

## بررسی تغییرات و امکان‌سنجی برآورد غیر مستقیم کربن آلی خاک مراتع پس از آتش‌سوزی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گنبد، همدان)

بهناز عطائیان<sup>۱\*</sup>، فاطمه تیموری نیاکان<sup>۱</sup>، بختیار فتاحی<sup>۱</sup> و وحید زندیه<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۳۰)

### چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر آتش‌سوزی مراتع منطقه گنبد همدان بر ذخیره کربن آلی خاک در دو منطقه شاهد و دچار آتش‌سوزی، پس از گذشت سه سال از آتش‌سوزی، و امکان‌سنجی کاربرد سنجش از دور در برآورد غیر مستقیم کربن خاک است. لذا پس از گذشت ۳ سال از زمان وقوع آتش‌سوزی ۲۰ نمونه خاک سطحی (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری) از منطقه آتش‌سوزی شده و ۲۰ نمونه از منطقه شاهد (در مجموع ۴۰ نمونه) به صورت سیستماتیک-تصادفی برداشت شد. تغییرات میزان کربن آلی، نیتروژن کل، اسیدیته و شوری خاک سطحی بین مناطق شاهد و آتش‌سوزی با استفاده از آزمون t مستقل مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به منظور بررسی رابطه خطی ذخیره کربن آلی خاک با سایر پارامترها از آزمون همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS v.26 استفاده شد. نتایج آزمون t مستقل تفاوت معنی‌داری در EC، اسیدیته و کربن آلی خاک دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی نشان نداد و صرفاً میزان نیتروژن کل خاک تفاوت معنی‌داری بین دو منطقه داشته است. نتایج در منطقه آتش‌سوزی نشان داد بین کربن آلی خاک و نیتروژن کل ارتباط مثبت معنی‌داری به میزان  $0/830$  ( $p < 0/01$ ) و با شاخص لختی خاک ارتباط منفی به میزان  $0/727$ - مشاهده شده است ( $p < 0/05$ ). در منطقه شاهد نیز بین کربن آلی و نیتروژن کل ارتباط مثبت معنی‌داری به میزان  $0/627$  مشاهده شد ( $p < 0/05$ ). نتایج پردازش تصاویر لندست ۸ (سنجنده OLI-TIRS) در منطقه آتش‌سوزی نشان داد بین کربن آلی خاک با شاخص روشنایی و شاخص خیزی حاصل از تسلدکپ ارتباط آماری معنی‌داری به ترتیب به میزان  $0/726$ - و  $0/674$  و مؤلفه PCI حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و  $0/724$ - مشاهده شد ( $p < 0/05$ ). این نتایج نشان می‌دهد امکان استفاده از تصاویر تسلدکپ جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک در مناطق آتش‌سوزی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره کربن آلی خاک، آتش‌سوزی، مرتع، شاخص‌های طیفی، همدان

۱. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: attaeian94@gmail.com

## مقدمه

نیترژن خاک را طی رخدادهای متوالی آتش‌سوزی بررسی کردند و کاهش ظرفیت نگهداری کربن در خاک این مناطق را گزارش کردند. این کاهش در مطالعه فرجی و همکاران (۱۱) در بررسی تأثیر آتش‌سوزی بر مراتع و ترسیب کربن خاک در مراتع استان آذربایجان شرقی نیز گزارش شده است. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که آتش‌سوزی می‌تواند باعث سوختن کل یا بخشی از ماده آلی خاک، تخریب ساختار خاک و از بین رفتن مواد مغذی از طریق فرسایش و آبشویی می‌شود (۲۰). آتش‌سوزی به‌طور چشم‌گیری بر چرخه مواد مغذی خاک تأثیر می‌گذارد. وقتی مواد مغذی موجود در ماده آلی خاک تحت درجه حرارت بالا قرار بگیرند، وارد فاز فعال شده و می‌توانند تغییراتی را در ماده آلی خاک ایجاد کنند. همچنین آتش‌سوزی باعث توزیع مجدد اشکال مختلف کربن در خاک شده و این تغییرات بر جوامع میکروبی و فرایندهای بیوشیمیایی تأثیر می‌گذارد و منجر بر تغییر کیفیت حاصلخیزی خاک تأثیر می‌شود (۱۴).

بررسی‌های میدانی علاوه بر محدودیت زمانی و مکانی، به‌دلیل هزینه‌های بالا و صرف زمان زیاد به‌عنوان عاملی محدود کننده در بررسی تأثیرات کوتاه مدت و بلند مدت آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک مراتع هستند. امروزه، روش‌های نوین که علاوه بر دقت بالا، از لحاظ هزینه و زمان مقرون به صرفه باشند، جایگاه ویژه در پایش مراتع دارند. یکی از روش‌ها و فناوری‌های نوین کاربردی، سنسجش از دور و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای است (۵۰). آتش‌سوزی با تأثیر بر مقدار ماده آلی خاک و تأثیر بر خصوصیات بازتابی خاک بر جذب و انتشار انرژی خورشید در سطح خاک تغییر ایجاد کرده و این تغییرات توسط سنسجش از دور قابل اندازه‌گیری است (۲۶). روش‌های مبتنی بر سنسجش از دور (Remote Sensing) تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان روشی سریع، مقرون به صرفه و غیر مخرب برای تخمین خصوصیات مختلف خاک از جمله کربن آلی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۴۹). عملکرد سنسجده‌های مورد استفاده در سنسجش از دور که انرژی را در طیف‌های نور مرئی

آتش‌سوزی مراتع در مناطق خشک و نیمه خشک سبب تخریب خصوصیات خاک و پوشش گیاهی می‌شود نابودی پوشش گیاهی مرغوب و فرسایش خاک مرتعی از جمله خسارات مالی و زیست‌محیطی آتش‌سوزی مراتع است. تغییر در خصوصیات خاک به شدت و تکرار آتش‌سوزی وابسته است و اثرات آن در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت قابل بررسی است. یکی از خصوصیات حائز اهمیت مراتع، ذخیره کربن آلی است که نشانگر وضعیت حاصلخیزی خاک و پتانسیل ترسیب کربن را نشان می‌دهد (۱۹). فرایند ترسیب کربن به‌بهبود کیفیت آب‌و‌خاک، افزایش حاصلخیزی، بهبود سیستم هیدرولوژی خاک و نیز جلوگیری از فرسایش و کاهش هدر رفت عناصر غذایی می‌انجامد، بنابراین مدیریت بهینه اکوسیستم‌های مختلف باید در جهت افزایش پتانسیل ترسیب کربن باشد (۴۸). با توجه به پیش‌بینی‌های اقلیمی و اثرات مکانی و زمانی متفاوت آن بر پدیده آتش‌سوزی، انتظار می‌رود با افزایش دما و شدت خشکسالی، فصل آتش‌سوزی گرم‌تر و طولانی‌تر شود (۱۷).

آتش‌سوزی‌ها تغییرات محسوسی در میزان ماده آلی خاک ایجاد می‌کنند. بطور مثال، ماده آلی خاک بلافاصله بعد از آتش‌سوزی با شدت بالا کاهش می‌یابد، در حالی که در آتش‌سوزی‌های با شدت کم، بقایای پوشش گیاهی منجر به افزایش ماده آلی خاک می‌شود (۵۳). در مطالعاتی که کاهش کمیت و کیفیت ماده آلی خاک در آتش‌سوزی‌های طبیعی با شدت بالا گزارش شده است، بازیابی سطح ماده آلی بیش از یک دهه گزارش شده است (۱۵). کی‌لی و همکاران (۲۲) شدت آتش‌سوزی را عامل مصرف و تجزیه مواد آلی در لایه سطحی و زیرسطحی خاک تعریف کردند. عمده‌ترین تغییراتی که در برخی اکوسیستم‌ها با شدت کم آتش‌سوزی گزارش شده است، کاهش تنفس میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک، افزایش pH و تغییر مقدار ماده آلی خاک است (۳۱). پلگرینی و همکاران (۳۵) تغییرات سالیانه آتش‌سوزی بر میزان کربن و

بختیاری به این نتیجه رسیدند که بین بازتاب باندها در بخش مادون قرمز و مقدار ماده آلی همبستگی قوی و معنی‌داری وجود دارد. فهمیده و همکاران (۱۳) اقدام به ارزیابی کارایی طیف‌سنجی انعکاسی برای تخمین مقدار کربن آلی خاک در حوزه آبخیز دریاچه زریبار در استان کردستان کردند. نتایج نشان داد توابع انتقالی خاکی در مقایسه با توابع انتقالی طیفی پیشنهادی دارای دقت بیشتری در برآورد کربن آلی خاک هستند. فاخری و همکاران (۱۲) در پژوهشی اقدام به برآورد ماده آلی خاک در منطقه سمیرم با استفاده از تصاویر ماهواره لندست کردند. آن‌ها گزارش کردند رابطه بین داده‌های به دست آمده از ماده آلی با شاخص‌های گیاهی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار بالاتر از ۷۰٪ بین شاخص‌های گیاهی و میزان ماده آلی خاک بوده است. لطفی و همکاران (۲۷) استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر Sentinel-2 در مدل‌سازی کربن آلی خاک با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی بهینه را مورد ارزیابی قرار داده و همبستگی اسپیرمن کربن آلی خاک با شاخص TSAVI را معادل ۰/۵۶۵ گزارش کردند. مزایای تصاویر ماهواره Sentinel-2 در بررسی تغییرات کربن آلی خاک و کارایی شاخص‌های طیفی مانند BI، BI2، GNDVI و SATVI در پیش‌بینی کربن آلی خاک نیز در مطالعات دیگر مورد تأیید قرار گرفته است (۱۶). داده‌های سنجنده ETM+ جهت تخمین میزان کربن آلی خاک در اراضی بایر حوضه آبریز ليقوان در شمال غرب ایران نیز گزارش شده است (۳۸).

این پژوهش به مطالعه و شناخت و درک بیشتر از روند تغییرات کربن خاک در اثر آتش‌سوزی در یک دوره میان‌مدت (بازه ۳ ساله) و همچنین بررسی میزان کارایی روش سنجنش از دور در تعیین مقدار و تغییرات کربن خاک پس از آتش‌سوزی مراتع حوزه زوجی گنبد، استان همدان می‌پردازد. بررسی آثار متأخر آتش بر ذخیره کربن خاک و برخی دیگر از ویژگی‌های شیمیایی خاک و امکان‌سنجی کاربرد سنجنش از دور در برآورد غیر مستقیم کربن خاک هدف اصلی این پژوهش است.

(Visible)، مادون قرمز نزدیک (Near Infrared) و مادون قرمز موج کوتاه (Shortwave Infrared) ثبت می‌کنند، بر اساس اصول فعل و انفعال انرژی و ماده است. تابش الکترومغناطیسی که بر روی سطح خاک تابیده می‌شود در طول موج‌های مختلفی بازتاب می‌شود (۳۳) و طیف‌سنجی نور مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه بر اساس ارتعاشات مشخص پیوندهای شیمیایی در مولکول‌ها انجام می‌شود (۲۸). با توجه به اینکه با افزایش مقدار ماده آلی خاک تیره‌تر به نظر می‌رسد، بنابراین بررسی بخش مرئی طیف الکترومغناطیس نیز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای تخمین ماده آلی خاک فراهم کند (۲۵). همچنین توزیع کربن آلی خاک با متغیرهای دیگری که می‌تواند از داده‌های سنجنش از دوری حاصل شوند، شامل شاخص‌های روشنایی، رطوبت و شرایط پوشش گیاهی و همچنین محصولات مدل‌های ارتفاع دیجیتال ارتباط قوی نشان داده است (۳۰). ساعتی و عطائیان (۴۲) در مطالعه‌ای به بررسی اثر آتش‌سوزی در مراتع بر تغییرات کربن آلی خاک با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر سنجنش از دور پرداختند. در بررسی همبستگی بین شاخص‌های طیفی و کربن آلی خاک مشخص شد تنها شاخص HI با کربن آلی خاک در سایت شاهد معنی‌دار بوده است، اما در سایت دچار آتش‌سوزی هیچ‌گونه همبستگی مشاهده نشده است. این امر را می‌توان به بررسی طیف طول موج‌های مرئی آبی و سبز در رابطه ریاضی این شاخص بررسی کرد، زیرا تنها در این شاخص از طیف طول موج سبز و آبی استفاده شده است. با توجه به نتایج سایر محققین به نظر می‌رسد تخمین کربن آلی خاک با استفاده از سنجنش از دور دارای پیچیدگی‌های خاصی است. از آنجاکه کربن آلی خاک با بیشترین تأثیر خود را بر روی رنگ خاک می‌گذارد، لذا اگر مقدار آن کم باشد با استفاده از سنجنش از دور امکان تخمین آن ضعیف است. محمدی فارسانی و همکاران (۲۹) در پیش‌بینی مقدار ماده‌آلی و توزیع اندازه ذرات خاک در کاربری‌های مختلف در حوضه آبخیز بارده استان چهارمحال و

## مواد و روش‌ها

## مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان همدان واقع شده است و بخشی از مراتع ناحیه صنعتی گنبد همدان با مساحتی برابر با ۴۴۷/۶۹ هکتار است. متوسط بارندگی سالانه منطقه بر اساس داده‌های آمار ۲۰ ساله ایستگاه باران‌سنجی واقع در روستای گنبد ۳۹۶/۸ میلی متر گزارش شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان). این ناحیه از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱۳ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۴۱ دقیقه و ۱۳ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۵ ثانیه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). متوسط درجه حرارت منطقه بر اساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک سد اکباتان ۱۱/۲ درجه سانتی‌گراد بوده که گرم‌ترین ماه سال مرداد و سردترین ماه سال بهمن ماه است آتش‌سوزی در مهر ۹۷ با دمای ۶۰ درجه در منطقه رخ داده است (۴۱).

این پژوهش به منظور بررسی تغییرات کربن آلی خاک در دو سایت شاهد (بدون آتش‌سوزی) و دچار آتش‌سوزی شده در مراتع ناحیه گنبد شهرستان همدان پس از گذشت ۳ سال از زمان آتش‌سوزی است. بدین منظور ۲۰ نمونه خاک از منطقه آتش‌سوزی شده و ۲۰ نمونه از منطقه شاهد (در مجموع ۴۰ نمونه) به صورت سیستماتیک-تصادفی برداشت شد. این نمونه‌ها پس از آماده‌سازی بستر خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک سطحی برداشت شدند و نقاط نمونه‌برداری دقیقاً منطبق بر نقاط نمونه‌برداری انجام شده در مطالعه ساعتی و عطائیان (۴۲) (پس از وقوع آتش‌سوزی) بوده است. نمونه خاک‌ها پس از الک ۲ میلی‌متری و هوا خشک شدن جهت مراحل بعدی به آزمایشگاه علوم مرتع دانشگاه ملایر منتقل شدند. میزان کربن آلی، نیتروژن کل، اسیدیته و شوری خاک سطحی با روش‌های آزمایشگاهی (والکی-بلک و کلدال) و تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های محاسبه شده از داده‌های طیفی با آزمون همبستگی پیرسون اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور ارزیابی قابلیت داده‌های مبتنی بر سنجش از دور از تصاویر ماهواره لندست ۸ در سال‌های ۲۰۱۶ (شروع آتش‌سوزی) و ۲۰۱۹ (سه سال پس از

گذشت آتش‌سوزی) استفاده شد. آنالیز همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دور و داده‌های میدانی و آزمون تی تست جهت تعیین تغییرات معنی‌داری بین دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی در نرم‌افزار SPSS v.26 انجام شد.

## پردازش اطلاعات سنجش از دوری

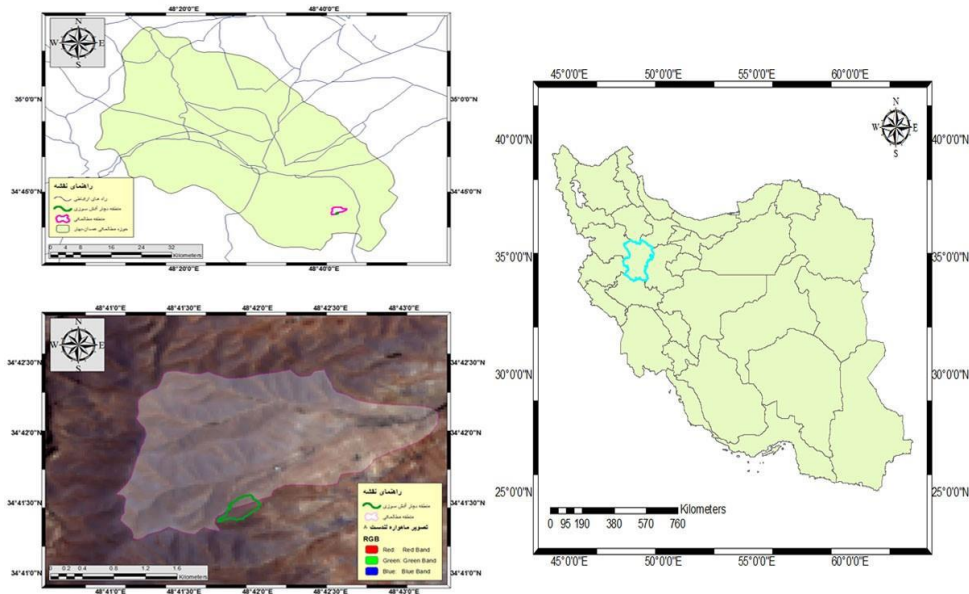
به منظور بررسی تغییرات کربن آلی خاک و برآورد غیرمستقیم آن در دو منطقه آتش‌سوزی و شاهد علاوه بر برداشت میدانی از تصاویر ماهواره لندست ۸، سنجیده‌های OLI و TIRS استفاده شد (جدول ۱). به دلایل، در دسترس بودن تصاویر، دارا بودن باندهای انعکاسی، پانکروماتیک و مادون قرمز حرارتی و قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب از این ماهواره استفاده شد.

پیش‌پردازش تصاویر شامل تصحیح اتمسفری و رادیومتریک و سپس تجزیه مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis) جهت فشرده‌سازی و در نتیجه کاهش ابعاد و نویز داده‌ها انجام شد. پس از انجام تصحیحات، به منظور بررسی تغییرات طیفی کربن آلی خاک سطحی از داده‌های سنجنده OLI جهت محاسبه شاخص‌های طیفی استفاده شد. از آنجایی که میزان کربن آلی بر رنگ و میزان رطوبت خاک تأثیرگذار است، در این تحقیق شاخص‌هایی که عمدتاً تغییرات رنگ خاک را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهند و مبتنی بر خط خاک هستند مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲). تبدیل تسلدکپ نیز جهت آشکارسازی تغییرات بر اساس باندهای روشنایی، سبزی‌نگی و رطوبت (نمناکی) انجام گرفت. تجزیه و تحلیل‌های فوق با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI v.5.3.1 و ArcGIS v.10.5 انجام شد (۳).

## نتایج

## کربن آلی و سایر خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج این مطالعه بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار کربن آلی خاک سطحی منطقه در اثر آتش‌سوزی است. هرچند افزایش ۰/۴ درصدی در میانگین درصد کربن آلی منطقه آتش‌سوزی شده مشاهده می‌شود (جدول ۴، جدول ۶) اما این تفاوت از نظر



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (تصویر رنگی حقیقی باندهای اصلی ماهواره لندست ۸)

جدول ۱. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره	سنجنده	مسیر عبور	ردیف	تاریخ شمسی ثبت تصویر	تاریخ میلادی ثبت تصویر
لندست ۸	OLI-TIRS	۱۶۶	۳۶	۱۳۹۵	۲۰۱۶
لندست ۸	OLI-TIRS	۱۶۶	۳۶	۱۳۹۸	۲۰۱۹

جدول ۲. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در مطالعه حاضر

معادله	نام شاخص	علامت شاخص	ردیف
$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Normalized Burned Ratio	NBR	۱
$(NIR - Red) / (NIR + Red)$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	۲
$(NIR - a Red - b) / \sqrt{1 + a^2}$	Perpendicular. Vegetation Index	PVI	۳
$(2 * RED - Green - Blue) / (Green - Blue)$	Hue Index	HI	۴
$NIR - a Red$	Weighted Difference Vegetaion Index	WDVI	۵
$a(NIR - a Red - b) / (Red + a(NIR - b) + X(a + a^2))$	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	TSAVI	۶
$1.5 * ((NIR - Red) / \sqrt{NIR^2 + Red + 0.5})$	Transformed Difference Vegetation Index	TDVI	۷
$Blue / Red * Green$	Soil Organic Carbon Index	SOCI	۸
$\sqrt{((Red^2) + (Green^2)) / 2}$	Brightness Index	BI	۹
$(NIR - 2 * Red) + Blue) / (NIR + (2 * Red) + Blue)$	Atmospherically resistant vegetation index	ARVI	۱۰

ارتباط آماری معنی داری مشاهده نشد. بررسی آماری خطی ارتباط منفی معنی داری بین EC با شاخص روشنایی BI آشکار ساخت ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/690$ ).

### همبستگی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد

نتایج خصوصیات خاک و شاخص‌های سنجش از دوری محاسبه شده در منطقه شاهد در جدول ۶ نمایش داده شده است. ارتباط خطی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون بررسی شد (جدول ۷). کربن آلی خاک صرفاً با میزان نیتروژن کل همبستگی مثبت و معنی داری نشان داد ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/627$ ). و با سایر پارامترها و شاخص‌ها رابطه معنی داری در منطقه شاهد مشاهده نشد (جدول ۷). این نتیجه در خصوص درصد نیتروژن کل خاک منطقه شاهد نیز مشاهده شد و این پارامتر با هیچ‌یک از شاخص‌های محاسبه شده رابطه معنی داری نشان نداد (جدول ۷). همچنین، مقادیر هدایت الکتریکی و اسیدیته در این منطقه رابطه معنی داری نشان ندادند و صرفاً اسیدیته خاک منطقه شاهد با شاخص‌های TSAVI و NDVI ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/651$ ) همبستگی مثبت معنی داری نشان داد ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/635$ ) (جدول ۷).

### همبستگی تصاویر تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی PCA با پارامترهای شیمیایی خاک

نتایج حاصل از استخراج تصاویر تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی و پارامترهای شیمیایی خاک در جدول ۸ خلاصه شده است. بررسی نتایج آزمون همبستگی پیرسون پارامترهای شیمیایی خاک در منطقه آتش‌سوزی با تصاویر حاصل از تجزیه و تحلیل آماری PCA و تسلدکپ (جدول ۹) بیانگر رابطه خطی منفی معنی دار بین کربن آلی خاک با شاخص روشنایی Brightness تسلدکپ ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/726$ ) و تصویر PC1 حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/724$ ) و ارتباط خطی مثبت معنی دار با شاخص رطوبت Wetness ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/674$ ) ارتباط خطی مثبت است. هدایت الکتریکی خاک با

آماری معنی دار نیست (جدول ۳). آنالیز آماری تغییرات میانگین هدایت الکتریکی و اسیدیته در دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی نیز در جدول زیر خلاصه شده است. نتایج بیانگر عدم تغییرات معنی داری هدایت الکتریکی، اسیدیته خاک بین منطقه شاهد و آتش‌سوزی بعد از گذشت سه سال از وقوع آتش‌سوزی در حوزه آبخیز گنبد است (جدول ۳). تغییرات نیتروژن خاک سطحی بین منطقه آتش‌سوزی و شاهد معنی دار بود (جدول ۳). بطوریکه میانگین درصد نیتروژن خاک سطحی در منطقه شاهد برابر  $0/14$  و در منطقه آتش‌سوزی شده معادل  $0/20$  درصد مشاهده شد. در تغییرات شاخص نسبت کربن به نیتروژن خاک (C/N) تفاوت معنی داری در دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی مشاهده نشد (جدول ۳).

### همبستگی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه آتش‌سوزی

خلاصه نتایج خصوصیات خاک و استخراج شاخص‌های سنجش از دوری در منطقه آتش‌سوزی در جدول ۴ نمایش داده شده است. همچنین، ارتباط خطی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون بررسی شد (جدول ۵). میزان درصد کربن آلی خاک ارتباط خطی قوی و معنی داری با هدایت الکتریکی ( $p \leq 0/01$ ) ( $r = 0/896$ )، اسیدیته ( $p \leq 0/01$ ) ( $r = -0/782$ ) و درصد نیتروژن خاک ( $p \leq 0/01$ ) ( $r = 0/830$ ) در منطقه آتش‌سوزی نشان داد (جدول ۵). تنها شاخص طیفی محاسبه شده که ارتباط خطی قوی با کربن آلی نشان داد شاخص روشنایی BI است که همبستگی منفی معنی داری به میزان  $-0/727$  مشاهده شد ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/727$ ). درصد نیتروژن کل خاک علاوه بر ارتباط معنی دار با کربن آلی، همبستگی منفی معنی داری با میزان اسیدیته ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/687$ ) و مثبت معنی داری با هدایت الکتریکی خاک ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/695$ ) نشان داد. درصد نیتروژن ارتباط معنی داری با شاخص‌های طیفی محاسبه شده نشان نداد (جدول ۵). بین میزان مقادیر EC و pH خاک

جدول ۳. اطلاعات توصیفی تغییرات خصوصیات شیمیایی خاک در دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی

متغیر	درجه آزادی	میانگین $\pm$ انحراف معیار	t	سطح معنی‌داری
هدایت الکتریکی	۱۸	۰/۱۸۹ $\pm$ ۰/۸۰۵	۰/۳۴۹	۰/۷۳۱
اسیدیته	۱۸	۷/۷۹۵ $\pm$ ۰/۱۱۱	-۰/۱۹۸	۰/۸۴۵
کربن آلی (درصد)	۱۸	۱/۲۷ $\pm$ ۰/۵۱۸	۱/۵۹	۰/۱۲۷
نیتروژن (درصد)	۱۸	۰/۱۷۴ $\pm$ ۰/۰۵۷	۲/۱۹	۰/۰۴۲*
C/N	۱۸	۱/۰۶ $\pm$ ۰/۰۳۸	-۰/۶۹۹	۰/۴۹۴

\* بیانگر معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ است.

جدول ۴. اطلاعات توصیفی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه آتش‌سوزی

شاخص‌ها و پارامترها	میانگین	انحراف استاندارد	تعداد نمونه
هدایت الکتریکی	۰/۷۹۰۰	۰/۱۵۹۵۱	۱۰
اسیدیته	۷/۷۹۰۰	۰/۰۹۹۴۴	۱۰
کربن آلی	۱/۴۶۰۰	۰/۶۳۴۵۶	۱۰
نیتروژن	۰/۲۰۳۰	۰/۰۶۹۴۵	۱۰
WDVI	۰/۱۱۴۲۲	۰/۰۰۸۶۲۰	۱۰
TSAVI	۰/۱۹۷۹۳	۰/۰۱۵۴۴۲	۱۰
TDVI	۰/۰۹۳۸۱	۰/۰۱۰۳۰۶	۱۰
SOCI	۰/۱۰۶۷۸	۰/۰۰۳۵۶۹	۱۰
PVI	۰/۰۵۷۳۰	۰/۰۰۷۲۱۹	۱۰
NDVI	۰/۱۳۱۹۶	۰/۰۱۰۲۹۴	۱۰
NBR	۰/۰۲۰۹۱	۰/۰۰۷۴۸۱	۱۰
HI	۵/۵۷۳۸۴	۰/۵۸۴۸۴۰	۱۰
BI	۰/۲۸۷۸۶	۰/۰۱۵۸۳۱	۱۰
ARVI	۰/۰۱۱۶۴	۰/۰۰۴۳۸۰	۱۰

جدول ۵. همبستگی پیرسون شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه آتش‌سوزی

NBR	NDVI	PVI	SOCI	TDVI	TSAVI	WDVI	نیتروژن	کربن آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی
									۱	هدایت الکتریکی
									-۰/۵۶۷	اسیدیته
								۱	-۰/۷۸۲**	۰/۸۹۶**
							۱	۰/۸۳۰**	-۰/۶۸۷*	۰/۶۹۵*
						۱	-۰/۵۴۱	-۰/۶۲۹	۰/۵۰۱	-۰/۵۹۶
					۱	۰/۸۳۳**	-۰/۲۳۶	-۰/۲۸۲	۰/۳۴۰	-۰/۲۵۷
				۱	۰/۹۵۴**	۰/۹۶۰**	-۰/۴۱۱	-۰/۴۸۵	۰/۴۴۵	-۰/۴۵۵
			۱	-۰/۳۴۱	-۰/۵۶۰	-۰/۱۱۳	-۰/۱۱۹	-۰/۱۳۸	-۰/۱۷۵	-۰/۲۲۵
		۱	-۰/۱۱۳	۰/۹۶۰**	۰/۸۳۳**	۱/۰۰۰**	-۰/۵۴۱	-۰/۶۲۹	۰/۵۰۱	-۰/۵۹۶
	۱	۰/۸۳۳**	-۰/۵۶۰	۰/۹۵۴**	۱/۰۰۰**	۰/۸۳۳**	-۰/۲۳۶	-۰/۲۸۲	۰/۳۴۰	-۰/۲۵۷
۱	۰/۴۲۶	۰/۲۲۳	-۰/۳۷۳	۰/۳۴۰	۰/۴۲۶	۰/۲۲۳	-۰/۳۰۱	-۰/۰۹۱	۰/۱۷۵	-۰/۱۰۶
۰/۲۲۱	-۰/۱۸۸	-۰/۶۶۲*	-۰/۶۰۱	-۰/۴۵۱	-۰/۱۸۸	-۰/۶۶۲*	۰/۵۱۸	۰/۵۹۷	-۰/۳۷۲	۰/۵۳۳
۰/۰۷۴	۰/۶۲۹	۰/۹۵۴**	۰/۱۴۰	۰/۸۳۳**	۰/۶۲۹	۰/۹۵۴**	-۰/۶۳۲	-۰/۷۲۷*	۰/۵۱۶	-۰/۶۹۰*
۰/۴۴۳	۰/۴۴۸	-۰/۰۵۷	-۰/۵۲۴	۰/۱۹۹	۰/۴۴۸	-۰/۰۵۷	۰/۴۸۰	۰/۵۲۱	-۰/۳۲۸	۰/۴۲۲

جدول ۶. اطلاعات توصیفی شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد

تعداد نمونه	انحراف استاندارد	میانگین	شاخص‌ها و پارامترها
۱۰	۰/۲۲۰۱۰	۰/۸۲۰۰	هدایت الکتریکی
۱۰	۰/۱۲۴۷۲	۷/۸۰۰۰	اسیدیته
۱۰	۰/۴۰۲۲۲	۱/۰۸۰۰	کربن آلی
۱۰	۰/۰۴۶۷۳	۰/۱۴۵۰	نیتروژن
۱۰	۰/۰۱۱۰۸	۰/۱۱۰۰	WDVI
۱۰	۰/۰۲۰۵۰	۰/۲۱۸۲	TSAVI
۱۰	۰/۰۱۳۳۱	۰/۰۹۷۳	TDVI
۱۰	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۹۹۰	SOCI
۱۰	۰/۰۰۹۲۸	۰/۰۵۳۷	PVI
۱۰	۰/۰۱۳۶۷	۰/۱۴۵۵	NDVI
۱۰	۰/۰۰۶۶۲	۰/۰۰۶۷	NBR
۱۰	۱/۱۱۲۳۷	۷/۱۸۱۳	HI
۱۰	۰/۰۲۰۳۴	۰/۲۶۷۰	BI
۱۰	۰/۰۰۷۲۰	۰/۰۲۴۴	ARVI



جدول ۷. همبستگی پیرسون شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد

ARVI	BI	HI	NBR	NDVI	PVI	SOCI	TDVI	TSAVI	WDVI	نیترژن	کربن آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی	
													۱	
														اسیدیته
														۱
														کربن آلی
														۱
														نیترژن
														۱
														WDVI
														۱
														TSAVI
														۱
														TDVI
														۱
														SOCI
														۱
														PVI
														۱
														NDVI
														۱
														NBR
														۱
														HI
														۱
														BI
														۱
														ARVI
														۱

جدول ۸. اطلاعات توصیفی تصاویر تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی با پارامترهای شیمیایی خاک منطقه آتش سوزی

شخصها و پارامترها	میانگین	انحراف استاندارد	تعداد نمونه
هدایت الکتریکی	۰/۷۹۰۰	۰/۱۵۹۵۱	۱۰
اسیدیته	۷/۷۹۰۰	۰/۰۹۹۴۴	۱۰
کربن آلی	۱/۴۶۰۰	۰/۶۳۴۵۶	۱۰
نیترژن	۰/۲۰۳۰	۰/۰۶۹۴۵	۱۰
Brightness	۰/۳۶۴۰۵	۰/۰۱۴۷۴۳	۱۰
Greeness	-۰/۰۹۷۰۱	۰/۰۰۲۷۸۷	۱۰
Wetness	-۰/۲۰۴۹۹	۰/۰۱۵۷۹۸	۱۰
PC1	۰/۰۳۵۵۹	۰/۰۲۳۱۶۲	۱۰
PC2	-۰/۰۰۳۵۴	۰/۰۰۵۰۹۹	۱۰
PC3	-۰/۰۰۵۷۷	۰/۰۰۳۶۴۸	۱۰

جدول ۹. همبستگی پیرسون تصاویر حاصل از تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی با پارامترهای شیمیایی خاک منطقه آتش سوزی

هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربن آلی	نیترژن	Brightness	Greeness	Wetness	PC1	PC2	PC3
۱									
اسیدیته	۱								
کربن آلی	۰/۸۹۶**	۱							
نیترژن	۰/۶۹۵*	۰/۶۸۷*	۱						
Brightness	۰/۷۰۶*	۰/۴۴۱	۰/۷۲۶*	۱					
Greeness	۰/۳۸۲	۰/۰۲۱	۰/۳۲۰	۰/۱۹۱	۱				
Wetness	۰/۶۲۹	-۰/۵۱۶	۰/۶۷۴*	۰/۵۵۹	۰/۳۷۵	۱			
PC1	-۰/۶۹۷*	۰/۴۸۵	-۰/۷۲۴*	-۰/۵۹۹	۰/۹۸۵**	-۰/۹۵۶**	۱		
PC2	-۰/۰۷۷	-۰/۲۳۱	-۰/۰۱۲	-۰/۰۶۷	۰/۰۸۴	۰/۳۶۳	-۰/۰۸۵	۱	
PC3	۰/۱۵۳	-۰/۲۱۸	۰/۲۰۸	۰/۲۸۳	-۰/۳۱۰	۰/۵۹۱	-۰/۳۸۶	۰/۶۴۵*	۱

تسلدکپ رطوبت ( $p \leq 0/01$ ) ( $r = -0/956$ ) برقرار می‌کند. داده‌های حاصل از استخراج تصاویر تسلدکپ و PCA و پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد در جدول ۱۰ خلاصه شده است. بررسی نتایج آزمون همبستگی پیرسون پارامترهای شیمیایی خاک در منطقه آتش سوزی با تصاویر حاصل از تجزیه و تحلیل آماری PCA و تسلدکپ بیانگر عدم رابطه معنی دار

شاخص روشنایی حاصل از تسلدکپ ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/706$ ) و تصویر PC1 حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی با شاخص رطوبت ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/697$ ) همبستگی منفی معنی‌داری نشان داد. با توجه به نتایج حاصل بنظر می‌رسد تصویر مؤلفه اصلی PC1 ارتباط قوی و مثبت با شاخص تسلدکپ روشنایی ( $r = 0/985$ ) ( $p \leq 0/01$ ) و ارتباط قوی و منفی با شاخص

جدول ۱۰. اطلاعات توصیفی تصاویر حاصل از تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی با پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد

شاخص‌ها و پارامترها	میانگین	انحراف استاندارد	تعداد نمونه
هدایت الکتریکی	۰/۸۲۰۰	۰/۲۲۰۱۰	۱۰
اسیدیته	۷/۸۰۰۰	۰/۱۲۴۷۲	۱۰
کربن آلی	۱/۰۸۰۰	۰/۴۰۲۲۲	۱۰
نیترژن	۰/۱۴۵۰	۰/۰۴۶۷۳	۱۰
Brightness	۰/۳۰۷۱۶	۰/۰۱۱۹۴۸	۱۰
Greenness	-۰/۰۸۸۹۹	۰/۰۰۲۴۱۶	۱۰
Wetness	-۰/۱۵۹۲۲	۰/۰۲۱۱۶۹	۱۰
PC1	-۰/۰۴۴۶۳	۰/۰۲۴۳۵۹	۱۰
PC2	-۰/۰۱۱۴۳	۰/۰۱۱۴۹۰	۱۰
PC3	-۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۱۷۹۶	۱۰

بین کربن آلی خاک و تصاویر حاصل از تجزیه و تحلیل آماری PCA و تسلدکپ بوده است (جدول ۱۱). در این بررسی صرفاً ارتباط خطی منفی اسیدیته خاک با شاخص روشنایی تسلدکپ ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/730$ ) و PC1 حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = -0/652$ ) و ارتباط خطی مثبت نیترژن کل با شاخص سبزی‌نگی Greenness حاصل از تسلدکپ ( $p \leq 0/05$ ) ( $r = 0/713$ ) مشاهده شد.

### بحث و نتیجه‌گیری

بازیابی کربن آلی خاک پس از آتش‌سوزی یکی از اولویت‌های کاهش تخریب زمین، حفاظت کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم است. مطالعات زیادی اقدام به بررسی اثرات رخدادهای آتش‌سوزی بر تغییرات ذخیره کربن و ماده آلی خاک در شرایط مختلف اکولوژیکی کرده‌اند (۳۲، ۳۴، ۳۹). در این مطالعه به رغم مطالعات گذشته، اثر معنی‌دار آتش‌سوزی بر مقدار کربن آلی خاک سطحی پس از گذشت ۳ سال از وقوع آتش‌سوزی مشاهده نشد. همچنین تغییرات معنی‌دار ذخیره کربن آلی بر اثر آتش‌سوزی بلافاصله بعد از وقوع آتش‌سوزی نیز گزارش نشده است (۴۲). هرچند آتش‌سوزی می‌تواند هدر رفت کربن آلی خاک را با تغییر خواص فیزیکوشیمیایی ماده آلی

خاک و تغییر در سرعت تجزیه افزایش دهد (۳۴)، اما پارامترهای مختلفی مانند شرایط محیطی، نوع پوشش گیاهی و مدیریت بر تغییرات ذخیره کربن آلی خاک مراتع بر این تغییرات مؤثر هستند. از طرفی ذخایر مختلف کربن آلی مانند کربن آلی محلول، کربن آلی و تنفس میکروبی در خاک واکنش‌های متفاوتی نسبت به پدیده آتش‌سوزی دارند (۱). به‌طور مثال آتش‌سوزی با افزایش مرگ و میر میکروارگانیسم‌های خاک منجر به کاهش جمعیت قارچ‌ها و در نتیجه کاهش سرعت تجزیه مواد آلی سلولزی و مقاوم می‌شود (۲). از طرفی افزایش میزان کربن پیروژنیک خاک در اثر احتراق ناقص که به‌عنوان بیوچار، کربن سیاه یا دوده شناخته می‌شود، تغییرات مهمی در میزان کربن آلی نهایی ایجاد می‌کند و جایگزینی برای هدررفت کربن آلی پس از آتش‌سوزی به شمار می‌آید (۲۲). به عبارتی، ترکیب شیمیایی مواد آلی قبل از وقوع آتش‌سوزی (۱۵، ۴۶) و شدت آتش‌سوزی (۱۸) نقش مهمی در تغییرات ذخیره کربن آلی خاک دارد لذا، تغییرات کربن آلی خاک غیرقابل پیش‌بینی است و ممکن است پس از گذشت چند سال از آتش‌سوزی افزایش، کاهش یا بدون تغییر باقی بماند (۷).

تغییرات کربن آلی و سایر خصوصیات خاک پس از آتش‌سوزی عمدتاً در چند سانتی‌متری سطح بالای خاک مشاهده می‌شود (۳۶).

جدول ۱۱. همبستگی پیرسون تصاویر حاصل از تسلدکپ و تجزیه مؤلفه اصلی با پارامترهای شیمیایی خاک منطقه شاهد

PC3	PC2	PC1	Wetness	Greeness	Brightness	نیترژن	کربن آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی	هدایت الکتریکی
									۱	هدایت الکتریکی
								۱	-۰/۰۸۱	اسیدیته
							۱	-۰/۰۲۲	۰/۲۹۴	کربن آلی
						۱	۰/۶۲۷*	۰/۳۴۳	۰/۰۴۳	نیترژن
					۱	-۰/۴۵۱	-۰/۱۹۳	-۰/۷۳۰*	۰/۰۷۵	Brightness
				۱	-۰/۵۳۲	۰/۷۱۳*	۰/۴۶۱	۰/۳۵۵	۰/۳۲۵	Greeness
			۱	-۰/۱۶۹	-۰/۷۰۲*	-۰/۰۳۵	-۰/۰۸۸	۰/۵۳۴	-۰/۲۶۱	Wetness
		۱	-۰/۹۵۵**	-۰/۱۲۲	۰/۸۷۹**	-۰/۱۶۸	-۰/۰۳۴	-۰/۰۶۵۲*	۰/۱۸۴	PC1
	۱	-۰/۶۴۸*	۰/۸۴۲**	-۰/۶۲۶	-۰/۲۰۸	-۰/۳۹۲	-۰/۲۵۶	۰/۱۷۹	-۰/۲۸۹	PC2
۱	۰/۲۹۲	-۰/۳۳۷	۰/۳۹۱	-۰/۳۶۶	-۰/۲۸۵	-۰/۰۳۵	-۰/۳۰۶	۰/۳۱۰	-۰/۵۲۹	PC3

نیز افزایش اسیدیته خاک پس از گذشت چند سال از آتش‌سوزی را به میزان اندک مشاهده کرده‌اند (۳۱، ۳۴). با توجه به اینکه خاک یک بافر قدرتمند است و تغییرات pH آن به آسانی رخ نمی‌دهد از این رو با وقوع آتش‌سوزی‌های با شدت کم و در مدت زمانی کوتاه، تغییرات قابل توجهی در pH خاک مشاهده نمی‌شود (۱۸، ۴۲).

بررسی میزان نیترژن کل در دو منطقه مورد بررسی بیانگر تفاوت معنی‌داری آن پس از گذشت سه سال بوده و میزان نیترژن منطقه آتش‌سوزی افزایش یافته است. این نتایج با یافته‌های دیگر که افزایش میزان نیترژن کل پس از آتش‌سوزی را گزارش کردند یکسان بوده است، این افزایش در برخی مناطق تا ۴ برابر منطقه شاهد نیز گزارش شده است (۵۱). برخی بررسی‌ها نشان داده است که افزایش میزان نیترژن صرفاً در لایه سطحی خاک قابل مشاهده است و لایه‌های عمقی که کمتر در معرض آتش قرار می‌گیرند، تغییری نداشته است (۱۵). مشخص شده است پس از آتش‌سوزی نیترژن آمونیاکی ( $\text{NH}_4^+$ ) در نتیجه رهایی از مواد آلی تخریب شده در طی آتش‌سوزی، افزایش فعالیت زیستی بخش هتروتروف خاک و تثبیت N توسط هم‌زیست‌های گیاهانی که به تازگی مستقر شده‌اند، افزایش داشته است (۳۶). افزایش همراه با تأخیر در میزان

دمای خاک در اعماق پائین‌تر از لایه ۵ سانتی‌متری اول خاک تقریباً هرگز از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فراتر نمی‌رود (۴۷). به همین دلیل تمرکز مطالعات مربوط به اثرات آتش‌سوزی بر خصوصیات خاک مربوط به خاک سطحی است به‌عنوان مثال، حرارت آتش با افزایش pH خاک و تجمع کربن محلول که رشد میکروارگانیسم‌ها را تحریک کرده و منجر به افزایش تجزیه عناصر می‌شود (۵۲). در این مطالعه تغییراتی در میزان اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک بر اثر آتش‌سوزی مشاهده نشد. این نتایج با یافته‌های دای و همکاران (۹)، ساعتی (۴۱) و ژان (۵۳) در یک راستا بوده است؛ اما با نتایج زیمزیچ و همکاران (۸) و مقدس و همکاران (۳۲) متفاوت بوده است. در واقع پس از وقوع سه سال از آتش‌سوزی تأثیر آتش به نحوی نبوده است که منجر به تغییر در میزان pH و EC خاک شود. یکی از دلایل این امر دانه‌ای بودن خاک منطقه است و شاید مدت کوتاه سه سال برای مشاهده تغییرات کافی نباشد. مویا و همکاران گزارش کردند. در آتش‌سوزی‌های با شدت کم کاهش تنفس میکروبی، فعالیت آنزیمی و افزایش pH خاک گزارش شده است (۳۱). شریفی و همکاران (۴۵) گزارش کردند پس از سه سال از وقوع آتش‌سوزی میزان EC در خاک سطحی مناطق جنگلی افزایش داشته است (۴۵). سایر محققین

آماری PCA و تسلدکپ نشان داد هیچ‌گونه ارتباط آماری بین آن‌ها مشاهده نشده است. بررسی نتایج آزمون همبستگی پیرسون پارامترهای شیمیایی خاک در منطقه آتش‌سوزی با تصاویر حاصل از تجزیه و تحلیل آماری PCA و تسلدکپ نشان داد بین کربن آلی خاک و شاخص روشنایی حاصل از تسلدکپ و تصویر PCI حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ارتباط آماری منفی معنی داری در سطح پنج صدم به ترتیب به میزان  $0/726-$  و  $0/724-$  و ارتباط آماری مثبت معنی داری در سطح پنج صدم به میزان  $0/674$  مشاهده شده است.

تابش الکترومغناطیسی که بر روی سطح خاک تابیده می‌شود در طول موج‌های مختلفی بازتاب می‌شود (۳۳). بررسی تأثیر ماده آلی در طیف بازتابی خاک نشان داده است که در سطوح مختلف اکسیداسیون مواد آلی خاک، آثار طیفی متنوعی مشاهده شده است. نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی طیف مادون قرمز نزدیک نشان داده است که گروه‌های OH دارای ویژگی‌های جذب قوی در طول موج‌های  $1400-1900$  نانومتر هستند که عمدتاً به دلیل محتوای آب خاک، هیدروکسیل‌ها و محتوای رس است (۵). همچنین مشاهده شد که بازتاب خاک در طول موج‌های خاص می‌تواند با اجزای آلی (سلولز، لیگنین و نشاسته) ارتباط داشته باشد و اطلاعات کیفی و کمی ارزشمندی را ارائه دهد (۵). با توجه به اینکه شاخص BI با استفاده از طیف قرمز و سبز، روشنایی و بازتاب خاک را مورد بررسی قرار می‌دهد و کربن خاک بر رنگ خاک مؤثر است، لذا شاخص BI ارتباط معنی‌داری با کربن آلی خاک نشان داده است. بررسی ارتباط آماری بین شاخص‌های طیفی و پارامترهای شیمیایی منطقه شاهد نشان داد بین pH با شاخص‌های TSAVI و NDVI ارتباط آماری مثبت معنی‌داری در سطح پنج صدم و به میزان  $0/651$  و با شاخص ARVI ارتباط آماری مثبت معنی‌داری در سطح پنج صدم و به میزان  $0/635$  مشاهده شده است. همچنین بین PH با شاخص روشنایی تسلدکپ و PCI حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ارتباط آماری منفی معنی‌داری در سطح پنج درصد به ترتیب به میزان  $0/730-$  و

نیترژن نیتراتی  $NO_3^-$  خاک به‌عنوان نتیجه افزایش در دسترس بودن  $NH_4^+$  و افزایش فعالیت باکتری‌های اتوتروف تفسیر شد. همچنین مشخص شده است بر اساس نوع یا شدت آتش، آتش‌سوزی‌های با شدت بالا و آتش‌سوزی‌های پراکنده منجر به افزایش مخازن نیترژن آمونیاکی و نیتراتی در خاک می‌شود (۶). بررسی نسبت به C/N در دو منطقه آتش‌سوزی و شاهد پس از سه سال نشان داد همانند کربن، این نسبت نیز تغییر معنی‌داری نداشته است. از آنجا که کربن نیز تغییر معنی‌داری نداشته است عدم تغییر نسبت به C/N را می‌توان به عدم تغییر میزان کربن آلی خاک تعمیم داد (۴۳).

روش سنجش از دور کارایی لازم برای برآورد مقدار و تغییرات کربن خاک در اثر آتش‌سوزی بعد از ۳ سال را دارد. به‌منظور بررسی ارتباط آماری بین شاخص‌های طیفی محاسبه شده و پارامترهای شیمیایی خاک در منطقه آتش‌سوزی از نتایج آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. بررسی آماری ارتباط EC با شاخص‌های طیفی نشان داد در منطقه آتش‌سوزی این پارامتر تنها با شاخص BI ارتباط آماری منفی اما معنی‌داری در سطح پنج صدم و به میزان  $0/690-$  داشته است. از طرفی بین pH با هیچ یک از شاخص‌های طیفی ارتباط معنی‌داری در منطقه آتش‌سوزی نداشته است. همچنین ارتباط آماری بین کربن آلی خاک و شاخص‌های طیفی نشان داد کربن آلی خاک تنها با شاخص BI ارتباط منفی معنی‌داری در سطح پنج صدم به میزان  $0/727-$  در منطقه آتش‌سوزی مشاهده شده است. بررسی نتایج آزمون همبستگی پیرسون نیترژن کل در منطقه آتش‌سوزی نشان داد با هیچ یک از شاخص‌های طیفی ارتباط معنی‌داری نداشته است. همچنین بررسی ارتباط آماری بین تبدیل PCA و تسلدکپ در منطقه آتش‌سوزی با پارامترهای شیمیایی خاک نشان داد بین EC خاک با شاخص روشنایی حاصل از تسلدکپ و تصویر PCI حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ارتباط آماری منفی معنی‌داری در سطح پنج صدم به ترتیب به میزان  $0/629-$  و  $0/697-$  مشاهده شده است. از طرفی بررسی ارتباط pH و همچنین نیترژن کل با تصاویر حاصل از تجزیه و تحلیل

پژوهش به اثرات میان مدت پرداخته است، لذا بررسی اثرات بلند مدت آتش‌سوزی نیز می‌تواند موضوع تحقیقات آتی در حوزه زوجی گنبد باشد. همچنین تفکیک و بررسی ذخایر کربنی مختلف خاک مانند کربن میکروبی، کربن محلول و کربن معدنی نیز شواهد دقیق‌تری از تغییرات کربن آلی پس از وقوع آتش‌سوزی ارائه می‌دهد. شاخص‌های مختلف سنجش از دور همبستگی مناسبی با میزان کربن آلی خاک (SOC) نشان داده‌اند. در این مطالعه شاخص BI با توجه به انعکاس روشنایی سطح خاک همبستگی قوی و معکوسی با کربن آلی اندازه‌گیری شده در هر دو منطقه شاهد و آتش‌سوزی نشان داد. با توجه به کارایی شاخص‌های طیفی در این منطقه، به نظر می‌رسد بررسی سایر شاخص‌ها از جمله شاخص خاک لخت (BSI) و شاخص کربن آلی (SOCl) بر اساس طول موج‌های قابل مشاهده برای افزایش دقت پیش‌بینی برآورد SOC ضروری باشد.

۰/۶۵۲- مشاهده شده است. در بررسی ارتباط کربن آلی خاک با شاخص‌های طیفی هیچ‌گونه ارتباط آماری معنی‌داری مشاهده نشد. با توجه به بررسی‌ها مشخص شد طیف‌سنجی نور مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه بر اساس ارتعاشات مشخص پیوندهای شیمیایی در مولکول‌ها انجام می‌شود (۲۸). در منطقه مرئی (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) انتقال الکترونیکی باعث ایجاد باندهای جذب گسترده مربوط به کروموفورها (Chromophores) می‌شود که بر رنگ خاک تأثیر می‌گذارد، درحالی که در طیف مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه (۲۵۰۰-۷۰۰ نانومتر) ترکیبات ضعیف این ارتعاشات به دلیل کشیدگی و خم شدن پیوندهای N-H, O-H و C-H رخ می‌دهد (۴۰).  
اثر آتش‌سوزی در مدت سه سال تغییری در میزان کربن آلی و سایر خصوصیات خاک ایجاد نکرده است. از آنجایی که این

#### منابع مورد استفاده

1. Aaltonen, H., K. Köster, E. Köster, F. Berninger, X. Zhou, K. Karhu, C. Biasi, V. Bruckman M. Palviainen and J. -Pumpanen. 2019. Forest fires in Canadian permafrost region: the combined effects of fire and permafrost dynamics on soil organic matter quality. *Biogeochemistry* 143: 257-274.
2. Abney, R. B., J. Sanderman, D. Johnson, M.L., Fogel and A.A. Berhe. 2017. Post-wildfire erosion in mountainous terrain leads to rapid and major redistribution of soil organic carbon. *Frontiers in Earth Science* 5: 99-115.
3. Attaeian, B., S. Shujaeifar, V. Zandieh and S.S. Hashemi. 2016. Investigating changes in soil organic carbon in two critical and vulnerable areas of Dasht Ghahavand pastures using remote sensing and GIS. *Remote sensing and geographic information system in natural resources* 8(4): 76-90 (In Farsi).
4. Ben-Dor, E. and A. Banin. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 59(2): 364-372.
5. Ben-Dor, E., Y. Inbar and Y. Chen. 1997. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote Sensing of Environment* 61(1): 1-15.
6. Boerner, R. E., J. Huang and S.C. Hart. 2009. Impacts of Fire and Fire Surrogate treatments on forest soil properties: a meta-analytical approach. *Ecological Applications* 19(2): 338-358.
7. Butler, O. M., T. Lewis, M. Rezaei Rashti, S.C. Maunsell, J.J. Elser and C. Chen. 2019. The stoichiometric legacy of fire regime regulates the roles of micro-organisms and invertebrates in decomposition. *Ecology* 100(7), e02732.
8. Czimczik, C. I., C.M. Preston, M.W. Schmidt and E.D. Schulze. 2003. how surface fire in Siberian Scots pine forests affects soil organic carbon in the forest floor: Stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal). *Global Biogeochemical Cycles* 17(1):200-210.
9. Dai, X., T.W. Boutton, B. Glaser. R.J. Ansley W. Zech. 2005. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna. *Soil Biol Biochem* 37:1879-1881.
10. De la Rosa, J. M., A. Merino, N.T. Jiménez Morillo, M.A. Jiménez-González, J.A. González-Pérez. F.J. González-Vila and G. Almendros. 2018. Unveiling the effects of fire on soil organic matter by spectroscopic and thermal degradation methods Fire Effects in Soil Properties. *Current Knowledge and Methods Used*, 281-307.
11. Faraji, F., A. Alijanpour, E. Sheidaye Karkaj and J. Motamedi. 2019. Effect of Fire and Rangeland Banqueting on Soil Carbon Sequestration in Atbatan Summer Rangelands, East Azerbaijan Province. *Ecopersia* 7(1): 29-37 (In Farsi).

12. Fakheri, M., M. Ahmadi Nadushan and A. Chavoshi. 2018. Estimation of soil organic matter in Semiram region using satellite images. *Soil research (soil and water sciences)* 33(4): 511-524 (In Farsi).
13. Fahmideh, S., M. Arbitration, M.R. Mosadeghi and Z. Sharifi. 2018. Evaluating the effectiveness of reflectance spectroscopy to estimate soil organic carbon in Zaribar Lake watershed, Kurdistan province. *Journal of water and soil protection research* 26(6): 59-78 (In Farsi).
14. Finn, D., J. Yu C.R. Penton. 2020. Soil quality shapes the composition of microbial community stress response and core cell metabolism functional genes Applied. *Soil Ecology* 148: 103483.
15. Francos, M., X. Úbeda and P. Pereira. 2020. Long-term forest management after wildfire (Catalonia, NE Iberian Peninsula). *Journal of Forestry Research* 31(1): 269-278.
16. Gholizadeh, A., D. Žižala. M. Saberioon L. Borůvka. 2018. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment* 218: 89-103 (In Farsi).
17. Halofsky, J. E., D.L. Peterson B.L. Harvey. 2020. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest. USA. *Fire Ecology* 16(1): 1-26.
18. Hebel, C. L., J.E. Smith and Jr.K. Cromack. 2009. Invasive plant species and soil microbial response to wildfire burn severity in the Cascade Range of Oregon. *Applied Soil Ecology* 42(2): 150-159.
19. Heydari, M., A. Rostamy, F. Najafi D.C. Dey. 2017. Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) in Iran. *Journal of Forestry Research* 28(1): 95-104 (In Farsi).
20. Hrelja, I., I. Šestak and I. Bogunović. 2020. Wildfire Impacts on Soil Physical and Chemical Properties-A Short Review of Recent Studies. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 85(4): 293-301.
21. Jinquan, L., P. Junmin, L. Jiajia, W. Jihua, L. Bo, F. Changming and N. Ming. 2021. Spatiotemporal variability of fire effects on soil carbon and nitrogen: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/GCB.15742.
22. Keeley, J. E, J.G. Pausas, P.W. Rundel, W.J. Bond R.A. Bradstock. 2011. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traitsx. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends in plant science* 16(8): 406-411.
23. Knelman, J. E., E.B. Graham. N.A. Trahan. S.K. Schmidt and D.R. Nemerbut. 2015. Fire severity shapes plant colonization effects on bacterial community structure microbial biomass, and soil enzyme activity in secondary succession of a burned forest. *Soil Biology and Biochemistry* 90: 161-168.
24. Knicker, H., F.J. González-Vila and R. González-Vázquez. 2013. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soils of Southern Spain. *Soil Biology and Biochemistry* 56: 31-39.
25. Ladoni, M., H.A. Bahrami, S.K. Alavipanah and A.A. Norouzi. 2010. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review. *Precision Agriculture* 11(1): 82-99 (In Farsi).
26. Levi, M. R. and B.T. Bestelmeyer. 2018. Digital soil mapping for fire prediction and management in rangelands. *Fire Ecology* 14(2): 1-12.
27. Lotfi, M., S.Y. Erfani Fard. F. Amir Aslani A. Khazuri. 2019. Effectiveness of optimal artificial neural network in soil organic carbon modeling based on field data and Sentinel-2 images in Arsbaran. *Wood and forest science and technology researches* 27(3): 19 - 36 (In Farsi).
28. Mohammed, E. S., A.M. Saleh. A.B. Belal A. Gad. 2018. Application of near infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21(1): 1-14.
29. Mohammadi Farsani, N., A. Karimi. J. Mohammadi and M. Naderi. 2018. Zoning of organic matter amount and size distribution of soil particles in different uses using geostatistics and remote sensing in Bardeh watershed of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Soil research* 33(4): 497-510 (In Farsi).
30. Mondal, A., D. Khare, S. Kundu, S. Mondal. S. Mukherjee and A. Mukhopadhyay. 2017. Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 20(1): 61-70.
31. Moya, D., S. González-De Vega, E. Lozano, F. García-Orenes, J. Mataix-Solera. M.E. Lucas-Borja and J. de Las Heras. 2019. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill stands in the short and mid-terms after wildfire. *Journal of environmental management* 235: 250-256.
32. Moqaddas, B., T. Lewis, M. Esfandbod and C. Chen. 2019. Responses of labile soil organic carbon and nitrogen pools to long-term prescribed burning regimes in a wet sclerophyll forest of southeast Queensland, Australia. *Science of the total environment* 647: 110-120.
33. Nocita, M., A. Stevens, B. Van Wesemael, M. Aitkenhead, M. Bachmann, B. Barthès and J. Wetterlind. 2015. Soil spectroscopy: An alternative to wet chemistry for soil monitoring. *Advances in agronomy* 132: 139-159.
34. Pellegrini, A. F., A.C. Caprio, K. Georgiou, C. Finnegan, S.E. Hobbie, J.A. Hatten and R.B. Jackson. 2021. Low-intensity frequent fires in coniferous forests transform soil organic matter in ways that may offset ecosystem carbon losses. *Global change biology* 30:43-49.
35. Pellegrini, A.F., A. Ahlström, S.E. Hobbie, P.B. Reich, L.P. Nieradzick, A.C. Staver, B.C. Scharenbroch, A. Jumpponen, W.R. Anderegg, J.T. Randerson and R.B. Jackson. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil

- carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature* 553(7687): 194-198.
36. Pereira, P., M. Francos, E.C. Brevik, X. Ubeda and I. Bogunovic. 2018. Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 5: 26-32.
  37. Pereira, P. X. Ubeda. D. Martin. 2012. Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma* 191: 105-114.
  38. Rahmati, M., M.R. Neyshabouri, M. Mohammady Oskouei, A. Fakheri Fard and A. Ahmadi. 2016. Soil organic carbon prediction using remotely sensed data at Lighvan watershed, Northwest of Iran *Azarian Journal of Agriculture* 3(2): 45-49 (In Farsi).
  39. Rezaei Sangdehi, M., A. Fallah, H. Latifi and N. Nazariani. 2023. Modeling carbon stock on land using Sentinel 1,2 satellite images and parametric and non-parametric relationships (case study: Se Sangdeh forests). *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources* 14(3): 21-24 (In Farsi).
  40. Rossel, R. V. and T. Behrens. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158(2): 46-54.
  41. Saati Zarei, S. 2017. The effect of pasture fire on soil organic carbon storage in semi-arid pastures in the Gonbad watershed using remote sensing. Master's thesis. Malayer University (In Farsi).
  42. Saati Zarei, S. and B. Ataiyan. 2021. Investigating the effect of fire in pastures on soil organic carbon changes using indicators based on remote sensing. *Remote Sensing and Geographical Information System in Natural Resources, Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resources Sciences* 12(3): 19-22 (In Farsi).
  43. Sadeghifar, M., A. Beheshti Al-Agha and M. Pourreza. 2017. Comparison of some physico-chemical and microbial indicators of soil in the years after the fire in the Zagros forests of Paveh. *Soil research (soil and water sciences)* 32(1): 97-114 (In Farsi).
  44. Sazawa, K., H. Yoshida. K. Okusu, N. Hata and H. Kuramitz. 2018. Effects of forest fire on the properties of soil and humic substances extracted from forest soil in Gunma, Japan. *Environmental Science and Pollution Research* 25(30): 30325-30338.
  45. Sharifi, Z., C. Nazari, K. Mohammadi Samani and N. Shabanian. 2014. The effect of three consecutive years of fire on some physical and chemical characteristics of a forest soil around Zarivar Lake, Marivan. *Iran water and soil research* 46(3): 555 - 565 (In Farsi).
  46. Singh, N., S. Abiven, M.S. Torn and M.W. Schmidt. 2012. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale. *Biogeosciences* 9(8): 2847-2857.
  47. Ubeda, X. and L.R. Outeiro. 2009. Physical and chemical effects of fire on soil. *In Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 121-148). CRC Press.
  48. Varamesh, S., S.M. Hosseini, N. Abdi and M. Akbarinia. 2010. Increment of soil carbon sequestration due to forestation and its relation with some physical and chemical factors of soil. *Iranian Journal of Forest* 2(1):25-35(In Farsi).
  49. Vaudour, E., J.M. Gilliot, L. Bel, J. Lefevre and K. Chehdi. 2016. Regional prediction of soil organic carbon content over temperate croplands using visible near infrared airborne hyperspectral imagery and synchronous field spectra. *International Journal of applied earth observation and geoinformation* 49: 24-38.
  50. Villarreal, M.L., L.M. Norman, S. Buckley, C.S. Wallace and M.A. Coe. 2019. Multi-index time series monitoring of drought and fire effects on desert grasslands. *Remote sensing of environment* 183: 186-197.
  51. Wang, B., C. Waters, S. Orgill, J. Gray, A. Cowie, A. Clark and D. Li Liu. 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Science of the Total Environment* 630: 367-378.
  52. Wang, Q., M. Zhong. and S. Wang. 2012. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 271: 91-97.
  53. Zhan, Y., F. Liu, X. Peng and G. Wang. 2020. The effects of different burning intensities on soil properties during recovery stage of forests in subtropical China. *Journal of Soil and Water Conservation* 75(2): 166-176.