microbial carbon biomass, Metabolic quotient, Soil respiration

¹ Corresponding author: Razi University, Department of Soil Science and Engineering, Kermanshah