



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی
پرتال جامع علوم انسانی



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 3 - Number 43, Fall 2022

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76655.1225>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و سوم، پاییز ۱۴۰۱، صص ۱۰۰-۸۵

مقاله پژوهشی

اثرات تحول سنی لندفرم‌ها بر دینامیک کربن پدوسفر (مطالعه موردی: دامنه‌های آلاداغ- شمال شرقی ایران)

امیر محسنی - پژوهشگر پسادکتری علوم خاک، گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ندا محسنی^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

علیرضا کریمی - استاد علوم خاک، گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۲۵

چکیده

در این پژوهش فاکتورهای مؤثر بر انتشار دی‌اکسید کربن و نسبت معدنی شدن در ۱۲ مخروط افکنه در دامنه‌های جنوبی آلاداغ با سنین نسبی جدید، میانه و قدیمی اندازه‌گیری شد. گسترش فرسایش گالی در مخروط افکنه‌های قدیمی‌تر منجر به انتقال حجم وسیعی از لایه‌های سطحی غنی از کربن آلی و لایه‌های عمقی خاک شده است. این رخداد با تقویت شکستن خاکدانه‌ها و کمپلکس‌های معدنی-آلی، افزایش حساسیت کربن آلی خاک نسبت به معدنی شدن میکروبی را به دنبال داشته است. درحالی‌که مخروط افکنه‌های جوان در مقایسه با مخروط‌های فعال و قدیمی‌تر محیط نسبتاً پایدارتری را به معرض نمایش گذاشته‌اند. شکل‌گیری این مخروط‌ها در قاعده مخروط افکنه‌های قدیمی منجر به افزایش تجمع رسوبات ریزدانه، کاتیون‌های قابل تبادل و کربن آلی حمل شده از سطوح مخروط‌های قدیمی شده است. از سوی دیگر، ظرفیت جابجایی کمتر فرایندهای فرسایشی در این محیط‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری‌شان، محیطی پایدار برای ترکیب ذرات ناپایدار کربن آلی با رسوبات ریزدانه و کاتیون‌های قابل تبادل فراهم می‌آورد. این مکانیزم منجر به افزایش پایداری خاکدانه‌ها در این محیط‌ها شده که به نوبه خود حساسیت پذیری کربن آلی نسبت به تنفس میکروبی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین علی‌رغم اینکه مؤلفه‌های ناپایدار

Email: nedamohseni@um.ac.ir

انویسنده مسئول: ۰۹۱۱۲۹۱۶۹۴۳

نحوه ارجاع به این مقاله:

محسنی، امیر، محسنی، ندا، کریمی، علیرضا. (۱۴۰۱). اثرات تحول سنی لندفرم‌ها بر دینامیک کربن پدوسفر (مطالعه موردی:

دامنه‌های آلاداغ- شمال شرقی ایران). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۳). صص ۱۰۰-۸۵

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76655.1225>

کربن آلی و متعاقباً تنفس میکروبی در این محیطها نسبت به سایر مخروطها بسیار زیاد بوده است، نرخ معدنی شدن به دلیل حفاظت کربن آلی خاک بسیار پائین تر از سایر لندفرمها بوده است. تفاوت‌های ژئومورفولوژیک مخروط افکنه‌هایی با سنین مختلف منجر می‌شود این لندفرمها شرایط ناپایداری را در نرخ تبادل کربن از پدوسفر به اتمسفر به نمایش بگذارند.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، لندفرم، ژئومورفولوژی، دی‌اکسید کربن، خاک.

۱- مقدمه

اثرات تغییرات اقلیمی دوره‌های هولوسن و پلیستوسن کواترنر بر رسوبات مخروط افکنه‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک در دنیا توجهات زیادی را به خود معطوف کرده است. مطالعات متعدد به تشریح انواع مدل‌ها از ارتباط بین تغییر اقلیم و سیکل رسوبات مخروط افکنه‌ها پرداخته‌اند. برخی از مدل‌ها نشان داده‌اند شکل‌گیری مخروط افکنه‌ها به‌طور گسترده‌ای در طول پلیستوسن اخیر اتفاق افتاده است، زمانی که شرایط اقلیمی بسیار مرطوب‌تر از زمان حاضر بوده است (ملتون^۱، ۱۹۶۵؛ پونتی^۲، ۱۹۸۵). این مدل‌ها نشان می‌دهند اقلیم‌های مرطوب‌تر با افزایش تخلیه بار رسوبی رودخانه‌ها زمینه شکل‌گیری محیط‌های تراکمی مخروط افکنه‌ها را فراهم ساخته‌اند. مدل‌های دیگر در این زمینه نشان داده‌اند سیکل نهشته‌گذاری مخروط افکنه‌ها به‌طور گسترده‌ای در نتیجه توالی پاسخ‌های ژئومورفیک به تغییرات زمانی در اقلیم و پوشش گیاهی در دوره گذار پلیستوسن-هولوسن اتفاق افتاده است. بر اساس این مدل، سیکل رسوب‌گذاری مخروط افکنه‌ها در مرحله گذر از دوره‌های مرطوب‌تر به دوره‌های نسبتاً خشک‌تر مشخص می‌شود، زمانی که کاهش در رطوبت مؤثر خاک منجر به تلفات پوشش گیاهی در مناطق کوهستانی و دامنه‌ای شده و در نتیجه زمینه افزایش بار رسوبی و جریان‌ات سطحی از شیب‌های فاقد پوشش به سمت حوضه‌های پدیمنت را فراهم ساخته‌اند. هرچند نقش تغییر اقلیم در شکل‌گیری مخروط افکنه‌ها محرز است، سؤالی که مطرح می‌شود این است که فاکتورهای ژئومورفیک در مقایسه با اقلیم چه نقشی در شکل‌گیری و تحول مخروط افکنه‌ها دارند؟ فاکتورهایی نظیر پایداری تکتونیک، ارتفاع کوهستان، اندازه حوضه آبریز و ساختار لیتولوژیک آن می‌توانند اثرات قابل توجهی بر فرایندهای رسوب‌گذاری مخروط افکنه‌ها داشته باشند. از میان فاکتورهایی که عملکرد فرایندهای رسوبی و فرسایشی را بر سطوح مخروط افکنه‌ها کنترل می‌کنند، فاکتور زمان و متعاقباً نقش تحولات سنی این لندفرمها بسیار حائز اهمیت است.

در این پژوهشی سعی بر آن است ارتباط مخروط افکنه‌ها و تغییرات اقلیمی از زاویه دیگری نشان داده شود. شکل‌گیری و تحول این لندفرمها نه تنها بشدت متأثر از تغییرات اقلیمی است، بلکه این لندفرم‌های تیپیک ژئومورفیک

1 Melton

2 Ponti

می‌توانند در گذر زمان به‌طور غیر مستقیم به تغییرات اقلیمی دامن زنند. نقش مخروط افکنه در تغییرات اقلیمی از طریق دخالت این لندفرم‌ها در چرخه دینامیک کربن و در نتیجه تبادل کربن بین پدوسفر و اتمسفر محرز است. به دلیل عملکرد انواع متفاوتی از فرایندهای ژئومورفیک مانند انواع زمین لغزش‌ها و فرایندهای سیلابی، مخروط افکنه‌ها از مهم‌ترین لندفرم‌های ناپایدار شناخته می‌شوند. در طول بارش‌های سنگین، بخصوص بعد از فرایندهای شدید سیلابی، رسوبات با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت توسط جریان‌ات در امتداد این لندفرم‌ها حمل می‌شوند. فارغ از این ویژگی‌ها، یکی از مشخصه‌های بارز این محیط‌ها که به‌طور بالقوه بر عملکرد فرایندهای دخیل در دینامیک کربن می‌تواند مؤثر باشد، تحول سنی این محیط‌ها است. زمان از مهم‌ترین دلایل ناپایداری این لندفرم‌ها می‌باشد. عاملی که می‌تواند بشدت روند دینامیک کربن را ناپایدار و بعضاً غیرقابل پیش‌بینی نماید. تحول سنی مخروط افکنه یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده عملکرد فرایندهای فرسایشی و رسوبی در این محیط‌ها می‌باشد. مخروط‌هایی با سنین مختلف تفاوت‌های مشهودی از لحاظ نوع و عملکرد فرایندهای ژئومورفیک نشان می‌دهند. برای مثال تقریباً تمام بخش‌های مخروط‌های جوان و فعال در معرض فرایندهای سیلابی و نهشته‌گذاری قرار دارند (بهرامی و قهرمان، ۲۰۱۹). مسیره‌های جریان و مرز کانال‌های موجود در مخروط افکنه‌ها به‌شدت ناپایدار بوده، به‌طوری‌که همه بخش‌های یک مخروط افکنه به یک میزان مستعد به فرایندهای سیلابی یا نهشته‌گذاری نمی‌باشند (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ایمنی و همکاران، ۱۳۹۹). برای مثال مخروط‌های قدیمی یا اصطلاحاً غیرفعال تقریباً به‌دوراز فرایندهای سیلابی هستند (فیلد، ۲۰۰۱). سایر فرایندها مانند فرایندهای هوازدگی، عوارضی مانند ورنی بیابان، سنگفرش‌های بیابانی و در نتیجه نرخ توسعه و تکامل خاک تفاوت‌های بارزی را بین مخروط افکنه‌هایی با سنین متفاوت به نمایش می‌گذارند (رگمی و راسموسن، ۲۰۱۸؛ دیکرسون و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش بازه زمانی فعالیت‌های سیلابی در مخروط افکنه‌های بسیار قدیمی، شکل‌گیری و توسعه فرسایش گالی در این محیط‌ها را در مقایسه با مخروط‌های جوان‌تر به دنبال دارد. توسعه چنین اشکالی منجر به مورفولوژی ناهموار و منقطع مخروط‌های قدیمی در مقایسه با مخروط‌های جدید می‌شود.

مطالعات بسیاری درباره نقش فرایندهای فرسایشی-تراکمی و دینامیک کربن خاک انجام شده است. اکسیانو و همکاران^۱ (۲۰۱۸) در تحقیقی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند که چگونه حذف کربن آلی از موقعیت‌های فرسایشی چشم‌اندازها می‌تواند منجر به ظهور یک محیط رسوبی غنی از کربن آلی در موقعیت‌های رسوب‌گذاری شود. همچنین مطالعات بسیاری در رابطه با نقش فرایندهای فرسایش خاک در سیکل کربن آلی پدوسفر انجام شده است.

1 Bahrami & Ghahraman
2 Field
3 Regmi & Rasmussen
4 Dickerson
5 Xiao

(اسمیت و همکاران^۱، ۲۰۰۱؛ نادیو و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ ون هملریک و همکاران^۳، ۲۰۱۰). اکثریت این مطالعات اثرات بازتوزیع خاک را بر دینامیک کربن پدوسفر در موقعیت‌های فرسایشی و رسوبی امتداد یک چشم‌اندازهای دامنه‌ای یا در مقیاس‌های وسیع‌تر بررسی کرده‌اند. باین وجود، نقش تحول لندفرم‌ها در ناپایداری دینامیک کربن پدوسفر کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر فارغ از اثرات موقعیت‌های فرسایشی و رسوبی چشم‌اندازها بر دینامیک کربن خاک، به این موضوع پرداخته شده است که چگونه تحول سنی مخروط افکنه‌ها در گذر زمان می‌تواند پاسخ این محیط‌ها به فرایندهای بیوشیمیایی دخیل در دینامیک کربن را تغییر دهد؟. در این پژوهش سعی شده است تا به این سؤالات پاسخ داده شود: آیا تحول سنی مخروط افکنه‌ها، می‌تواند عملکرد دینامیک کربن خاک را در این لندفرم‌ها تحت تأثیر قرار دهد؟ تحول سنی این محیط‌ها چگونه منجر به ناپایداری فرایندهای بیوشیمیایی دخیل در انتشار یا ذخیره کربن خاک می‌شود؟

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و طرح نمونه‌برداری

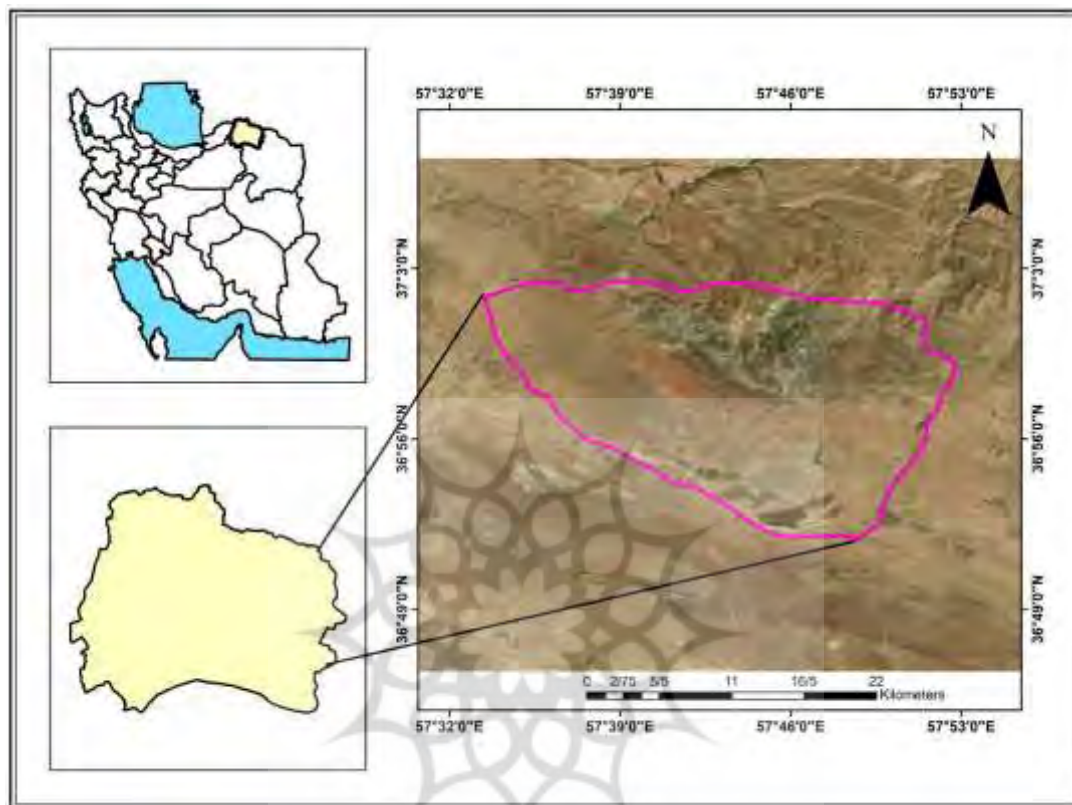
با توجه به اهداف تحقیق، ۱۲ مخروط افکنه با سنین نسبی مختلف در دامنه‌های جنوبی آلاداغ انتخاب شد (شکل ۱). این ارتفاعات در حدفاصل کوه‌های بینالود و البرز شرقی در محدوده استان خراسان شمالی قرار دارد. از لحاظ موقعیت جغرافیایی، دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های آلاداغ، همچنین دشت‌های جاجرم و اسفراین و رودخانه‌های کال شور و قره‌سو به ترتیب از شمال و جنوب به منطقه مورد مطالعه مشرف می‌باشند. شرایط ارتفاعی حوضه آبریز، نوع اقلیم حاکم بر منطقه، شرایط توپوگرافی و ویژگی‌های زمین‌شناسی شامل سازندهای آبرفتی و گسل‌های فعال، منجر شده که مخروط افکنه‌های واقع در دشت‌سرهای این حوضه بسیار مستعد به فرسایش آبی و فرایندهای سیلابی باشند. برای طرح نمونه‌برداری، ۱۲ مخروط افکنه با سنین نسبی مختلف شامل مخروط افکنه‌های جدید و فعال، مخروط افکنه‌های قدیمی و مخروط افکنه‌های میانه انتخاب شدند (برای هر مخروط ۴ تکرار). با توجه به هدف اصلی این پژوهش، برای اینکه فقط نقش تحول سنی مخروط‌ها در نظر گرفته شود، نمونه‌برداری از هر مخروط در سطوح شیب یکسان انجام شد. برای تشخیص و تفکیک سطوح مخروط افکنه‌ها از لحاظ سن نسبی، مطالعات میدانی و همچنین پایش مخروط افکنه‌ها با استفاده از تصاویر گوگل ارث انجام شد. در مجموع با استفاده از شاخص‌هایی مانند الگوی زهکشی، میزان نسبی هوازدگی، مورفولوژی سطحی و میزان روشنایی سطوح مختلف سن نسبی مخروط‌های مختلف شناسایی شد (شکل ۲). به منظور اجتناب از ناهمگنی در نقاط نمونه‌برداری خاک، برای همه مخروط‌ها فرایند

1 Smith

2 Nadeu

3 Van Hemelryck

نمونه‌برداری در شیب بین ۵ تا ۷ درجه انجام شد. در هر مخروط با استفاده از ۵ پلات ۲*۲ متر، ۲۰ نمونه خاک (از هر پلات ۴ تکرار) از عمق ۰-۳۰ سانتی متری برداشت شد (در مجموع ۸۰ تکرار برای مخروط‌هایی با سن مشخص).



شکل ۱. موقعیت مخروط افکنه‌های مورد مطالعه در استان خراسان شمالی

۲-۲- آنالیزهای آزمایشگاهی و آماری

با استفاده از روش تله قلیائی، تنفس میکروبی (به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری انتشار دی‌اکسید کربن) اندازه‌گیری شد (رابی و همکاران، ۲۰۱۴). برای اندازه‌گیری این فاکتور، نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط رطوبتی ۷۰٪ به مدت ۷ روز خوابانیده شدند. سپس ۵۰ گرم از هر نمونه خاک در شیشه‌های ۱۰۰۰ میلی‌لیتری قرار داده شده و ویال‌های ۱۵ میلی‌لیتری حاوی ۱۰ میلی‌لیتر محلول NaOH ۰/۱ مولار درون شیشه‌ها برای جذب دی‌اکسید کربن متصاعد شده از نمونه‌های خاک قرار داده شد. همه نمونه‌ها در فضای تاریک در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای ۲ روز نگهداری شدند. در نهایت نسبت معدنی شدن کربن با تقسیم دی‌اکسید کربن متصاعد شده بر

مقدار کربن آلی خاک محاسبه و تعیین گردید. کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین با کلروفورم اندازه‌گیری شد (ونس و همکاران، ۱۹۸۷). در این روش از کلروفورم فاقد الکل برای تدخین نمونه‌ها استفاده شد. فرایند عصاره‌گیری از نمونه‌های تدخین شده و نمونه‌های شاهد (بدون تدخین) در دسیکاتور و با ۲۰ میلی‌لیتر K_2SO_4 ۰/۵ مولار انجام شد. پس از عصاره‌گیری از نمونه‌های خاک مقدار ۲ میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم و ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ به ۴ میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده اضافه گردید. سپس ۰/۳ میلی‌لیتر محلول شناساگر حاوی ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر، یک گرم دی‌فنیل آمین و ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک اضافه شد. درنهایت با فروآمونیم سولفات، تیتراسیون نمونه‌ها صورت گرفت و مقدار کربن زیتوده میکروبی کربن بر اساس تفاضل کربن مستخرج از نمونه تدخین شده و نمونه شاهد بر مبنای میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد.

توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش الک خشک به مدت ۳ دقیقه و هیدرومتر اندازه‌گیری شد (گی و ار، ۲۰۰۲). شاخص‌های پایداری خاکدانه شامل میانگین وزنی ذرات و میانگین هندسی قطر ذرات با استفاده از روش الک تر اندازه‌گیری شد (کمپر و رزنا، ۱۹۸۶) نمونه‌های خاک دست‌نخورده روی الک‌های ۲ و ۰/۲ میلی‌متری قرار داده شده و سپس به آرامی در آب معلق خواهند شد. با استفاده از شیکر (۹۰ و بیره در هر دقیقه برای ۱۰ ثانیه) ذرات از یکدیگر جدا خواهند شد. نمونه‌های ۲۰-۲۰۰ میکرون برای یک دقیقه در $400 \times g$ سانتریفیوژ شد. ذرات ۲-۲۰ میکرون و کوچک‌تر از ۲ میکرون به ترتیب در $2,000 \times g$ و $10,000 \times g$ سانتریفیوژ شد. برای جداسازی نمونه‌ها به کلاس‌های ۲۰-۶۳ میکرون و بزرگ‌تر از ۶۳ میکرون، الک‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر انتخاب گردید. میانگین هندسی قطر ذرات و میانگین وزنی ذرات خاک با معادلات زیر محاسبه شد:

میانگین وزنی ذرات:

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i$$

میانگین هندسی ذرات:

$$\exp [(\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i) / (\sum_{i=1}^n w_i)]$$

جایی که x_i ، y_i و w_i به ترتیب، میانگین قطر هر کلاس سایز (میلی‌متر)، درصد هر کلاس سایز و وزن هر کلاس

سایز هستند.

وزن مخصوص ظاهری نمونه‌ها با استفاده از روش بلیک و هارتج^۱ (۱۹۸۶) بر اساس تقسیم وزن خاک آون خشک بر حجم خاک اندازه‌گیری شد. میزان کاتیون‌های قابل تبادل شامل Ca^+ , Mg^+ , K^+ با استفاده از روش دیوید^۲ (۱۹۶۰) اندازه‌گیری شد. اسیدیته خاک در گل اشباع و با استفاده از دستگاه pH متر مدل Milwaukee MW150 MAX اندازه‌گیری گردید (توماس، ۱۹۹۶).

مقادیر کربن آلی محلول خاک در نمونه‌های عصاره‌گیری شده با نسبت ۱:۲ خاک به آب و توسط دستگاه کربن آنالایزر (TOC-VCPH, Shimadzu)^۳ اندازه‌گیری شد (کر و همکاران، ۱۹۹۹). همچنین نیتروژن کل خاک نیز با استفاده از روش کجلدال اندازه‌گیری گردید (برمنر^۴، ۱۹۹۶).

۲-۳- تجزیه آماری

در مرحله اول، برای فهم اینکه چگونه تحول سنی مخروط‌ها و تغییرات ژئومورفولوژیک آن‌ها در طول زمان فرایندهای کنترل کننده دینامیک انتشار یا ذخیره کربن را متأثر می‌سازد، نرخ تغییرپذیری انتشار دی‌اکسید کربن خاک، نسبت معدنی شدن کربن و فاکتورهای ادافیک مؤثر بر آن بین مخروط‌های مختلف با استفاده از آنالیز واریانس و آزمون‌های تکمیلی مقایسه شد. بعد از تعیین تفاوت‌های آماری معنی‌دار در نرخ انتشار دی‌اکسید کربن، نسبت معدنی شدن کربن و متغیرهای مرتبط بین مخروط‌هایی با سنین مختلف، به منظور تبیین فرایندهای بیوشیمیایی کنترل کننده دینامیک کربن خاک در مخروط‌افکنه‌های متفاوت مدل رگرسیون چند متغیره اعمال شد. هدف از اجرای این مدل پاسخ به این سؤال بود که تحول سنی مخروط‌ها و اثراتشان بر ژئومورفولوژی این لندفرم‌ها چرا و چگونه دینامیک کربن را در این محیط‌ها ناپایدار می‌کند؟ نتایج این مدل در فهم بهتر فاکتورهای احتمالی کنترل کننده سطح انتشار یا ذخیره دی‌اکسید کربن و فهم دلایل تفاوت‌های احتمالی در فرایندهای عملکردی کمک می‌نماید.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1 Blake and Hartge

2 David

3 Total Organic Carbon Analyzer

4 Bremner



شکل ۲. تصاویری از شکل‌گیری سنگفرش بیابان بر سطوح مخروط افکنه‌های قدیمی (سمت چپ) و نمایی از مخروط افکنه‌های جوان و فعال با انباشتی از واریزه‌های سیلابی (سمت راست) در منطقه مورد مطالعه.

۳- نتایج و بحث

نتایج آنالیزهای آماری نشان دهنده وجود تفاوت‌های معنی‌دار از لحاظ نرخ انتشار دی‌اکسید کربن، نسبت معدنی شدن کربن و فاکتورهای ادافیک مرتبط در سطوح مخروط افکنه‌هایی با تحولات سنی مختلف می‌باشد. همچنان که در شکل ۳ نشان داده شده است، محیط خاک مخروط افکنه‌هایی با سنین نسبی میانه کمترین میزان وزن مخصوص ظاهری را نشان داده‌اند. در حالی که این فاکتور مقادیر بالاتری را در مخروط‌های بسیار جوان و مخروط‌های قدیمی‌تر نشان می‌دهد. از لحاظ توزیع اندازه ذرات، بیشترین مقادیر ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون به ترتیب در مخروط‌هایی با سنین میانه و جدید دیده می‌شود. مخروط‌های قدیمی کمترین مقدار ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون را نشان داده‌اند. همچنین از میان توزیع ذراتی با اندازه‌های مختلف، بیشترین مقدار ذرات بزرگ‌تر از ۲۰ میکرون در مخروط‌های جوان و فعال و کمترین مقدار این فاکتور در مخروط‌های میانه مشاهده شد. شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها مقادیر

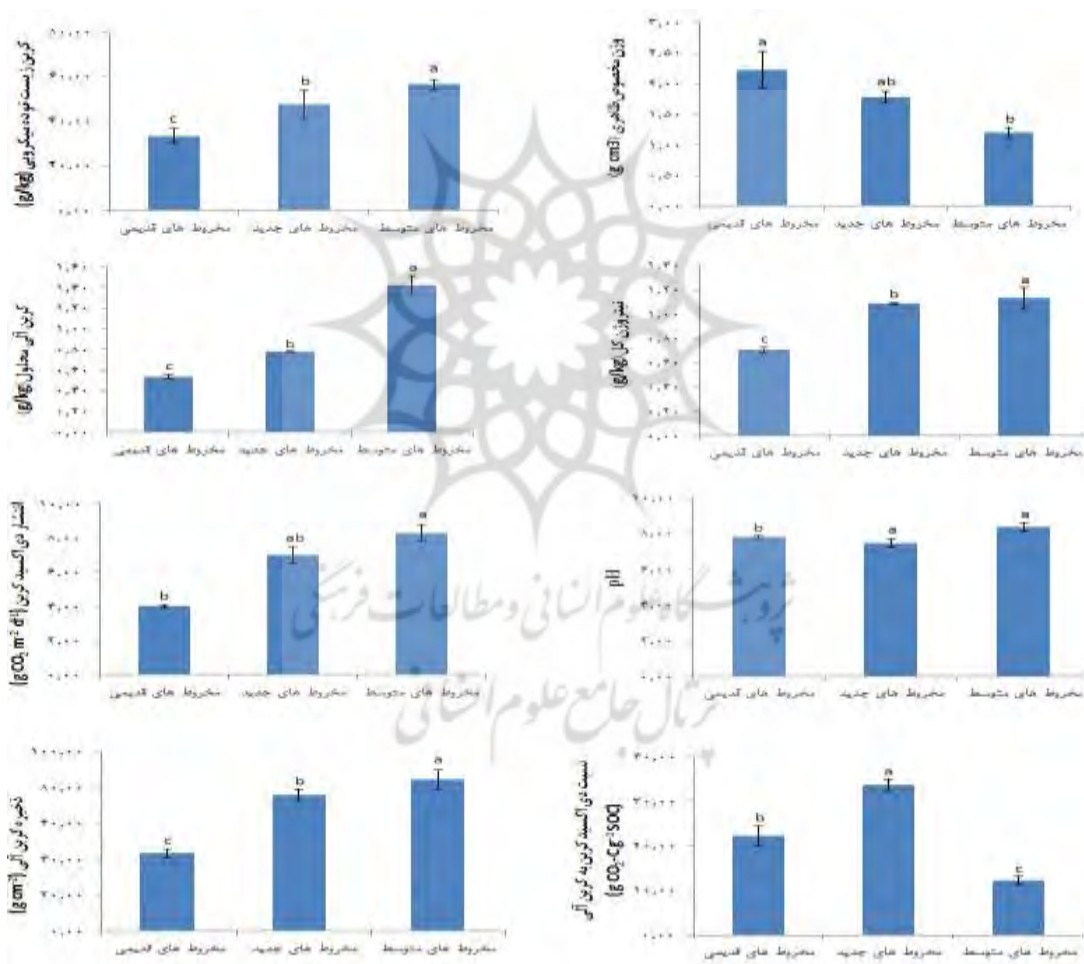
بالاتری را در مخروط‌های میانه در مقایسه با سایر مخروط افکنه‌ها نشان داده است. این در حالی است که خاک مخروط افکنه‌های قدیمی‌تر کمترین نرخ پایداری را نشان داده‌اند. از میان فاکتورهای بیوشیمیایی، بیشترین مقادیر کربن آلی کل، کربن آلی محلول، نیتروژن کل، کربن زیست‌توده میکروبی در محیط خاک سطوح مخروط افکنه‌های میانه مشاهده شد. در حالی که خاک‌های تشکیل دهنده سطوح مخروط‌های قدیمی‌تر کمترین سطح از این فاکتورها را در مقایسه با مخروط‌های جوان‌تر نشان داده‌اند. با افزایش سن مخروط افکنه‌ها تجمع کاتیون‌های قابل تبادل کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طوری که بیشترین تجمع کاتیون‌ها در مخروط‌هایی با سن نسبی میانه مشاهده می‌شود. همچنین بالاترین مقادیر ذخیره کربن معدنی به ترتیب در سطوح قدیمی و جدید مخروط افکنه‌ها مشاهده شد. در مخروط‌هایی با سنین میانه و مخروط‌های بسیار جدید نرخ تنفس میکروبی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با سطوح قدیمی‌تر مخروط افکنه‌ها نشان داده است. این در حالی است که نسبت معدنی شدن فقط در مخروط‌هایی با سنین میانه کاهش چشم‌گیری را از لحاظ آماری در مقایسه با سایر مخروط‌ها نشان داده است. نتایج مدل رگرسیون به خوبی می‌تواند نقش تحولات سنی مخروط افکنه‌ها را در تغییرپذیری مکانیزم‌های بیوشیمیایی مؤثر بر انتشار یا ذخیره کربن در مخروط‌هایی با سنین مختلف توضیح دهد. همچنان‌که در **جدول ۱** مشاهده می‌شود متغیرهای فیزیکی و شیمیایی کنترل‌کننده نسبت معدنی شدن، تفاوت‌های قابل توجهی را بین محیط‌های مختلف نشان داده است. در مخروط افکنه‌هایی با سنین میانه عمده‌ترین فاکتورهای مؤثر بر نرخ معدنی شدن کربن، شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی محلول و کربن زیست‌توده میکروبی بوده است. این فاکتورها ارتباط منفی معنی‌داری را با نسبت معدنی شدن در این مخروط‌ها نشان داده‌اند. در مورد مخروط‌های قدیمی‌تر، کربن آلی کل، کربن آلی محلول، pH و تنفس میکروبی ارتباط مثبت معنی‌داری را با نرخ معدنی شدن کربن در این محیط‌ها نشان داده‌اند. نرخ معدنی شدن کربن در سطوح جدید و فعال مخروط افکنه‌ها، ارتباط مثبت معنی‌داری را با کربن آلی محلول، کربن معدنی، نیتروژن کل و تنفس میکروبی نشان داده است.

علیرغم مطالعات گسترده درباره اثرات تحول مخروط‌ها و فرایندهای عملکردی در این محیط‌های ناپایدار بر تغییرپذیری ژئومورفولوژی و ویژگی‌های خاک (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۱۳؛ دیکرسون و همکاران، ۲۰۱۵)، مطالعات قابل توجهی در ارتباط با اینکه چرا و چگونه تحول سنی مخروط افکنه‌ها در طول زمان می‌تواند منجر به ناپایداری دینامیک کربن خاک در این محیط‌ها شوند، انجام نشده است. هرچند مخروط افکنه‌ها از لحاظ ژئومورفیک لندفرم‌هایی تراکمی شناخته می‌شود (مددی و همکاران، ۱۳۹۵؛ جعفری و محمدی، ۱۳۹۸) با این وجود، ماهیت فرایندها در گذر زمان در این محیط‌ها بشدت وابسته به زمان است. به همین دلیل این لندفرم‌ها محیطی بشدت ناپایدار را در طول زمان به نمایش می‌گذارند. یکی از مهم‌ترین پیامدهای تحول سنی مخروط‌ها

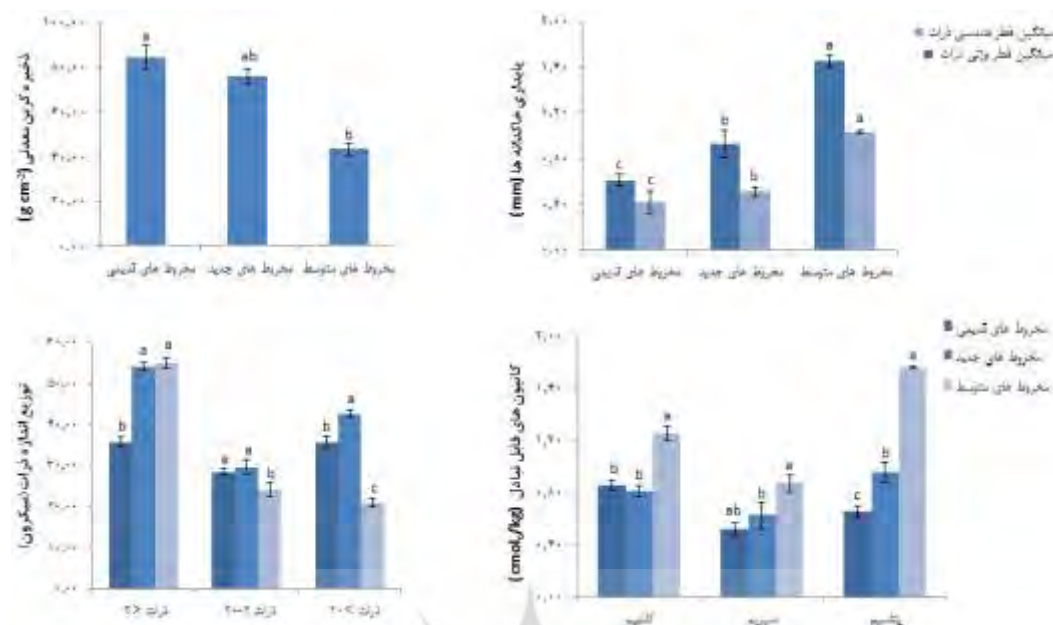
1 Williams

2 Dickerson

تغییرپذیری در نوع و شدت عملکرد انواع فرایندها می‌باشد. مخروط‌هایی با سنین مختلف تاریخ تحولات ژئومورفیک متفاوتی را پشت سر گذاشته‌اند. به طوری که دینامیک زمانی در مورفولوژی و ساختار این محیط‌ها بسیار اثرگذار است. تحولات سنی این لندفرم‌ها منجر به تفاوت‌های چشم‌گیر این سطوح ناپایدار از لحاظ شدت عملکرد فرایندهای هوازدگی، تفاوت در الگوی زهکشی، تفاوت در عملکرد فرایندهای تراکمی و سیلابی می‌شود (فرانکل و دولان، ۲۰۰۷؛ گلن و همکاران، ۲۰۰۶؛ استیلی و همکاران، ۲۰۰۶). این تفاوت‌ها باعث می‌شود مخروط‌هایی با سنین مختلف تفاوت‌های بارزی از لحاظ ویژگی‌هایی فیزیکی و شیمیایی خاک و متعاقباً فرایندهای بیوشیمیایی کنترل‌کننده دینامیک کربن به نمایش بگذارند؛ بنابراین، این لندفرم‌ها می‌توانند نقش عمده‌ای در تبادل کربن بین اتمسفر و پدوسفر و تغییرات اقلیمی مرتبط ایفاء کنند.



- 1 Frankel & Dolan
- 2 Glenn
- 3 Staley



شکل ۳. مقایسه فاکتورهای فیزیکی و بیوشیمیایی مؤثر بر سطح انتشار و نسبت معدنی شدن کربن بین مخروط افکنه‌هایی با سنین متفاوت.

بر اساس نتایج، نه تنها نرخ معدنی شدن کربن در سطوح سنی مختلف تفاوت‌های معنی‌داری را نشان داده است. بلکه مکانیزم‌ها و فرایندهای کنترل‌کننده این فاکتور که نقش مهمی در تبادل کربن بین پدوسفر و اتمسفر به عهده دارد در این محیط‌ها متفاوت بوده است. مخروط افکنه‌های فعال جدید بشدت مستعد به فرایندهای سیلابی و تراکمی هستند. وقوع سیلاب‌های ناگهانی و شدید در این مخروط‌ها منجر به افزایش شکست خاکدانه‌های درشت به ذرات ریزتر می‌شود؛ بنابراین اگرچه مقدار ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون در این محیط‌ها افزایش معنی‌داری را نشان داده است، با این حال عملکرد شدید فرایندهای فرسایش آبی، منجر به افزایش جابجایی کربن آلی از لایه‌های سطحی خاک می‌شود، بنابراین کاهش مقادیر کربن آلی باعث شده است که افزایش ذرات ریزدانه نتواند به تنهایی نقشی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها در این محیط‌ها داشته باشد. به طوری که این شرایط منجر به افزایش حساسیت کربن آلی به تنفس میکروبی و متعاقباً افزایش نسبت معدنی شدن کربن می‌شود. در نتیجه اثرات کاهش حفاظت فیزیکی کربن آلی ناشی از کاهش پایداری خاکدانه‌ها شرایط ایده آلی را برای افزایش معدنی شدن کربن آلی فراهم ساخته است.

جدول ۱. ارتباط بین تحول سنی مخروط افکنه‌ها و دینامیک کربن خاک بر اساس نتایج مدل رگرسیون

P-value	Beta	SE	B	متغیرهای پیش بین
مخروط افکنه‌های قدیمی				
۰,۰۰	-	۰,۷۵	-۲,۲۷	مقدار ثابت
۰,۰۳	۱,۲۵	۰,۹۵	۳,۲۴	کربن آلی کل
۰,۰۰	۰,۶۰	۰,۷۰	۱,۰۴	کربن آلی محلول
۰,۰۲	۱,۸۱	۰,۰۱	۰,۸۵	pH
۰,۰۰	۴,۸۶	۱,۰۶	۴,۰۱	تنفس میکروبی
مخروط افکنه‌ها با سن نسبی میانه				
۰,۰۰	-	۰,۹۲	۱,۷۰	مقدار ثابت
۰,۰۰	-۳,۵۰	۰,۸۳	-۱,۴۸	پایداری خاکدانه‌ها
۰,۰۰	-۰,۷۱	۰,۰۳۶	-۰,۵۷	کربن آلی محلول
۰,۰۱	-۳,۰۶	۰,۰۷۵	-۲,۲۶	کربن زیست توده میکروبی
مخروط افکنه‌های جدید				
۰,۰۰	-	۰,۹۰	-۴,۶۸	مقدار ثابت
۰,۰۰	۱,۰۴	۰,۹۰	۲,۱۲	تنفس میکروبی
۰,۰۱	۱,۷۲	۰,۰۰۶	۰,۶۰	کربن معدنی
۰,۰۲	۲,۲۵	۰,۰۳۲	۱,۴۲	کربن آلی محلول
۰,۰۰	۰,۰۵	۰,۰۰۴	۰,۲۳	نیتروژن کل

مخروط افکنه‌های قدیمی به دلیل فرایندهای هوازدگی طولانی‌تر افزایش معنی‌داری در تجمع ذرات ریزدانه (۲-۲۰ میکرون) نشان داده‌اند. از سوی دیگر تکامل فرایندهای فرسایش گالی در این محیط‌ها در مقایسه با مخروط افکنه‌های جوان‌تر بسیار مشهود است. گسترش فرسایش گالی در این محیط‌ها به دلیل فرایندهای سیلابی طولانی مدت منجر به انتقال حجم وسیعی از لایه‌های سطحی غنی از کربن آلی و لایه‌های عمقی خاک شده است. این رخداد با تقویت شکستن خاکدانه‌ها و کمپلکس‌های معدنی-آلی، افزایش حساسیت کربن آلی خاک نسبت به معدنی شدن میکروبی را به دنبال داشته است. در حالی که مخروط‌های جوان (با سن نسبی میانه) در مقایسه با مخروط‌های فعال جدید و قدیمی‌تر محیط نسبتاً پایدارتری را به معرض نمایش گذاشته‌اند. علی‌رغم اینکه مخروط‌هایی با سنین میانه مقادیر بالاتری از افزایش تنفس میکروبی را ناشی از افزایش مؤلفه‌های ناپایدار کربن آلی، یعنی کربن زیست توده میکروبی و کربن آلی محلول به نمایش گذاشته‌اند، نسبت معدنی شدن در این محیط‌ها کاهش چشم‌گیری را در مقایسه با مخروط‌های بسیار جوان و قدیمی‌تر نشان داده است. شکل‌گیری این مخروط‌ها در منطقه مورد مطالعه در قاعده مخروط‌های قدیمی بوده که منجر به افزایش تجمع رسوبات ریزدانه، کاتیون‌های

قابل تبادل و کربن آلی حمل شده از سطوح مخروط‌های قدیمی به سمت این محیط‌ها شده است. از سوی دیگر، اگرچه فرایندهای فرسایش آبی در این سطوح نیز منجر به جدا شدگی و حمل خاک‌های سطحی غنی از کربن آلی می‌شود، ظرفیت جابجایی کمتر فرایندهای فرسایشی در این محیط‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری‌شان (قاعده مخروط‌های قدیمی)، محیط پایداری را برای کربن آلی خاک ایجاد کرده است. در مخروط‌هایی با سنین میانه افزایش یون‌های تبدلی به واسطه ایجاد پل‌های کاتیونی بین ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون و ترکیبات آلی منجر به افزایش پایداری خاکدانه‌ها در این محیط‌ها شده که به نوبه خود حساسیت‌پذیری کربن آلی نسبت به تنفس میکروبی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین علیرغم اینکه مؤلفه‌های ناپایدار کربن آلی و متعاقباً تنفس میکروبی در این محیط‌ها نسبت به سایر مخروط‌ها بسیار زیاد بوده است، نرخ معدنی شدن به دلیل حفاظت کربن آلی خاک ناشی از افزایش پایداری خاکدانه‌ها بسیار پائین‌تر از سایر لندفرم‌ها بوده است. اگرچه مخروط افکنه‌های مورد مطالعه همگی جزء لندفرم‌های تراکمی هستند، ولی تفاوت‌های ژئومورفولوژیک مخروط افکنه‌ها با سنین مختلف باعث می‌شود این محیط‌ها تفاوت‌های بارزی از لحاظ نرخ تبادل کربن از پدوسفر به اتمسفر را به نمایش بگذارند.

۴- جمع‌بندی

شکل‌گیری و تحول مخروط افکنه‌ها نه تنها متأثر از تغییرات اقلیمی است، بلکه این محیط‌ها می‌توانند در گذر زمان به‌طور غیرمستقیم نقش عمده‌ای در چرخه کربن اتمسفر و پدوسفر ایفاء کنند. به دلیل عملکرد انواع متفاوتی از فرایندهای ژئومورفیک مخروط افکنه‌ها محیط‌هایی بشدت ناپایدار شناخته می‌شوند که به‌طور بالقوه بر عملکرد فرایندهای دخیل در دینامیک کربن تأثیر می‌گذارند. فاکتور زمان یکی دیگر از مهم‌ترین دلایل ناپایداری این لندفرم‌ها می‌باشد. عاملی که می‌تواند بشدت روند دینامیک کربن در این محیط‌ها را ناپایدار و بعضاً غیرقابل پیش‌بینی نماید. مخروط‌هایی با سنین مختلف تفاوت‌های مشهودی از لحاظ نوع و عملکرد فرایندهای ژئومورفیک نشان می‌دهند. برای مثال تقریباً تمام بخش‌های مخروط‌های جوان و فعال در معرض فرایندهای سیلابی و نهشته‌گذاری قرار دارند. فرایندهایی نظیر هوازگی، عوارضی مانند ورنی بیابان، سنگفرش‌های بیابانی و در نتیجه نرخ توسعه و تکامل خاک تفاوت‌های بارزی را در مخروط افکنه‌هایی با سنین متفاوت به نمایش می‌گذارند. همچنین افزایش بازه زمانی فعالیت‌های سیلابی در مخروط افکنه‌های بسیار قدیمی، شکل‌گیری و توسعه فرسایش گالی در این محیط‌ها را در مقایسه با مخروط‌های جوان‌تر به‌دنبال داشته است. علیرغم بالا بودن مقادیر شاخص‌های ناپایدار کربن آلی مانند کربن زیست توده میکروبی و کربن آلی محلول در خاک‌های موجود در مخروط‌هایی با سنین میانه، این محیط سهم کمتری از نسبت معدنی شدن را در مقایسه با سایر مخروط افکنه‌ها نشان داده‌اند. شکل‌گیری این مخروط‌ها در منطقه مورد مطالعه در قاعده مخروط‌های قدیمی منجر به افزایش تجمع رسوبات ریزدانه، کاتیون‌های قابل تبادل و کربن آلی حمل شده از سطوح مخروط‌های قدیمی به سمت این مخروط‌ها شده است؛ بنابراین کربن آلی موجود در این

خاکدانه‌های ریز برای بازه‌های زمانی بسیار طولانی غیرقابل دسترس برای معدنی شدن میکروبی می‌باشند. از سوی دیگر، ظرفیت جابجایی کمتر فرایندهای فرسایشی در این محیط‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری‌شان در قاعده مخروط‌های قدیمی، محیطی پایدار برای ترکیب ذرات ناپایدار کربن آلی با رسوبات ریزدانه و کاتیون‌های قابل تبادل فراهم می‌آورد. این مکانیزم منجر به افزایش پایداری خاکدانه‌ها در این محیط‌ها شده که به نوبه خود حساسیت‌پذیری کربن آلی نسبت به تنفس میکروبی را کاهش می‌دهد. برعکس مخروط افکنه‌های قدیمی به دلیل فرایندهای هوازدگی طولانی‌تر افزایش معنی‌دار تجمع ذرات ریزدانه را نشان داده‌اند. از سوی دیگر گسترش فرسایش گالی در این محیط‌ها منجر به انتقال حجم وسیعی از لایه‌های سطحی غنی از کربن آلی و لایه‌های عمقی خاک شده است. به طوری که این رخداد با تقویت شکستن خاکدانه‌ها و کمپلکس‌های معدنی-آلی، افزایش حساسیت کربن آلی خاک نسبت به معدنی شدن میکروبی را به دنبال داشته است.

قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره "۹۹۰۳۱۶۲۵" انجام شده است.

کتابنامه

ایمنی، سپیده؛ صدوق، حسن؛ بهرامی، شهرام؛ محرابیان، احمدرضا؛ نصرتی، کاظم؛ ۱۳۹۹. بررسی رابطه پراکنش جوامع گیاهی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در لندفرم‌های سطح مخروط افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط افکنه های جنوب غرب میامی). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۹(۲). صص ۲۱-۴۳.

https://www.geomorphologyjournal.ir/article_118223.html

بهرامی، شهرام؛ بیرامعلی، فرشته؛ فیله کش، اسماعیل؛ قهرمان، کاوه؛ ۱۳۹۷. بررسی تأثیر ژئومورفولوژی در نوع و تراکم پوشش گیاهی مخروط افکنه‌های فشتنق-سبزووار. فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۱۶(۵۲). صص ۱۹۳-۲۱۰.

https://gdij.usb.ac.ir/article_4004.html

جعفری، غلام حسن؛ محمدی، هژیر؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار آشوبناک فرایندهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز قزل‌اوزن. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۸(۱). صص ۱-۲۳.

https://geoeh.um.ac.ir/article_32993.html

مددی، عقیل؛ مختاری، داود؛ شیرزادی، حمدیه؛ ارسلان، مهرورز؛ ۱۳۹۵. بررسی عملکرد نئوتکتونیک بر مخروط افکنه‌ها با تاکید بر توان لرزه خیزی گسل‌ها (منطقه مورد مطالعه: دامنه‌های شمال غرب سهند). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۲(۲). صص ۳۱-۴۱.

https://geoeh.um.ac.ir/article_29706.html

- Bahrami, S., & Ghahraman, K., 2019. Geomorphological controls on soil fertility of semi-arid alluvial fans: A case study of the Joghatay Mountains, Northeast Iran. *Catena*, 176, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.016>
- Blake, G.R., & Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Madison, WI: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy and Soil Science, pp 363–375. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gea.3340050110>
- Bremner, J. M., 1996. Nitrogen total. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis (Vol. 3). Part. (pp. 1085–1121)*. Madison, WI: Chemical Methods. SSSA ASA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Corre M, Schnabel R, & Shaffer JA., 1999. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. *Soil Biol Biochem*. 31(11):1531–1539. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00074-7)
- David, D. J., 1960. The determination of exchangeable sodium, potassium, calcium and magnesium in soils by atomic absorption spectrophotometry. *Analyst*, 85(1012), 495–503. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1960/an/an9608500495>
- Dickerson, R. P., Bierman, P. R., & Cocks, G., 2015. Alluvial fan surfaces and an age-related stability for cultural resource preservation: Nevada Test and Training Range, Nellis Air Force Base, Nevada, USA. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, 551-568. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.05.002>
- Field, J., 2001. Channel avulsion on alluvial fans in southern Arizona. *Geomorphology*, 37(1-2), 93-104. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00064-7)
- Frankel, K. L., & Dolan, J. F., 2007. Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2). <https://doi.org/10.1029/2006JF000644>
- Gee, G.W., and Or, D., 2002. Particle-Size Analysis. In: Warren, A.D. (ed) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America Inc, pp 255-295. [https://www.wiley.com/en-ai/Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods pp9780891188933](https://www.wiley.com/en-ai/Methods+of+Soil+Analysis,+Part+4:+Physical+Methods+pp9780891188933)
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., & Dorsch, S. J., 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2), 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>
- Kemper, W.D., & Y Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Kute A, editor. *Method of soil analysis, Part-1. Physical and mineralogical methods*. Madison (WI): Soil Science Society of America, pp. 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c14>
- Melton, M.A. 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal Geology*, 73, 1–38. <https://www.jstor.org/stable/30066379>
- Nadeu, E., Gobin, A., Fiener, P., Van Wesemael, B., & Van Oost, K., 2015. Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at the regional scale: the role of lateral fluxes. *Global change biology*, 21(8), 3181-3192. <https://doi.org/10.1111/gcb.12889>
- Ponti, D.J. 1985. The Quaternary alluvial sequence of the Antelope Valley, California. *Geological Society America Special Paper*, 203, 79–96. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/books/book/339/chapter-pdf/965614/spe203-0079.pdf>
- Rabbi, S. F., Wilson, B. R., Lockwood, P. V., Daniel, H., & Young, I. M., 2014. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses. *Geoderma*, 216, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.023>

- Regmi, N. R., & Rasmussen, C., 2018. Predictive mapping of soil-landscape relationships in the arid Southwest United States. *Catena*, 165, 473-486. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.031>
- Smith, S. V., Renwick, W. H., Buddemeier, R. W., & Crossland, C. J., 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(3), 697-707. <https://doi.org/10.1029/2000GB001341>
- Staley, D. M., Wasklewicz, T. A., & Blaszczyński, J. S., 2006. Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data. *Geomorphology*, 74(1-4), 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.014>
- Thomas GW., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks DL, editor. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison (WI): SSSA; p. 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Van Hemelryck, H., Fiener, P., Van Oost, K., Govers, G., & Merckx, R., 2010. The effect of soil redistribution on soil organic carbon: an experimental study. *Biogeosciences*, 7(12), 3971-3986. <https://bg.copernicus.org/articles/7/3971/2010/>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Xiao, H., Li, Z., Chang, X., Huang, B., Nie, X., Liu, C., ... & Jiang, J., 2018. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. *Geoderma*, 329, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.018>

