

تأثیر پوسته‌های زیستی گلسنگی بر ویژگی‌های خاک‌های مشتق شده از رسوبات شنی اوایل هولوسن

محسن سلیمان‌زاده؛ دانشجوی دکترای گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

فرهاد خرمالی*؛ استاد گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

محمد سهرابی؛ استادیار سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی، تهران، ایران

رضا قربانی نصرآبادی؛ استادیار گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

مارتین کهل؛ استاد مؤسسه جغرافیای دانشگاه کلن، کلن، آلمان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۵

چکیده

پوسته‌های زیستی نقش قابل توجهی در تثبیت تپه‌های شنی ایفا می‌کنند. پوسته‌های زیستی گلسنگی و فیزیکی پراکنش گسترده‌ای بر تپه‌های شنی اوایل هولوسن در شمال استان گلستان دارند. مطالعه‌ای با هدف بررسی تأثیر پوسته‌های زیستی گلسنگی بر خصوصیات خاک سطحی و در نتیجه تکامل و پایداری این تپه‌های شنی انجام شد. نمونه‌برداری از خاک‌های تحت پوشش سه گونه گلسنگی انجام و برخی خصوصیات فیزیکیوشیمیایی و بیولوژیکی خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد حضور پوسته‌های زیستی و فیزیکی خصوصیات سطح خاک را تغییر می‌دهند. درصد مقادیر در اندازه شن ریز و سیلت درشت در خاک‌ها تحت پوشش گلسنگ بیشتر از پوسته‌های فیزیکی است. به نظر می‌رسد مورفولوژی و ساختار پوسته‌های زیستی گلسنگی سبب به دام انداختن ذرات در اندازه شن ریز و سیلت درشت شده است. خاک‌های تحت پوشش گونه‌های مختلف گلسنگ دارای مقادیر کربن آلی، کربوهیدرات، و پایداری خاک‌دانه‌های بیشتر نسبت به پوسته‌ها فیزیکی بودند. هدایت الکتریکی به مقدار قابل توجهی در خاک‌های تحت پوشش گونه‌های گلسنگ نسبت به پوسته‌های فیزیکی کاهش نشان داد. به نظر می‌رسد حضور پوسته‌های زیستی بر خاک‌های مشتق شده از رسوبات شنی اوایل هولوسن نقش مهمی در بهبود خصوصیات خاک و به دام انداختن گرد و غبار ایفا می‌کنند. کلیدواژگان: پایداری خاک، تپه‌های شنی، خصوصیات خاک، گلسنگ، هولوسن.

مقدمه

پوسته‌های خاک (پوسته‌های زیستی و فیزیکی) به صورت گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک پراکنش دارند. پوسته‌های فیزیکی در نتیجه اثر آب و باد بر ذرات خاک در سطوح بایر تشکیل می‌شوند (گوو و همکاران ۲۰۰۸). پوسته‌های فیزیکی می‌توانند در ادامه به پوسته‌های زیستی- که عمدتاً ترکیبی از باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، گلسنگ‌ها، خزها، و بقیه ارگانسیم‌ها هستند- توسعه یابند (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲؛ بلنپ و همکاران ۲۰۱۶).

مطالعات اخیر نشان می‌دهند تشکیل پوسته‌های زیستی بر سرزمین‌های دارای شن روان به سبب پوشش گیاهی کم، فعالیت جریان قوی شن، و ناپایداری خاک در سطح بسیار دشوار است (لین و کو ۱۹۹۳). اگر فعالیت شن در اثر باد کنترل و سطح خاک با استقرار پوشش یا به صورت مکانیکی پایدار شود، پوسته‌های زیستی و فیزیکی به تدریج روی سطح خاک به وجود می‌آیند (فنگ و همکاران ۲۰۰۷؛ لن‌هنز و همکاران ۲۰۰۹). شواهد نشان می‌دهد در فرایند تشکیل پوسته‌های خاک ابتدا یک پوسته فیزیکی تشکیل می‌شود و به دنبال آن پوسته‌های زیستی به وجود می‌آیند (هو و همکاران ۲۰۰۵). از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تفاوت‌های قابل توجهی بین توالی‌های پوسته‌ها در مراحل مختلف توالی وجود دارد (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). ژائو و همکارانش (۲۰۱۱) نشان دادند هیچ پوسته‌ای روی تپه‌های شنی روان بدون پوشش گیاهی به وجود نیامده است؛ درحالی‌که در تپه‌هایی که با پوشش گیاهی به مدت ۳ یا ۸ یا ۱۵ سال تثبیت شده‌اند پوسته‌های فیزیکی و بیولوژیکی تشکیل شده‌اند. پوسته‌ها فیزیکی، گل‌سنگی، و خزه با ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد پوشش به ترتیب روی تپه‌ها تثبیت و به وسیله کاشت گیاهان به مدت ۳، ۸، و ۱۵ سال تشکیل شده‌اند. استقرار پوشش گیاهی روی تپه‌های شنی روان تشکیل و توسعه پوسته‌های خاک را ارتقا می‌دهد (لی و همکاران ۲۰۰۵). گئو و همکارانش (۲۰۰۸) گزارش کردند که با کاهش چرای دام و حفاظت از تپه‌های شنی روان منطقه هورچن (چین) در مقابل فعالیت‌های انسانی و حضور بانک بذر خاک و شرایط محیطی و اکولوژیکی کوچک پوشش گیاهی احیا و در نهایت تپه‌های شنی روان به تدریج تثبیت شدند. افزایش چشمگیر پوشش گیاهی نه تنها سطح خاک را در مقابل فرسایش بادی محافظت می‌کند، بلکه سبب به دام انداختن ذرات ریز و گردوغبار و در نتیجه سبب افزایش قابل توجه بخش ریزذرات تا عمق ۲/۵ سانتی‌متری سطح می‌شود. ته‌نشینی مداوم ذرات ریز (گردوغبار) بر شن‌های تثبیت‌شده مواد فراوانی را برای تشکیل پوسته‌های زیستی فراهم می‌کند. محققان نشان داده‌اند پوسته‌های زیستی نقش قابل توجهی در تثبیت تپه‌های شنی ایفا می‌کنند. این پوسته‌ها، علاوه بر اینکه پوششی در سطح خاک ایجاد و از فرسایش خاک جلوگیری می‌کنند، با اضافه کردن ترکیبات آلی خاک سبب پایداری تپه‌های شنی می‌شوند (الدیج و گرین ۱۹۹۴).

پوسته‌های زیستی، که در چند سانتی‌متری سطح خاک حضور دارند، ذرات خاک را به هم متصل و از فرسایش خاک در اثر آب و باد جلوگیری می‌کنند و سبب تجمع کربن و نیتروژن در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شوند (ویر و همکاران ۲۰۱۶). سیانوباکتری‌های رشته‌ای جزء اولین موجودات هستند که بر سطح خاک ظاهر شدند و ذرات خاک را به هم متصل کردند. بعد از پایداری سطح خاک توالی با جلبک‌های سبز، سیانوباکتری‌های کوچک، گل‌سنگ‌ها، و خزه‌های ابتدا و میانه و انتهای توالی ادامه پیدا می‌کند (زانگ و همکاران ۲۰۱۸). به طور کلی، پوسته‌های زیستی به صورت فیزیکی و زیستی سبب حفاظت سطح خاک می‌شوند (گائو و همکاران ۲۰۱۷). عامل اصلی اتصال‌دهنده ذرات به هم در پوسته‌های غالب با سیانوباکتری‌های رشته‌ای پلی‌ساکارید خارج از سلولی است؛ درحالی‌که در پوسته‌های زیستی غالب با گل‌سنگ عامل اصلی اتصال ذرات به هم هیف‌قارچ‌ها و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی سیانوباکتری‌های هم‌زیست با گل‌سنگ‌ها هستند (گاریسا- پیچل و همکاران ۲۰۱۶). محققان نشان داده‌اند که با حرکت از سمت ابتدای توالی پوسته‌های زیستی به انتهای توالی پوسته‌های زیستی مقادیر فتوستتوز، بیومس میکروبی، پلی‌ساکارید خارج سلولی، آنزیم‌ها، و سلیت و رس افزایش پیدا می‌کند (لن و همکاران ۲۰۱۲؛ زانگ و همکاران ۲۰۱۵). چامیزو و همکارانش

(۲۰۱۲) نشان دادند مقادیر کربن آلی خاک، محتوای آب، و پایداری خاک‌دانه‌ها در خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی بیشتر از پوسته‌های فیزیکی است و همچنین گزارش کردند تأثیر پوسته‌های خز و گلسنگ بیشتر از پوسته‌های سیانوباکتری است. گائو و همکارانش (۲۰۱۷) با مطالعه پوسته‌های زیستی بر خاک‌های لسی نشان دادند حضور پوسته‌های زیستی خز و گلسنگ به ترتیب سبب افزایش ۴ و ۱/۵ برابر ماده آلی خاک نسبت به خاک بایر شده‌اند و نشان دادند که پوسته‌های زیستی خز نسبت به پوسته‌های سیانوباکتری و خاک بایر بیشتر فرسایش‌پذیری و هدررفت خاک را کاهش می‌دهند. کاکه و همکارانش (۲۰۱۸) با مطالعه روی تأثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در مراتع آلاگل شمال استان گلستان نشان دادند حضور پوسته‌های زیستی سبب افزایش کربن آلی، نیتروژن، فسفر، مس، و آهن و کاهش پ-هاش، کربنات کلسیم، کلسیم، منیزیم، و درصد سدیم تبدلی و محلول شده است. همچنین، خاک‌های تحت پوشش این پوسته‌های زیستی نسبت به خاک‌های بدون پوسته زیستی دارای میانگین قطر خاک‌دانه بیشتر بودند.

تپه‌های شنی به صورت محلی^۱ در بخش‌های شمالی و غربی دشت گرگان گسترش پیدا کرده‌اند و اغلب در مجاورتشان تالاب‌های دائمی قرار دارند (موسر ۲۰۰۹). رحیم‌زاده و همکارانش (۲۰۱۹) با مطالعه‌ای روی سن‌یابی و تکامل این تپه‌های شنی نشان دادند که این تپه‌های در اوایل دوره هولوسن تشکیل شده‌اند و از لحاظ مورفولوژیکی پارابولیک^۲ هستند. پوسته‌های زیستی روی تپه‌های شنی شمال دشت گرگان پراکنش گسترده‌ای دارند. مطالعات محدودی درباره تأثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک در این منطقه انجام شده است (کسلخه و همکاران ۲۰۱۲؛ کاکه و همکاران ۲۰۱۸). این مطالعات بدون شناسایی گونه‌های مختلف پوسته‌های زیستی (مثلاً گلسنگ، خز، سیانوباکتری) انجام شده و صرفاً در خاک‌های با پوشش پوسته و بدون پوسته صورت گرفته است. با توجه به اینکه بعد از استقرار تپه‌های شنی این پوسته‌ها نقش مهمی در استقرار و تکامل تپه‌های شنی ایفا می‌کنند و تأثیر مهمی بر تغییر خصوصیات خاک می‌گذارند، مطالعه‌ای با هدف بررسی اثر گونه‌های مختلف پوسته‌های زیستی گلسنگی و پوسته‌های فیزیکی بر تپه‌های شنی اطراف آلاگل انجام شد.

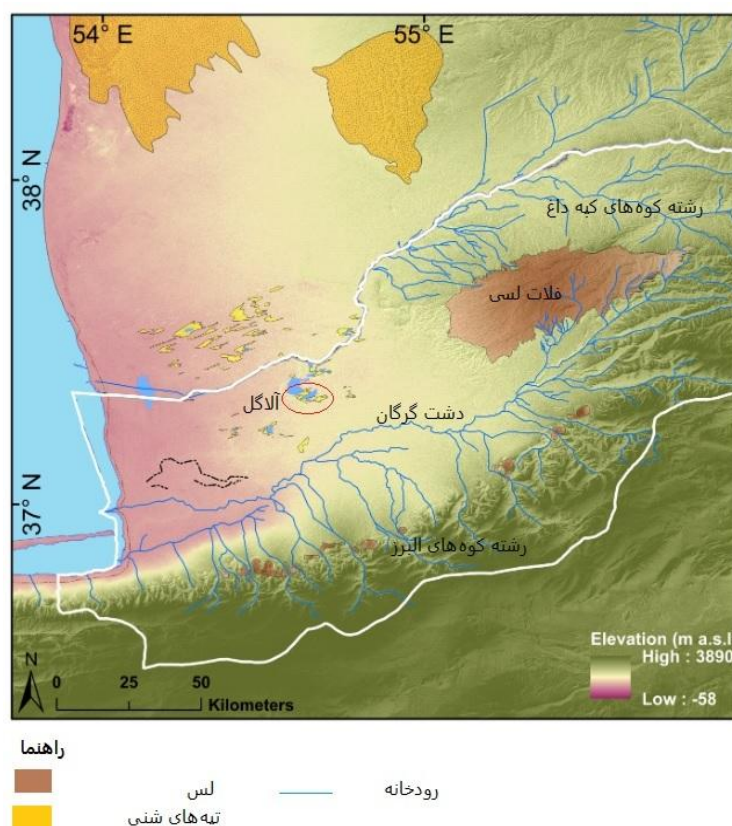
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تپه‌های شنی اطراف تالاب آلاگل (37° 20' 13" N, 54° 34' 13" E)، واقع در شمال استان گلستان، برای مطالعه تأثیر پوسته‌ها زیستی بر برخی خصوصیات خاک سطحی انتخاب شد (شکل ۱). بر اساس آمار بارش از ایستگاه هواشناسی اینچه‌برون میانگین بارندگی سالیانه ۲۵۳ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۹/۲ درجه سانتی‌گراد است. رسوبات کواترنری از قاره تا محیط‌های کم‌عمق دریایی دشت گرگان را می‌پوشاند. به طور کلی، دشت گرگان و اطراف آن دارای سوابق غنی از رسوبات بادی است. پای شیب رشته‌کوه‌های کپه‌داغ را، که در شرق استان قرار داد،

1. Local
2. Parabolic

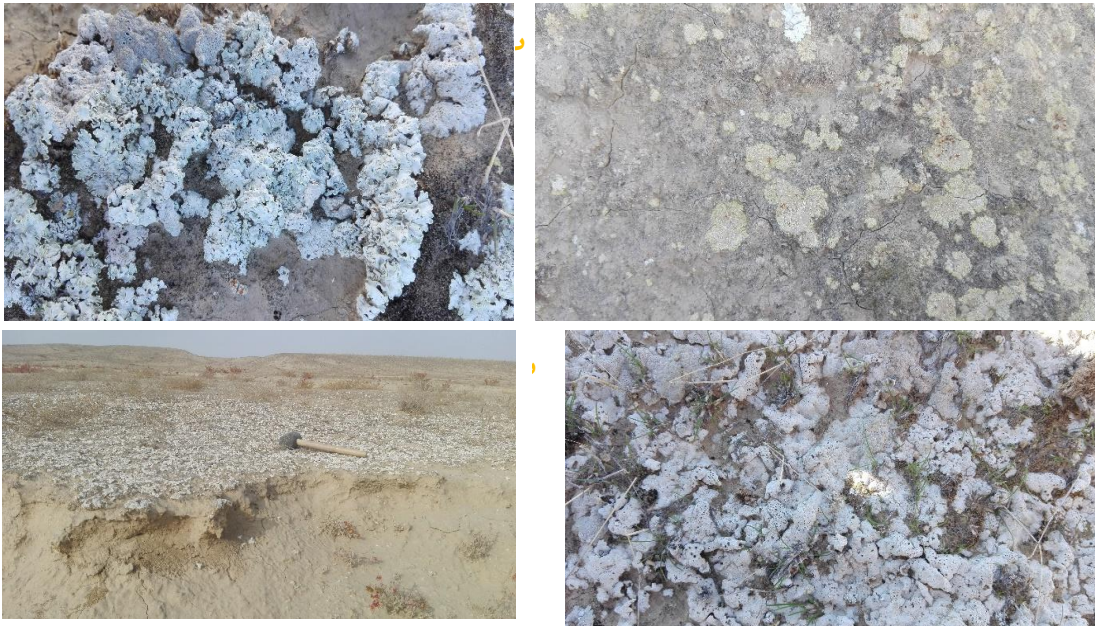
پوشش لس به ضخامت ۷۰ متر پوشانده است و شیب‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز در جنوب استان گلستان به صورت غیر یکنواخت و پراکنده با رسوبات لسی تقریباً به ضخامت ۳۰ متر پوشیده شده است (فرچن و همکاران ۲۰۰۹؛ لئور و همکاران ۲۰۱۷). تپه‌های شنی به صورت منطقه‌ای در قسمت شمال و غرب دشت گرگان گسترش پیدا کرده‌اند که اغلب در مجاورتشان تالاب‌های دائمی قرار دارد (موسر ۲۰۰۹). تپه‌های شنی اطراف تالاب آلاگل، که دارای مورفولوژی پارابولیک هستند و اوایل دوره هولوسن تشکیل شده‌اند (رحیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹)، در حال حاضر پراکنش خوبی از پوسته‌های فیزیکی و زیستی دارند. ازین‌رو، این تپه‌های شنی برای بررسی خصوصیات خاک تحت تأثیر گونه‌های مختلف گل‌سنگ انتخاب شدند.



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

بعد از بازدیدهای صحرائی، تعدادی از گونه‌های گل‌سنگ غالب منطقه جمع‌آوری و جهت شناسایی به آزمایشگاه انتقال داده شدند. گونه‌های *Diploschistes diacapsis* (Ach.) Lumbsch، *Gyalolechia fulgens* (Sw.)، *Squamarina lentigera* (Weber) و *Frödén & Arup Fulgensia fulgens* (Sw.)، *Søchting* (شکل ۲). برای نمونه‌برداری از خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی گل‌سنگی و پوسته‌های فیزیکی، ابتدا سه پلات (۵۰×۵۰ متر) روی قلّه تپه‌های شنی اطراف تالاب آلاگل با توپوگرافی مشابه مشخص شد. سپس، در هر پلات، به منزله تکرار (هر پلات ۵۰×۵۰ متر یک تکرار)، با استفاده از پلات‌های ۵۰×۵۰ سانتی‌متری، ۱۰ نمونه گرفته شد. نمونه‌های

گرفته‌شده از هر پلات (۵۰×۵۰ متر) با هم مخلوط شدند و یک نمونه مرکب به دست آمد. نمونه‌برداری از خاک زیر گونه‌های مختلف گلسنگ از عمق ۰ تا ۲ و ۲ تا ۵ سانتی‌متر انجام شد. برای این کار ابتدا پوسته‌های زیستی گلسنگی از سطح خاک جدا شدند و سپس نمونه‌برداری کاملاً استریل (ضد عفونی وسایل نمونه‌برداری و دست با الکل) از خاک زیرین (عمق‌های ۰ - ۲ تا ۲ - ۵ سانتی‌متری) این پوسته‌ها انجام شد. نمونه‌ها برای آنالیز به آزمایشگاه انتقال داده شدند.



شکل ۲. پوسته‌های زیستی گلسنگی و فیزیکی مورد مطالعه: الف) گلسنگ گونه *Squamarina lentigera*؛ ب) گلسنگ گونه *Gyalolechia fulgens*؛ پ) گلسنگ گونه *Diploschistes diacapsis*؛ ت) پوسته فیزیکی تشکیل‌شده در کنار پوسته‌های زیستی گلسنگی

آنالیزهای آزمایشگاهی

میزان کربن آلی خاک به روش والکلی- بلاک اندازه‌گیری شد (پیچ و همکاران ۱۹۸۲). برای هضم و عصاره‌گیری کربوهیدرات، نمونه‌های خاک از الک ۴/۷۵ میلی‌متری عبور داده شدند و با استفاده از روش آون (۸۵ درجه سانتی‌گراد) و اضافه کردن اسید سولفوریک عصاره‌گیری انجام شد. در روش آون به یک گرم از هر نمونه ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۰/۵ مولار اضافه و به مدت ۱۶ ساعت داخل آون در دمای ۸۵ درجه قرار داده شد و با سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه عصاره‌گیری صورت گرفت (ادسودن و همکاران ۲۰۰۱) و از محلول صاف رویی برای تعیین غلظت کربوهیدرات استفاده شد؛ بدین ترتیب که ۲ میلی‌لیتر از عصاره برداشته و به آن ۰/۰۵ میلی‌لیتر فنل ۸۰ درصد وزنی و ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ (خلوص ۹۸ درصد) جهت ایجاد رنگ زرد متمایل به نارنجی اضافه شد و مقدار جذب با استفاده از اسپکتروفوتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر خوانده شد (دوبوا ۱۹۵۶). برای تهیه منحنی استاندارد جهت محاسبه مقدار کربوهیدرات از محلول گلوکز استفاده شد (ادسودن و همکاران ۲۰۰۱). کربنات کلسیم معادل به روش خنثی کردن مواد خنثی‌شونده با اسید کلریدریک و تیتراسیون اسید اضافی با سود صورت پذیرفت (پیچ و همکاران ۱۹۸۷).

اسیدیتۀ خاک در حالت گل اشباع و با استفاده از دستگاه پهاش متر الکتروود شیشه‌ای اندازه‌گیری شد (مک‌لین ۱۹۸۲). هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی در عصارۀ اشباع اندازه‌گیری شد (رودس ۱۹۸۲). مقدار گچ به روش رسوب به وسیلۀ استون تعیین شد (نلسون ۱۹۸۲).

جهت تعیین وضعیت پایداری خاک‌دانه‌ها از روش الک مرطوب استفاده شد. ابتدا نمونه‌های خاک از الک ۴/۷۵ میلی‌متری رد شدند و پس از اسپری نمونۀ الک‌شده با آب، به منزلهٔ پیش‌تیمار، با استفاده از سری الک‌های ۲ و ۱ و ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متری به مدت ۱۰ دقیقه در آب نوسان داده شدند. مرطوب کردن نمونه‌ها پیش از شروع کار از گسیخته شدن ناگهانی خاک‌دانه‌ها جلوگیری می‌کند (کمپر و روسنا ۱۹۸۶). پس از جمع‌آوری خاک باقی‌ماندهٔ روی هر الک، نمونه‌ها به آون منتقل و سپس توزین شدند. کمیت MWD به کمک رابطهٔ ۱ محاسبه شد.

رابطهٔ ۱

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

که در آن X_i میانگین قطر خاک‌دانه‌هایی است که روی هر الک باقی می‌ماند، W_i نسبت وزن خاک‌دانه‌ها در هر الک به وزن کل خاک، و n تعداد الک‌هاست.

تعیین توزیع اندازهٔ ذرات (PSD^1) با آنالیزور پراش لیزری^۲، که دارای بازۀ اندازه‌گیری ۰/۰۴ تا ۲۰۰۰ میکرومتر است، در دانشگاه کلن آلمان انجام شد. آماده‌سازی نمونه‌ها برای تعیین اندازهٔ ذرات بر اساس روش استاندارد ماچالت و همکارانش (۲۰۰۸) انجام شد. برای از بین بردن مواد آلی، نمونه‌ها با آب اکسیژنهٔ ۱۵ درصد تیمار شد. کربنات‌ها در این روش حذف نشدند. در نهایت، نمونه‌ها با اضافه کردن سدیم پیروفسفات ۰/۱ نرمال و استفاده از شیکر مافوق صوت پراکنده و آمادهٔ اندازه‌گیری شدند.

در این تحقیق، برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده، از نرم‌افزار SAS و طرح آماری فاکتوریل بر پایهٔ کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. برای آنالیزهای آماری گونه‌های گل‌سنگ و عمق متغیرهای مستقل و کربن آلی، کربوهیدرات، کربنات کلسیم معادل، هدایت الکتریکی، گچ، میانگین قطر خاک‌دانه، و پ-هاش متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارهای توزیع اندازهٔ ذرات با استفاده از برنامهٔ گرید استات^۳، که در نرم‌افزار اکسل اجرا می‌شود، انجام شد (بلوت و همکاران ۲۰۰۱).

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک

برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک‌های تحت پوشش گونه‌های گل‌سنگ در جدول ۱ آمده است. نتایج نشان می‌دهد حضور گونه‌های مختلف گل‌سنگ سبب بهبود خصوصیات خاک نسبت به پوسته‌های فیزیکی می‌شود. بیشترین مقادیر

1. Particle size distribution
2. Beckman-Coulter LS 13320 PIDS laser diffraction particle size analyzer
3. GRADISTAT (Version 8.0)

کربن آلی و کربوهیدرات در خاک‌های تحت پوشش گونه *S.lentigera* در عمق اول مشاهده شد و از نظر آماری دارای تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد با بقیه پوسته‌ها در هر دو عمق است. سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها شروع‌کننده توالی پوسته‌های زیستی‌اند که سبب پایداری و حاصلخیزی خاک می‌شوند و بعد از این‌ها گلسنگ‌ها و خزه‌های ابتدا و میانه و انتهای توالی روی سطح خاک گسترش پیدا می‌کنند. گونه‌های موجود در میانه توالی و انتهای توالی پوسته‌های زیستی مقدار بیشتری کربن آلی و کربوهیدرات به خاک اضافه می‌کنند (وو و همکاران ۲۰۰۹؛ سو و همکاران ۲۰۰۹). زانگ و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند همان‌طور که پوسته‌های زیستی توسعه پیدا می‌کنند باکتری‌های تثبیت‌کننده کربن در پوسته‌های گلسنگی افزایش می‌یابند و سبب افزایش کربن در خاک‌های مناطق بیابانی می‌شوند. چامیزو و همکارانش (۲۰۱۲) نشان دادند که خاک‌های تحت پوشش توالی‌های انتها (خزه و گلسنگ) مقادیر کربن و نیتروژن بیشتری نسبت به پوسته‌های فیزیکی و پوسته‌های زیستی ابتدای توالی دارند و همچنین نشان دادند، با افزایش عمق، تأثیر این پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک کم می‌شود. سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبز هم‌زیست با گلسنگ‌ها می‌توانند تثبیت کربن را با فتوسنتز و تشکیل کربوهیدرات در شرایط محیطی مناسب ارتقا دهند. میجر (۲۰۱۰) گزارش کرد سیانوباکتری‌ها و جلبک‌های سبز در طول فتوسنتز سبب افزایش کربن آلی خاک به شکل کربوهیدرات می‌شوند. همچنین اعلام کرد با افزایش عمق از مقدار کربوهیدرات خاک تحت تأثیر پوسته‌های زیستی کاسته می‌شود. این کاهش به این دلیل است که عمده موجودات فتوسنتزکننده نزدیک سطح خاک زندگی می‌کنند و کربوهیدرات را به مثابه منبعی از کربن به داخل خاک ترشح می‌کنند (بلنپ و لنگ ۲۰۰۱). حضور پوسته‌های زیستی گلسنگی روی سطح خاک سبب افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها در هر دو عمق می‌شود. تأثیر این پوسته‌ها بر پایداری خاک‌دانه‌ها در عمق اول بیشتر از عمق دوم مشاهده شد. گلسنگ‌ها با محافظت از سطح خاک در مقابل ضربات مستقیم قطرات باران و متصل کردن ذرات خاک توسط رایزینها^۱ (بوکر و همکاران ۲۰۰۸) و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (کربوهیدرات) خود سبب افزایش پایداری خاک می‌شوند (چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). به نظر می‌رسد ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی توسط سیانوباکتری‌ها و جلبک‌ها و باکتری‌های هم‌زیست و غیر هم‌زیست (موجود در زیستگاه گلسنگ‌ها) با گلسنگ‌ها سبب افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و در نتیجه بهبود ساختمان خاک می‌شود. وقتی سطح خاک بدون پوشش و شرایط مناسب محیطی برای تشکیل پوسته‌های زیستی مهیا باشد، ابتدا سیانوباکتری‌های رشته‌ای در سطح خاک مستقر و با تولید پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی سبب به دام انداختن گردوغبار و تشکیل خاک‌دانه می‌شوند. کولسی و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند سیانوباکتری‌های رشته‌ای و جلبک‌های سبز ماتریکس پوسته‌های زیستی را تشکیل می‌دهند و در چند میلی‌متری سطح خاک رشد می‌کنند. این موجودات برای شروع خاک‌دانه‌سازی بسیار مهم‌اند و به افزایش پایداری خاک کمک می‌کنند. چامیزو و همکارانش (۲۰۱۲) اعلام کردند پوسته‌های زیستی توسعه‌یافته و در انتهای توالی مانند گلسنگ و خره باعث افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها تا عمق ۵ سانتی‌متری سطح خاک می‌شوند و با افزایش عمق از میزان این پایداری کاسته می‌شود. چودری و همکارانش (۲۰۰۹) گزارش کردند پوسته‌های زیستی نهایتاً تا عمق ۱۵ سانتی‌متری بر پایداری خاک تأثیر مثبت می‌گذارند. کاکه و همکارانش (۲۰۱۸) نشان دادند پایداری خاک‌دانه‌های تا عمق ۱۵ متری خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی بیشتر از خاک‌های بدون پوسته‌های زیستی است.

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، بیشترین مقدار گچ (۲۹/۴۴ درصد) در خاک‌های تحت پوشش گونه *G. fulgens* مشاهده شده که دارای تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد با گونه‌های *S. lentigera* و *D. diacapsis* و پوسته‌های فیزیکی در هر دو عمق است. همچنین، علاوه بر مقدار گچ، خاک‌های تحت پوشش گونه *G. fulgens* هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به دو گونه *S. lentigera* و *D. diacapsis* دارند. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی مربوط به پوسته‌های فیزیکی است که تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد با گونه‌های مختلف گل‌سنگ دارد. عابد و همکارانش (۲۰۱۲) نشان دادند خاک‌های دارای پوسته‌های زیستی نسبت به خاک‌های بدون پوسته زیستی هدایت الکتریکی کمتری دارند. به نظر می‌رسد در این منطقه حضور پوسته‌های زیستی گل‌سنگی در سطح خاک پوششی را به وجود آورده که سبب افزایش بازتاب نور خورشید و نگهداری رطوبت بیشتر و کاهش تبخیر و در نتیجه سبب کاهش مقادیر هدایت الکتریکی و گچ می‌شود؛ درحالی‌که در پوسته‌های فیزیکی تبخیر بالاست که سبب انتقال املاح به عمق‌های بالایی خاک شده است. منطقه آلاگل، به دلیل اینکه بین زمین‌های پست بین دریای خزر و تالاب آلاگل قرار گرفته، دارای شوری بالایی است (کاکه و همکاران ۲۰۱۸). کاکه و همکارانش (۲۰۱۸) نشان دادند که خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی هدایت الکتریکی، سدیم، کلسیم، منیزیم، سدیم تبادل، و نسبت جذبی سدیم کمتری نسبت به خاک‌های بدون پوشش دارند. عجمی و خرمالی (۱۳۹۰) دریافتند که مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در حضور پوشش گل‌سنگ به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و اعلام کردند پوشش‌های زیستی سطح خاک می‌توانند با سازوکارهای خاصی شوری خاک را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند.

نتایج نشان می‌دهد خاک‌های تحت پوشش گونه‌های مختلف گل‌سنگ نسبت به پوسته‌های فیزیکی پ-هاش کمتری دارند و کمترین مقادیر مربوط به گونه *G. fulgens* در هر دو عمق است. این کاهش پ-هاش در خاک‌های تحت پوشش گونه *G. fulgens* می‌تواند در اثر مقادیر بالای گچ باشد. خاک‌های دارای گچ نسبت به خاک‌های دارای کربنات کلسیم پ-هاش خاک را کاهش می‌دهند (خراسانی و یزدی ۲۰۱۱). به طور کلی حضور پوسته‌های زیستی گل‌سنگی در سطح خاک سبب کاهش جزئی پ-هاش خاک نسبت به پوسته فیزیکی می‌شود. این کاهش در عمق اول بیشتر از عمق دوم است. این کاهش را می‌توان نتیجه چند فرایند تفسیر کرد. افزایش نفوذپذیری خاک‌های تحت پوشش گل‌سنگ‌ها در نتیجه افزایش خاک‌دانه‌سازی و کاهش چگالی ظاهری می‌تواند سبب شست‌وشوی نمک‌های محلول و کاتیون‌های قلبایی (کلسیم، منیزیم، سدیم) به عمق پایین خاک شود. از طرف دیگر، زیر پوسته‌های زیستی جمعیت میکروبی زیادی وجود دارد که با تنفس سلولی سبب افزایش مقدار دی‌اکسید کربن خاک و در نتیجه کاهش پ-هاش خاک می‌شوند (بودل ۲۰۰۵؛ لین و همکاران ۲۰۱۳). علاوه بر این‌ها، مواد آلی تولیدی توسط گونه‌های مختلف گل‌سنگ می‌توانند سبب کلاته کردن کاتیون‌های بازی و سبب انتقال آن‌ها به اعماق پایین‌تر شود (کونکوسترینا-زبوری و همکاران ۲۰۱۳). همچنین، اسیدهای آلی تولیدشده به وسیله گونه‌های مختلف پوسته‌های زیستی گل‌سنگی می‌توانند سبب کاهش پ-هاش خاک‌های تحت تأثیر خود شوند (لئو و همکاران ۲۰۱۲). کاکه و همکاران (۲۰۱۸) نیز کاهش مقدار پ-هاش در خاک‌های تحت تأثیر پوسته‌های زیستی را نسبت به خاک بایر نشان دادند.

کاهش مقدار کربنات کلسیم معادل در خاک‌های تحت پوشش گونه‌های مختلف گل‌سنگ، به‌ویژه در عمق اول،

مشاهده شد. خاک‌های تحت پوشش گونه‌های گلسنگ دارای مقادیر کمتر آهک نسبت به پوسته‌های فیزیکی در عمق اول هستند و تفاوت معنادار در سطح ۵ درصد دارند. کمترین میزان کربنات کلسیم معادل در خاک‌های تحت تأثیر گونه *S.lentigera* در هر دو عمق مشاهده شد. به نظر می‌رسد حذف رطوبت بیشتر در خاک‌های تحت پوشش گونه‌های مختلف گلسنگ و چرخه‌های خشک و مرطوب‌شده این خاک‌ها سبب انحلال کربنات کلسیم و انتقال آن به مرور زمان به عمق‌های پایین شده است. از طرف دیگر، اسیدهای آلی تولیدشده از این گلسنگ‌ها سبب تسریع انحلال کربنات کلسیم شده است (لتو و همکاران ۲۰۱۲).

جدول ۱. برخی خصوصیات خاک‌های تحت پوشش گونه‌های گلسنگ

گونه	عمق	خصوصیات						
		گچ %	هدایت الکتریکی dS/m	پ-هاش	میانگین قطر خاک‌دانه میلی‌متر	کربنات کلسیم %	کربن آلی (گرم بر کیلوگرم)	کربوهیدرات (گرم بر کیلوگرم)
<i>D.diacapsis</i>	اول	۰/۸۵c	۲/۴۰c	۸/۰۸b	۰/۳۲c	۱۴b	۱۲/۷۱b	۲/۶۵b
	دوم	۱/۴۴c	۲/۵۷c	۸/۱۹a	۰/۱۳d	۱۶/۱۷a	۶/۵۰c	۱/۱۳d
<i>G.fulgens</i>	اول	۲۰/۴۸b	۲۳/۶۳bc	۷/۷۲c	۰/۱۵d	۱۳/۶۷bc	۵/۳۶c	۰/۹۴de
	دوم	۲۹/۴۴a	۲۳/۷۷bc	۷/۵۷d	۰/۰۲۵e	۱۲/۸۳c	۲/۶۰d	۰/۵۳e
<i>S.lentigera</i>	اول	۰/۴۷c	۲/۲۷c	۸/۰۳b	۰/۳۸b	۱۰/۵۰d	۲۰/۲۱a	۴/۰۶a
	دوم	۰/۳۳c	۲/۹۱c	۸/۲۲a	۰/۵۳a	۱۰/۳۳d	۱۰/۲b	۱/۹۰c
پوسته فیزیکی	اول	۱/۴۵c	۳۱/۵۴b	۸/۱۹a	۰/۰۲۲e	۱۶/۱۷a	۵/۷۵c	۰/۹۵de
	دوم	۱/۴۵c	۸۲/۱۶a	۸/۲۲a	۰/۰۱۳e	۱۶/۶۷a	۶/۴۷c	۰/۸۷de

همبستگی میانگین قطر خاک‌دانه با کربن آلی و کربوهیدرات

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد میانگین قطر خاک‌دانه با کربن آلی و کربوهیدرات همبستگی مثبت بالایی دارد. همبستگی میانگین قطر خاک‌دانه با گچ و کربنات کلسیم منفی و معنادار است (جدول ۲). حضور پوسته‌های زیستی گلسنگی روی سطح خاک سبب افزایش مقادیر کربن آلی و کربوهیدرات خاک شده است (جدول ۱) و در نتیجه افزایش خاک‌دانه‌سازی و پایداری خاک‌دانه‌ها را به دنبال داشته است. گریگوریچ و همکارانش (۱۹۹۷) گزارش کردند کربوهیدرات‌ها نقش بسیار مهمی در تشکیل و پایداری خاک‌دانه‌ها دارند و بر کیفیت خاک از طریق افزایش نفوذ آب تأثیر می‌گذارند. چامیزو و همکارانش (۲۰۱۲) گزارش کردند خاک‌هایی که تحت پوشش پوسته‌های زیستی گلسنگی قرار دارند مقدار بیشتری کربن آلی به خاک اضافه می‌کنند و در نتیجه تجمع کربن آلی خاک‌دانه‌سازی افزایش پیدا می‌کند. میجر (۲۰۱۰) نشان داد با افزایش مقدار کربوهیدرات در خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی سیانوباکتری در بیابان کالاهاری پایداری خاک افزایش پیدا می‌کند. لانگ (۲۰۰۳) اعلام کرد پوسته‌های زیستی توسعه‌یافته مقادیر بیشتری کربن به خاک می‌افزایند و خاک‌دانه‌سازی را افزایش می‌دهند و در نتیجه سبب پایداری خاک می‌شوند. کاکه و

همکارانش (۲۰۱۸) اعلام کردند با افزایش کربن آلی در خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی مقدار خاک‌دانه‌سازی نسبت به خاک بایر افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون میان پارامترهای اندازه‌گیری شده زیر پوسته‌های زیستی گل‌سنگی و فیزیکی (۲۴ نمونه)

پ- هاش	هدایت الکتریکی	گچ	کربنات کلسیم	کربوهیدرات	کربن آلی	قطر خاک‌دانه
۰/۲۵	-۰/۵۸**	-۰/۴۰*	-۰/۷۸**	۰/۷۱**	۰/۷۰**	۱
۰/۲۹	-۰/۳۹	-۰/۵۴**	-۰/۵۵**	۰/۹۷**	۱	کربن آلی
۰/۲۲	-۰/۴۷*	-۰/۴۸*	-۰/۵۷**	۱		کربوهیدرات
۰/۲۶	۰/۴۹*	-۰/۱۱	۱			کربنات کلسیم
-۰/۹۲**	۰/۰۷	۱				گچ
۰/۰۶	۱					هدایت الکتریکی
۱						پ- هاش

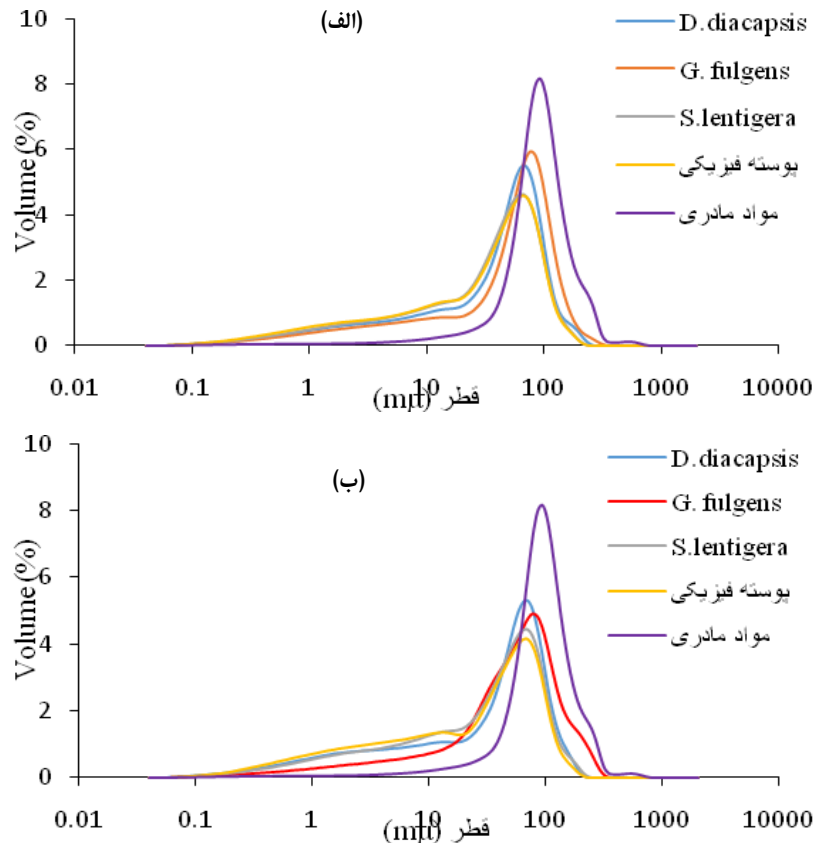
* و ** به ترتیب معناداری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

توزیع اندازه ذرات

الگوی منحنی توزیع اندازه ذرات خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی و فیزیکی در دو عمق و ماده مادری در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مواد مادری نسبت به خاک‌های سطحی تحت پوشش پوسته‌های زیستی و فیزیکی اندازه‌های بزرگ‌تری دارند. توزیع اندازه ذرات مواد مادری مشابه نتایج رحیم‌زاده و همکارانش (۲۰۱۹) است که اعلام کردند با این اندازه ذرات تپه‌ها از نوع شنی هستند.

توزیع اندازه ذرات خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی گل‌سنگی و فیزیکی در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور پوسته‌های زیستی و فیزیکی سبب تغییرات درصد ذرات در اندازه‌های مختلف شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر شن درشت و ریز مواد مادری خیلی بیشتر از خاک‌های تحت تأثیر پوسته‌های زیستی و فیزیکی است؛ درحالی‌که مقادیر سلیت درشت و ریز و رس مواد مادری نسبت به خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی و فیزیکی کمتر است. به طور کلی مقادیر رس و سیلت ریز و درشت پوسته‌های فیزیکی بیشتر یا برابر با خاک‌های تحت پوشش گونه‌های مختلف گل‌سنگ است. مقادیر شن درشت (۱۰۰۰ - ۲۵۰ میکرومتر) و شن ریز (۶۳ - ۲۵۰ میکرومتر) در خاک‌های تحت پوشش گونه *G. fulgens* دارای بیشترین مقدار است و تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به بقیه گونه‌ها و پوسته‌های فیزیکی دارد. کمترین مقادیر شن ریز در خاک‌های تحت پوشش گونه *S. lentigera* و پوسته فیزیکی به ترتیب در دو عمق و عمق دوم مشاهده شد. به طور کلی مقادیر شن ریز برای خاک‌های تحت پوشش گونه‌های گل‌سنگ بسیار متفاوت است. بیشترین و کمترین مقدار شن ریز به ترتیب مربوط به گونه‌های *G. fulgens* و *S. lentigera* مشاهده شد. بیشترین سیلت درشت (۸ - ۶۳) مربوط به خاک‌های تحت پوشش گونه *S. lentigera* و پوسته فیزیکی در عمق اول بود که تفاوت معنادار با بقیه گونه‌های گل‌سنگ داشت. گونه *G. fulgens* نسبت به دو گونه دیگر گل‌سنگ مقادیر کمتری سیلت درشت داشت. خاک‌های تحت پوشش گونه

G. fulgens نسبت به دو گونه *S. lentigera* و *D. diacapsis* مقادیر سلیت ریزتر کمتری داشت و بین گونه‌های مختلف گلسنگ بیشترین مقادیر سلیت ریز مربوط به گونه *S. lentigera* بود. بیشترین مقدار رس مربوط به پوسته فیزیکی در عمق دوم بود. خاک‌های تحت پوشش گونه‌ای *S. lentigera* و *D. diacapsis* نسبت به گونه *G. fulgens* مقادیر بیشتر رس داشتند.



شکل ۳. توزیع اندازه ذرات خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های فیزیکی و زیستی و مواد مادری؛ الف و ب به ترتیب عمق ۰ تا ۱ و ۲ تا ۵ سانتی‌متری هستند.

به نظر می‌رسد بعد از تثبیت تپه‌های شنی اوایل هولوسن شرایط برای استقرار و تکامل پوسته‌های فیزیکی و زیستی فراهم شده است. زانگ و همکارانش (۲۰۰۵) نشان دادند در بیابان‌های شنی چین ابتدا یک پوسته فیزیکی ضعیف در اثر ته‌نشینی گردوغبار ایجاد می‌شود و پس از آن پوسته‌های زیستی تشکیل می‌شوند. اندازه ذرات یکی از خصوصیات خاک است که بعد از تثبیت تپه‌های شنی در اثر تشکیل پوسته‌های زیستی و فیزیکی تغییر می‌کند. به نظر می‌رسد اندازه ذرات بعد از تثبیت تپه‌های شنی منطقه آلاگل تحت تأثیر پوسته‌های فیزیکی و زیستی کوچک‌تر از اندازه ذرات مواد مادری تشکیل‌دهنده تپه‌ها شده است. چن و همکارانش (۲۰۰۹) نشان دادند با تثبیت تپه‌های شنی روان و ادامه روند توالی پوسته‌های زیستی به تدریج اندازه ذرات خاک کوچک‌تر می‌شود. پوسته‌های زیستی می‌توانند با جذب گردوغبار

سبب افزایش ذرات ریز خاک شوند. گلسنگ‌ها با پوششی ناهموار، که در سطح خاک ایجاد می‌کنند، سبب به دام انداختن فیزیکی گردوغبار می‌شوند. از طرف دیگر، سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبز هم‌زیست با گلسنگ‌ها با تولید پلی‌ساکارید خارج سلولی سبب به دام انداختن ذرات گرد و غبار می‌شوند. افزایش مقادیر سیلت و رس در پوسته‌های زیستی در اثر به دام انداختن گردوغبار (ویلیامز و همکاران ۲۰۱۲) و تولید کانی‌های ثانویه توسط پوسته‌های زیستی به دلیل هوادیدگی کانی‌هایی مانند کوارتز و فلدسپار است (گومز و همکاران ۲۰۱۲). گارسیا-پیچل و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند که ذرات کوچک گردوغبار با پوشش پوسته‌های بیولوژیکی به دام می‌افتند و در بسیاری از موارد این ذرات کوچک به خاک‌های زیرین تحت پوشش پوسته‌های زیستی منتقل می‌شوند. گارسیا-پیچل و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند سیانوباکتری‌های ابتدای توالی پوسته‌های زیستی با ترشح پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی سبب به دام انداختن گردوغبار می‌شوند.

جدول ۳. توزیع اندازه ذرات خاک‌های تحت پوشش پوسته‌های زیستی گلسنگی و فیزیکی

پوسته	عمق سانتی‌متر	۱۰۰۰-۲۵۰	۲۵۰-۶۳	۶۳-۸	۸-۲	<۲
		درصد (%)				
<i>D.diacapsis</i>	اول	۰/۰۷۳b	۳۶/۲۳bc	۴۳/۴۷ab	۱۰/۹۰c	۹/۳۷c
	دوم	۰/۰۱۱b	۳۴/۷۷cd	۴۲/۹۳ab	۱۱/۷۳bc	۱۰/۵۷bc
<i>G.fulgens</i>	اول	۰/۷۷a	۵۰/۷۰a	۳۴/۱۲c	۸/۱۰d	۶/۳۰d
	دوم	۰/۷۰a	۴۰/۹۳b	۴۰/۵۰b	۹/۰۳d	۶/۸۰d
<i>S.lentigera</i>	اول	۰b	۲۹/۹e	۴۷/۷۷a	۱۲/۱۳bc	۱۰/۱۶bc
	دوم	۰b	۲۹/۵e	۴۶/۴۰ab	۱۳/۲۳ab	۱۰/۸۳b
پوسته فیزیکی	اول	۰b	۳۰/۰۷de	۴۷/۸a	۱۱/۵۰c	۱۰/۶۳bc
	دوم	۰b	۲۷/۶۳e	۴۳/۹۸ab	۱۴/۵۰a	۱۳/۹۳a
مواد مادری	۱۵۰	۳/۸	۷۵	۱۸	۱/۵	۱/۶

تأثیر توالی گلسنگ‌ها بر خصوصیات خاک

به طور کلی، دو گونه گلسنگی *D.diacapsis* و *S.lentigera* تأثیر بیشتری بر خصوصیات خاک نسبت به گونه *G.fulgens* و پوسته‌های فیزیکی داشتند (جدول‌های ۱ و ۳). پوسته‌های زیستی در توالی‌های مختلف آثار متفاوتی بر خصوصیات خاک می‌گذارند (وبر و همکاران ۲۰۱۶). توالی پوسته‌های زیستی گلسنگی منطقه مورد مطالعه طبق روش‌های بلنپ و الدرینج (۲۰۰۱) و مارتینز و همکارانش (۲۰۰۶) تعیین شد (جدول ۴). زمان تشکیل گونه‌های گلسنگ در ابتدای توالی بسیار زمان‌بر است و ممکن است چندین سال طول بکشد تا یک پوسته زیستی گلسنگی توسعه یافته تشکیل شود. گونه گلسنگی *S.lentigera* در ابتدای توالی قرار دارد و با توجه به اینکه مدت زمان زیادی برای تشکیل این گونه طی شده است، احتمالاً، بیشتر خصوصیات را نسبت به گونه *D.diacapsis* تحت تأثیر قرار داده است. همان‌طور که پوسته‌های زیستی در طول توالی توسعه پیدا می‌کنند، به‌ویژه در انتهای توالی، تجمع مواد غذایی خاک به افزایش باکتری‌ها و آنزیم‌های خاک مرتبط با تجزیه کربن و نیتروژن آلی خاک منجر می‌شوند (زانگ و همکاران

۲۰۱۶). اگرچه گونه *G. fulgens* نیز در ابتدای توالی پوسته‌های زیستی گلسنگی قرار دارند، نسبت به گونه *S. lentigera*، تأثیر کمتری بر خصوصیات خاک داشته‌اند. این تفاوت احتمالاً به دلیل تلوس بزرگ‌تر و پیوسته‌گونه *S. lentigera* نسبت به گونه *G. fulgens* است. لزارو و همکارانش (۲۰۰۸) اعلام کردند ویژگی‌های فیزیولوژی و مورفولوژی گونه‌های مختلف گلسنگ احتمالاً دلیل اصلی تفاوت خصوصیات خاک هستند. گونه‌های *D. diacapsis* و *S. lentigera* در منطقه مورد مطالعه نسبت به گونه *G. fulgens* تلوس بزرگ‌تری دارند (شکل ۲). تلوس‌های ضخیم و پیوسته بیومس قابل توجهی از پوسته‌های زیستی گلسنگی را بر سطح خاک‌های این منطقه به وجود می‌آورند و احتمالاً خصوصیات خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تلوس ضخیم و یکپارچه گونه *D. diacapsis* سطح خاک را در مقابل فرسایش آبی و بادی حفاظت می‌کند و همچنین سبب بهبود خصوصیات خاک می‌شود (لزارو و همکاران ۲۰۰۸؛ چامیزو و همکاران ۲۰۱۲). پوسته‌های زیستی که بیومس بیشتری دارند پلی‌ساکارید بیشتری ترشح می‌کنند. این تولید پلی‌ساکارید بیشتر به خاک‌دانه‌سازی بیشتر، نسبت به پوسته‌های زیستی که بیومس کمتری دارند، منجر می‌شود (بلنپ ۲۰۰۳). کولسی و همکارانش (۲۰۱۶) اعلام کردند اندازه و نوع ساختار پوسته‌های زیستی (مثلاً مورفولوژی) می‌توانند مقدار به دام افتادن گردوغبار را کنترل کنند.

جدول ۴. گروه مورفولوژیکی و توالی گونه‌های گلسنگ

مرحله توالی	گروه مورفولوژیکی	گونه
میانه	crustose	<i>D. diacapsis</i>
اولیه	crustose	<i>G. fulgens</i>
میانه	crustose	<i>G. subbracteata</i>
اولیه	squamulose	<i>P. decipiens</i>
اولیه	squamulose	<i>S. lentigera</i>

نتیجه

حضور پوسته‌های زیستی گلسنگی روی تپه‌های شنی اوایل هولوسن سبب بهبود خصوصیات خاک می‌شوند. گونه *S. lentigera* بیشترین تأثیر را بر بهبود خصوصیات خاک دارد. توزیع اندازه ذرات در خاک‌های تحت تأثیر پوسته‌های زیستی و فیزیکی تقریباً مشابه است؛ غیر از گونه *G. fulgens*، که به نظر می‌رسد روی خاک‌های با اندازه درشت‌تر و دارای مقادیر بالاتر گچ بهتر رشد می‌کند. با توجه به حضور تالاب آلاگل در این منطقه، خاک‌های اطراف آن تقریباً شوری بالایی دارند. این شوری بالا در بسیاری موارد می‌تواند سبب نفوذپذیری کم باران و در نتیجه سبب افزایش مقدار فرسایش آبی شود. حضور این پوسته‌های زیستی غیر از گونه *G. fulgens* سبب کاهش مقادیر شوری خاک به مقدار قابل توجه می‌شود. علاوه بر کاهش شوری با افزایش میانگین قطر خاک‌دانه نیز سبب افزایش پایداری سطح خاک می‌شوند. به نظر می‌رسد، علاوه بر توالی پوسته‌های زیستی، توالی‌های گونه‌های مختلف گلسنگ نیز آثار متفاوتی بر خصوصیات خاک داشته باشند. گونه‌ها در ابتدای توالی پوسته‌های زیستی گلسنگی تأثیر بیشتری بر بهبود خصوصیات خاک دارند.

پوسته‌های زیستی گل‌سنگی توسعه یافته سبب استقرار و پایداری تپه‌های شنی اوایل هولوسن می‌شوند. ازین‌رو، حفاظت از این پوسته‌ها در مقابل تخریب‌های ناشی از مدیریت انسانی بسیار مهم است.

منابع

- Abed, R. M., Al-Sadi, A. M., Al-Shehi, M., Al-Hinai, S., & Robinson, M. D. (2012). "Diversity of free-living and lichenized fungal communities in biological soil crusts of the Sultanate of Oman and their role in improving soil properties", *Soil Biology and Biochemistry*, 57, pp. 695–705.
- Adesodun, J. K., Mbagwu, J. S. C., & Oti, N. (2001). "Structural stability and carbohydrate contents of an Ultisol under different management systems", *Soil and Tillage Research*, 60, pp. 135–142.
- Ajami, M. & Khormali, F. (2011). "Role of Lichen Covers in Conserving Loess-derived Soils in Northern Golestan Province: Physico-chemical and Micromorphological Approach", *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 15(57), pp. 91-100. (in Persian with English abstract)
- Belnap, J. (2003). "The world at your feet: desert biological soil crusts", *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(4), pp. 181-189.
- Belnap, J. & Eldridge, D. (2001). "Disturbance and recovery of biological soil crusts". In *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, (Eds J Belnap, OL Lange), pp. 363–383. Springer- Verlag: Berlin.
- Belnap, J. & Lange, O. L. (2001). "*Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*", Springer-Verlag, Berlin.
- Belnap, J., Weber, B., & Büdel, B. (2016). "Biological soil crusts as an organizing principle in drylands", In *Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands*, Springer, Cham, pp. 3-13.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., & Froyen, L. (1998). "Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve pipette method", *Catena*, 32 (3-4), pp. 193-208.
- Blott, S. J. & Pye, K. (2001). "GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments", *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), pp. 1237-1248.
- Bowker, M. A., Belnap, J., Büdel, B., Sannier, C., Pietrasiak, N., Eldridge, D. J., & Rivera-Aguilar, V. (2016). "Controls on distribution patterns of biological soil crusts at micro-to global scales", In *Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands*, Springer, Cham. pp. 173-197.
- Bowker, M. A., Belnap, J., Chaudhary, V. B., & Johnson, N. C. (2008). "Revisiting classic water erosion models in drylands: the strong impact of biological soil crusts", *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), pp. 2309-2316.
- Büdel, B. (2005). "Microorganisms of biological crusts on soil surfaces", In: Varma, A., Buscot, F. (Eds.), *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*, Springer, Berlin, 3, pp. 307–323.

- Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I., & Domingo, F. (2012). "Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems", *Soil Biology and Biochemistry*, 49, pp. 96-105.
- Chaudhary, V. B., Bowker, M. A., O-Dell, T. E., Grace, J. B., Redman, A. E., Rillig, M. C., & Johnson, N. C. (2009). "Untangling the biological contributions to soil stability in semiarid shrublands", *Ecological Applications*, 19 (1), pp. 110-122.
- Chen, R., Zhang, Y., Li, Y., Wei, W., Zhang, J., & Wu, N. (2009). "The variation of morphological features and mineralogical components of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China", *Environmental Geology*, 57(5), pp. 1135-1143.
- Colesie, C., Felde, V. J. M. N. L., & Büdel, B. (2016). "Composition and macrostructure of biological soil crusts", In *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*. Springer, Cham, pp. 159-172.
- Concostrina-Zubiri, L., Huber-Sannwald, E., Martínez, I., Flores, J., & Escudero, A. (2013). "Biological soil crusts greatly contribute to small-scale soil heterogeneity along a grazing gradient", *Soil Biology and Biochemistry*, 64, pp. 28-36.
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). "Colorimetric method of determination of sugars and related substances", *Analytical chemistry*, 28(3), pp. 350-356.
- Eldridge, D. J. & Greene, R. S. B. (1994). "Microbiotic soil crusts-a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia", *Soil Research*, 32(3), pp. 389-415.
- Fang, H. Y., Cai, Q. G., Chen, H., & Li, Q. Y. (2007). "Mechanism of formation of physical soil crust in desert soils treated with straw checkerboard", *Soil and Tillage Research*, 93, pp. 222-230.
- Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., & Skowronek, A. (2009). "Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran", *Quaternary International*, 198, pp. 220-233.
- Ga.o, L., Bowker, M. A., Xu, M., Sun, H., Tuo, D., & Zhao, Y. (2017). "Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China", *Soil Biology and Biochemistry*, 105, pp. 49-58.
- Garcia-Pichel, F., Felde, V. J. M. N. L., Drahorad, S. L., & Weber, B. (2016). "Microstructure and weathering processes within biological soil crusts", In *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*, Springer, Cham, pp. 237-255.
- Gomez, D. A., Aranibar, J. N., Tabeni, S., Villagra, P. E, Garibotti, I. A, & Atencio, A. (2012). "Biological soil crust recovery after long-term grazing exclusion in the Monte Desert (Argentina). Changes in coverage, spatial distribution, and soil nitrogen", *Acta Oecologica*, 38, pp. 33-40.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Doran, J. W., Pankhurst, C. E., & Dwyer, L. M. (1997). "Biological attributes of soil quality", In: Horwath, W., Kuzyakov, Y. (Eds.), *Developments in Soil Science*, Elsevier, pp. 81-113.
- Guo, Y., Zhao, H., Zuo, X., Drake, S., & Zhao, X. (2008). "Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China", *Environmental Geology*, 54(3), pp. 653-662.
- Hu, X., Liu, L. Y., Cai, Q. G., Li, S. J., & Cai, C. F. (2005). "Progress in research on soil crust",

- Journal of Arid Land Resources and Environment*, 19 (3), pp. 145–149. (in Chinese with English abstract)
- Takeh, J., Gorji, M., Sohrabi, M., Tavili, A., & Pourbabaee, A. A. (2018). “Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran”, *Soil and Tillage Research*, 181, pp. 152-159.
- Kemper, W. D. & Rosenau, R. C. (1986). “Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*”, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 425-442.
- Kesalkheh, S., Khormali, F., Kiani, F., & Barani Motlagh, M. (2012). “Physico-chemical properties and micromorphology of the microbiotic crusts (lichen) on loess hills in Alagol area, Golestan Province”, *Journal Water Soil Conservation*, 19, pp. 1-19. (in Persian with English abstract)
- Khorsandi, F. & Yazdi, F. A. (2011). “Estimation of saturated paste extracts’ electrical conductivity from 1: 5 soil/water suspension and gypsum”, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(3), pp. 315-321.
- Lan, S., Wu, L., Zhang, D., & Hu, C. (2012). “Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China)”, *Environmental Earth Sciences*, 65, pp. 77–88.
- Lane, R. W., Menon, M., Mc-Quaid, J. B., Adams, D. G., Thomas, A. D., Hoon, S. R., & Dougill, A. J. (2013). “Laboratory analysis of the effects of elevated atmospheric carbon dioxide on respiration in biological soil crusts”, *Journal Arid Environment*, 98, pp. 52–59.
- Lange, O. L. (2003). “Photosynthesis of soil crust biota as dependent on environmental factors”, In: Belnap J, Lange OL (eds) *Biological soil crusts*, Vol 150, Ecological studies, Springer, Berlin, pp. 217–240.
- Langhans, T. M., Storm, C., & Schwabe, A. (2009). “Biological soil crusts and their microenvironment: impact on emergence, survival and establishment of seedlings”, *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 204 (2), pp. 157–168.
- Lauer, T., Frechen, M., Vlaminc, S., Kehl, M., Lehndorff, E., Shahriari, A., & Khormali, F. (2017b). “Luminescence-chronology of the loess palaeosol sequence Toshan, Northern Iran – A highly resolved climate archive for the last glacial-interglacial cycle”, *Quaternary International*, 429, pp. 3–12.
- Lázaro, R., Cantón, Y., Solé-Benet, A., Bevan, J., Alexander, R., Sancho, L. G., & Puigdefábregas, J. (2008). “The influence of competition between lichen colonization and erosion on the evolution of soil surfaces in the Tabernas badlands (SE Spain) and its landscape effects”, *Geomorphology*, 102, pp. 252–266.
- Leão, P. N., Engene, N., Antunes, A., Gerwick, W. H., & Vasconcelos, V. (2012). “The chemical ecology of cyanobacteria”, *Natural product reports*, 29, pp. 372–391.
- Li, W. H., Ren, T. R., & Zhou, Z. B. (2005). “Study on the soil physicochemical characteristics of biological crust on sand dune surface in Gurbantünggüt Desert, Xinjiang Region”, *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(4), pp. 619–627.
- Lin, Y. Q. & Qu, J. J. (1993). “Crust development and changes of micro-environment on sand surface”, *Journal of Applied Ecology*, 4(4), pp. 393–398. (in Chinese with English abstract)

- Machalett, B., Oches, E. A., Frechen, M., Zöller, L., Hambach, U., Mavlyanova, N. G., Marković, S. B., & Endlicher, W. (2008). "Aeolian dust dynamics in central Asia during the Pleistocene: driven by the long-term migration, seasonality, and permanency of the Asiatic polar front", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, pp. 1-22.
- Mager, D. M. (2010). "Carbohydrates in cyanobacterial soil crusts as a source of carbon in the southwest Kalahari, Botswana", *Soil Biology and Biochemistry*, 42, pp. 313-318.
- Martínez, I., Escudero, A., Maestre, F. T., De la Cruz, A., Guerrero, C., & Rubio, A. (2006). "Small-scale patterns of abundance of mosses and lichens forming biological soil crusts in two semi-arid gypsum environments", *Australian journal of botany*, 54, pp. 339-348.
- McLean, E. O. (1982). "Soil pH and lime requirement. In: Page, A.L. (ed.): *Methods of Soil Analysis*. Part 2: Chemical and microbiological properties", Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp: 199-224.
- Moser, M. (2009). Report on Ramsar Advisory Mission No. 60. Address URL: https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RAM/RAM_060_IR_en.pdf.
- Nelson, R. E. (1982). "Carbonate and gypsum", In: Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, second ed. Agron, Monogr, 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 181–197.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). "*Methods of Soil Analysis*". 2th ed. Part 2: Chemical and biological properties, Soil Science Society America, Madison, WI (USA).
- Rahimzadeh, N., Khormali, F., Gribenski, N., Tsukamoto, S., Kehl, M., Pint, A., Kiani, F., & Frechen, M. (2019). "Timing and development of sand dunes in the Golestan Province, northern Iran—Implications for the Late-Pleistocene history of the Caspian Sea", *Aeolian Research*, 41, pp. 100-538.
- Rhoades, J. D. (1982). "Soluble salts", In: A.L. (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp. 167-179.
- Su, Y. G., Li, X. R., Zheng, J. G., & Huang, G. (2009). "The effect of biological soil crusts of different successional stages and conditions on the germination of seeds of three desert plants", *Journal of Arid Environments*, 73, pp. 931–936.
- Weber, B., Büdel, B., & Belnap, J. (2016). *Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands*. Ecological Studies, Vol. 226, Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Williams, A. J, Buck, B.J., & Beyene, M. A. (2012). "Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis", *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), pp. 1685–1695.
- Wu, N., Zhang, Y. M., & Downing, A. (2009). "Comparative study of nitrogenase activity in different types of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China", *Journal Arid Environment*, 73, pp. 828–833.
- Zhang, B. C., Zhou, X. B., & Zhang, Y. M. (2015). "Responses of microbial activities and soil physical-chemical properties to the successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang", *Journal Arid Land*, 7(1), pp. 101–109.
- Zhang, B., Kong, W., Wu, N., & Zhang, Y. (2016). "Bacterial diversity and community along the succession of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China", *Journal of Basic Microbiology*, 56, pp. 670-679.

- Zhang, B., Zhang, Y., Li, X., & Zhang, Y. (2018). "Successional changes of fungal communities along the biocrust development stages", *Biology and fertility of soils*, 54(2), pp. 285-294.
- Zhang, Y. (2005). "The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage", *Chinese Science Bulletin*, 50(2), pp. 117-121.
- Zhao, H. L., Guo, Y. R., Zhou, R. L., & Drake, S. (2011). "The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China", *Geoderma*, 160(3-4), pp. 367-372.