نقش گرد و غبار در تشکیل، و تحول خاک و لندفرم‌ها

علیرضا کریمی*[۱]، امید بیات[۲]

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ * karimi-a@um.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشگاه زوریخ، زوریخ، سوئیس omid.bayat@geo.uzh.ch

چکیده

گرد و غبار (Dust)، مواد معلق در یک محیط گازی (اتمسفر) است. ورود گرد و غبار تمام بخش‌های کره زمین، از استوا تا پهنه‌های یخی قطبی و از کف اقیانوس‌ها تا کوه‌های مرتفع را در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی تحت تاثیر قرار داده است. میانگین ته‌نشست سالانه گرد و غبار در کل کره زمین ۲۰۰ گرم بر متر مربع است. تاثیر گرد و غبار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک، تشکیل پهنه‌های لسی، افق‌های وزیکولار و سنگفرش بیابانی از نتایج مهم افزوده شدن گرد و غبار به سطح خشکی‌ها است. شناسایی سهم گرد و غبار در ویژگی‌های خاک، با استفاده از دو گروه شواهد صحرایی و آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. بافت خاک، رنگ و برخی کانی‌ها مانند گچ، کلسیت و کوارتز می‌تواند به عنوان شواهد صحرایی حضور گرد و غبار استفاده شود. داده‌های آزمایشگاهی، شامل ترکیب عنصری، عناصر نادر خاکی، کانی‌شناسی و ایزوتوپی از مهم‌ترین روش‌های آزمایشگاهی برای تشخیص ورود گرد و غبار به خاک محسوب می‌شوند. نقش گرد و غبار بر ویژگی‌های خاک و تغییر و تحول آن به حدی است که لازم است ورود گرد و غبار را به عنوان یک عامل مهم و موثر بر تشکیل و تغییر و تحول خاک‌سازی در همه جا کره رمین در نظر گرفت.

واژگان کلیدی: ریزش گرد و غبار، افق وزیکولار، سنگفرش بیابانی

مقدمه

گرد و غبار (Dust)، مواد معلق در یک محیط گازی (اتمسفر) و یک جزء مهم و فراگیر در سامانه کره زمین است که متشکل از ذرات جامد معدنی ریز برداشت شده از سطح زمین است (Adebiyi et al., 2023). همچنین، این اصطلاح به رسوب این مواد نیز اطلاق می‌شود. آئروسول (aerosol) ذرات معلق جامد، مایع و گاز در اتمسفر است که می‌توانند شامل مه، دود، نمک‌های اسپری شده از دریا و خاکسترهای (شیشه‌های) آتشفشانی باشد. ولی، گرد و غبار، فقط شامل ذرات جامد و معدنی می‌شود (Prospero et al., 1983).

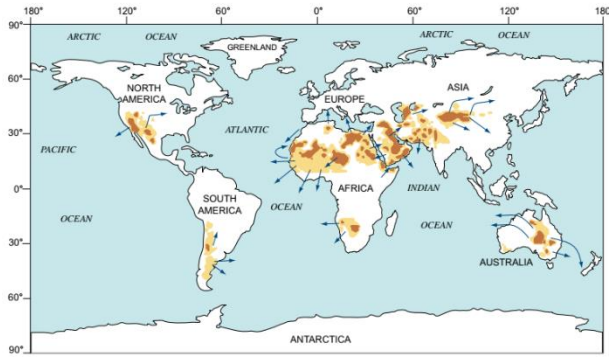
مهم‌ترین ویژگی گرد و غبار، اندازه ذرات است که تاثیر زیادی بر سرنوشت این ذرات در چرخه گرد و غبار دارد (Drakaki et al., 2022). وجه تمایز گرد و غبار از ذرات درشت‌تری مانند شن (که به صورت جهشی توسط باد منتقل می‌شوند)، در برداشت توسط باد، انتقال به اتمسفر و حمل و نقل به صورت معلق است (Muhs. 2013). Pye (۱۹۷۸) گرد و غبار را بر اساس اندازه به دو دسته تقسیم کرد: دسته اول، گرد و غبار معلق کوتاه‌برد (short-term suspension)، شامل ذرات ۲۰ تا ۷۰ میکرون است که نهایتاً تا ۳۰ کیلومتری منبع برداشت، رسوب می‌کنند. ذرات کمتر از ۲۰ میکرون، و بخصوص ذرات کمتر از ۱۰ میکرون، قابلیت انتقال دوربرد (long-range transport) دارند و می‌توانند هزاران کیلومتر از محل برداشت خود منتقل شوند. اگرچه عواملی مانند سرعت باد نیز بر اندازه ذرات منتقل شده موثر است. برای مثال، ذرات گرد و غبار تا حدود ۳۰ میکرومتر پس از طی هزاران کیلومتر از صحرای بزرگ آفریقا، توسط ابزارهای مستقر در هواپیما در طول یک عملیات میدانی در کارائیب اندازه‌گیری شدند (Prospero, 1996). همچنین، ذرات گرد و غبار با قطر بیش از ۷۵ میکرومتر بر فراز اقیانوس اطلس شمالی و اقیانوس آرام رسوب می‌کنند (van der Does et al., 2018).

گرد و غبار یکی از پدیده‌های مهم در تاریخچه کره زمین است که نقش مهمی در سامانه‌های فیزیکی و بیولوژیکی آن داشته است. تمام بخش‌های کره زمین، از استوا تا پهنه‌های یخی قطبی و از کف اقیانوس‌ها تا کوه‌های مرتفع، در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی تحت تأثیر ورود گرد و غبار قرار گرفته‌اند (Zheng et al., 2016).

تأثیر ورود گرد و غبار به خاک می‌تواند از مقادیر کم، که تنها برخی ویژگی‌های خاک را به میزان اندکی تحت تاثیر قرار می‌دهد، تا تشکیل خاک‌های ضخیم لسی متغیر باشد. تاثیر گرد و غبار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک، تشکیل پهنه‌های لسی، افق‌های وزیکولار و سنگفرش بیابانی از نتایج مهم افزوده شدن گرد و غبار به سطح خشکی‌ها است (Turk and Graham, 2011; McAuliffe et al., 2018). اگرچه از ورود مواد از جمله گرد و غبار به خاک تحت نام فرایند افزایش به خاک در مدل سیمونسون آگاهی داریم، ولی اهمیت و شدت تاثیر آن بر ویژگی‌های خاک، کمتر مد نظر قرار می‌گیرد. اگرچه این فرایند بیشتر در مناطق خشک و بیابانی مورد توجه قرار گرفته است ولی در همه مناطق دنیا عامل مهمی در تشکیل و تکامل خاک است. هدف از این بررسی، تشریح اهمیت و جایگاه گرد و غبار در تشکیل و تغییر و تحول خاک است.

منشا گرد و غبار

برای ورود گرد و غبار به اتمسفر، علاوه بر فعالیت باد، نیاز به تولید ذرات ریز نیز وجود دارد. بدیهی است که شرایط سطح زمین نیز باید به گونه‌ای باشد که ذرات، قابل برداشت توسط باد باشند (Engelstaedter et al., 2006). فقدان پوشش سطحی (مانند پوشش گیاهی یا سنگفرش) باعث می‌شود ذرات در معرض برداشت توسط باد قرار گیرند. این شرایط در مناطق خشک و نیمه‌خشک کره زمین حاکم است و مناطقی مانند بیابان‌های این نواحی، منبع اصلی گرد و غبار در کل کره زمین هستند (شکل ۱). در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، بیشتر انتشار گرد و غبار جهانی از یک "کمربند گرد و غبار" وسیع در نیمکره شمالی سرچشمه می‌گیرد که از سواحل غربی آفریقا، در سراسر شبه جزیره عربستان و خاورمیانه، از طریق آسیای مرکزی و جنوبی، تا بیابان‌های چین امتداد دارد (Muhs, 2013; Adebiyi et al., 2023). در این مناطق وسیع، انتشار گرد و غبار یکنواخت نیست، بلکه از محیط‌های ژئومورفیک خاصی سرچشمه می‌گیرد که به عنوان نقاط داغ عمل می‌کنند. این محیط‌ها شامل بسترهای دریاچه‌ای خشک یا دائمی (پلایا) هستند که حاوی مخازن وسیعی از رسوبات ریزدانه غنی از سیلت، رس و نمک هستند؛ مخروط‌افکنه‌ها در پای کوهها و آبراهه‌های با جریان‌های متناوب یا موقتی که رسوبات ریز و قابل برداشت را فراهم می‌کنند (Muhs, 2014).



شکل ۱- نقشه منابع تولید منابع مهم گرد و غبار در کره زمین Muhs (2013)

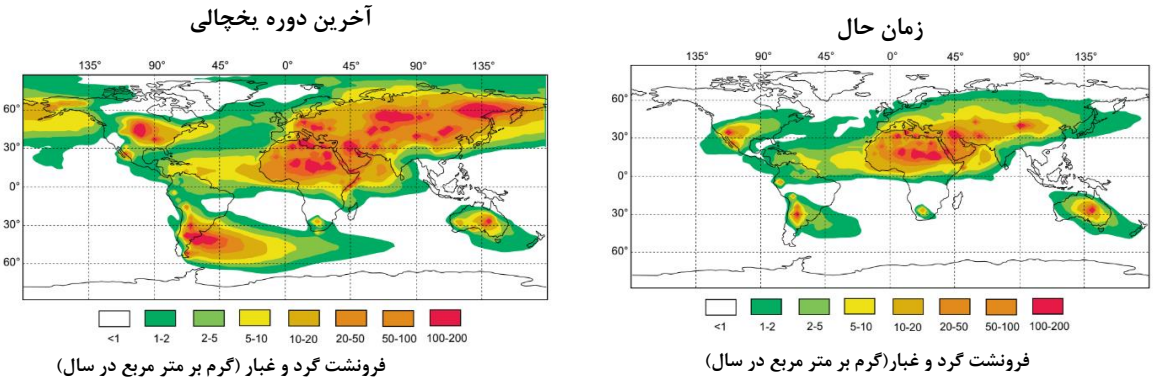
به طور تاریخی، سایش یخچالی، عامل اصلی تولید ذرات ریز، به‌ویژه سیلت، معرفی شده بود. تصور می‌شد تنها این فرایند انرژی کافی برای تولید ذرات ریز را داراست. به مرور، فرایندهای دیگر تولید ذرات ریز شناسایی و تشریح شدند. فرایندهایی مانند سایش ذرات در سیستم‌های آبرفتی، یخ‌هوادیدگی (Frost weathering) و نمک‌هوادیدگی (Salt weathering)، فرسایش سنگ‌ها و رسوبات ریزدانه (مانند مارن و سیلتستون)، و همچنین خاکسترهای آتشفشانی از مهم‌ترین منابع تولید ذرات ریز هستند (Karimi et al., 2011) .

Ziyaee و همکاران (۲۰۱۸)، پلایاهای داخلی ایران و بیابان قره‌قوم در ترکمنستان را منشأ اصلی گرد و غبار در استان خراسان رضوی معرفی کردند. آن‌ها بر این باورند که رواناب‌ها، رسوبات ریز را به پلایاها منتقل می‌کنند و این رسوبات پس از خشک شدن، توسط باد برداشت می‌شوند. Karimi و همکاران (۲۰۰۹) رسوبات مارنی را منشا سیلت برای رسوبات لسی جنوب مشهد معرفی کردند. همچنین، این رسوبات مارنی را منشا گچ و کربنات‌های موجود در خاک‌های تشکیل‌شده روی سنگ‌های گرانیتی و بازی معرفی کردند. رسوبات ریز منتقل‌شده توسط رودخانه هریرود نیز منشأ اصلی رسوبات شنی و لسی در منطقه سرخس هستند (Karimi et al.,2017).

در چند دهه اخیر، فعالیت‌های انسانی نیز باعث افزایش تولید گرد و غبار شده است (Ginoux et al., 2012). خشک شدن تالاب‌ها در جنوب ایران و همچنین دریاچه ارومیه، به منابع جدید گرد و غبار تبدیل شده‌اند. این منابع می‌توانند هم گرد و غبار با قابلیت انتقال در مسافت‌های کوتاه تولید کنند و هم ذرات بسیار ریز با قابلیت انتقال در مسافت‌های طولانی‌تر را به اتمسفر وارد نمایند.

ته‌نشست گرد و غبار

ورود گرد و غبار به خاک و لندفرم‌ها، تاثیر شگرف و قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های آن‌ها دارد. نرخ ورود گرد و غبار به خاک، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی آن، و همچنین شرایط اقلیمی، تعیین‌کننده نهایی تاثیر گرد و غبار بر ویژگی‌های خاک و لندفرم‌ها است (Adebiyi et al., 2023). در نظر گرفتن میزان رسوب گرد و غبار به خاک می‌تواند نشان دهد که این عامل تا چه اندازه در تغیر ویژگی‌های خاک موثر باشد. میزان متوسط فرنشست گرد و غبار در کل کره زمین ۱۱۶۱ تراگرم در سال است (Zheng et al., 2016) که نشان می‌دهد سالانه چه مقدار قابل توجهی ذرات معدنی از سطح زمین برداشت شده و در کل کره زمین پخش می‌شود. برآورد میانگین سالانه فرونشت گرد و غبار در کل کره (شکل ۲) زمین نشان می‌دهد که مقدار آن تا ۲۰۰ گرم بر متر مربع می‌رسد (Mahowald et al., 2006). میانگین ته‌نشست ماهانه تغییرات بیشتری دارد. میزان ورود سالانه گرد و غبار به خاک در استان خراسان رضوی از ۳۱۳/۱۴ گرم بر متر مربع در سال در حاشیه پلایاها تا ۷۴/۶۲ گرم بر متر مربع در سال در مناطق مرتفع کوهستانی متفاوت است (Ziyaee et al., 2018).



شکل ۲. ته‌نشست جهانی گرد و غبار مشتق شده از مدل برای (الف) شرایط آب و هوایی مدرن، و (ب) در طول آخرین دوره یخبندان، برگرفته از Mahowald و همکاران (۲۰۰۶) (Muhs, 2013)

چرخه گرد و غبار فعلی، اگرچه پویا است، اما در مقایسه با شرایط دوره‌های یخبندان گذشته نسبتا ساکن است. بایگانی‌های دیرینه مانند رسوبات اعماق دریا، توالی‌های لس زمینی و هسته‌های یخی قطبی، شواهد روشنی ارائه می‌دهند که نشان می‌دهد زمین در طول مراحل یخبندان دوره کواترنری، سیاره‌ای بسیار غبارآلودتر بوده است. در طول آخرین بیشینه یخبندان (LGM: Last Glacial Maximum)، تقریبا ۲۱۰۰۰ سال پیش، نرخ رسوب گرد و غبار در سطح کره زمین افزایش یافته بود؛ تا حدی که در بسیاری از مکان‌ها ۳ تا ۱۰ برابر بیشتر از نرخ‌های امروزی و در برخی برآوردها تا ۴۰ برابر بیشتر بوده

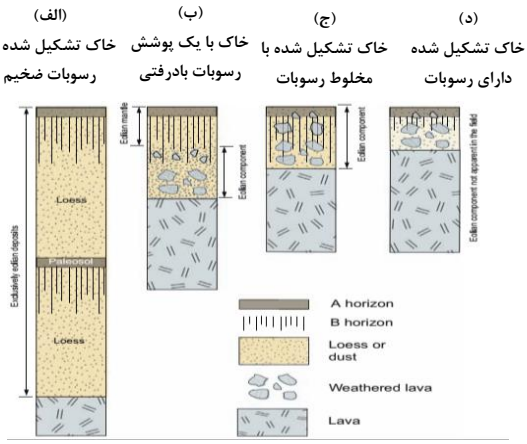
است (Muhs, 2013). میانگین جهانی ته‌نشست گرد و غبار برای ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرومتر در طول LGM حدود ۳/۱ برابر بیشتر از هولوسن قبل از صنعتی شدن بود (Krätschmer et al., 2022).

جایگاه گرد و غبار در مدل‌های خاک‌سازی

معمول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین مدل تشکیل خاک، مدل عاملی ینی است که ریشه در مطالعات دوکوچایف دارد. در این مدل، تشکیل خاک بر روی مواد مادری (چه درجا و چه انتقالی) با ظهور افق A یا O آغاز می‌شود. با گذشت زمان و پیشرفت هوادیدگی فیزیکی و شیمیایی، جبهه تشکیل و تکامل خاک به سمت عمق پیشروی می‌کند و در نهایت منجر به تشکیل پروفیل خاک با مورفولوژی A-B-C می‌شود. در این مدل، خاک از مواد مادری به سمت تکامل حرکت می‌کند و حد نهایی این تکامل، تشکیل یک خاک منطقه‌ای (zonal) است که ویژگی‌های آن عمدتاً توسط اقلیم و موجودات زنده کنترل می‌شود (Schaetzl and Thompson, 2015).

مدل ینی، مدلی یک‌طرفه و در جهت تکامل است؛ در حالی که شواهد صحرایی نشان می‌دهد تشکیل و تحول خاک مسیری یک‌طرفه نیست و فرایندهایی نیز می‌توانند این مسیر را معکوس کنند. از مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل واتسون-استگنر (Watson-Stegner) است که دو مسیر را در نظر می‌گیرد: مسیر پیش‌رونده (به سمت تکامل) و مسیر پس‌رونده (در خلاف جهت تکامل). فرسایش و همچنین افزوده شدن رسوبات جدید (از جمله گرد و غبار) می‌تواند در خلاف جهت تکامل خاک عمل کند. در این مدل، اگر نرخ افزوده شدن رسوبات کمتر از سرعت فرایندهای خاک‌سازی باشد، رسوبات به‌تدریج در خاک جذب و ادغام می‌شوند و برخلاف مدل ینی (که ضخامت ثابت یا کاهشی را پیش‌بینی می‌کند)، باعث افزایش ضخامت خاک به دلیل ورد مواد جدید می‌شوند. اگر نرخ ورود رسوبات بیشتر از سرعت فرایندهای خاک‌سازی باشد، منجر به مدفون شدن خاک قبلی خواهد شد. در این حالت، اگر رسوبات وارده از دارای سیلت (بیش از ۵۰ درصد) باشند، می‌تواند منجر به تشکیل رسوبات لسی شود (Schaetzl and Thompson, 2015).

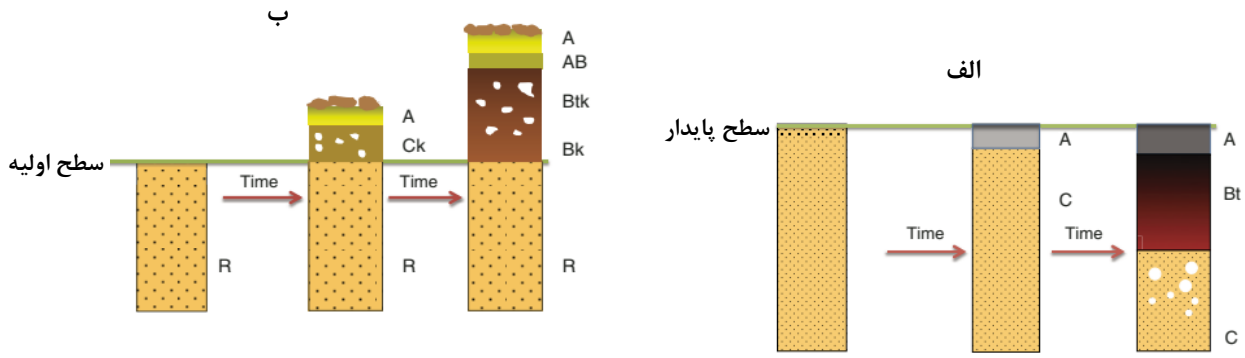
بنابراین، سهم گرد و غبار در خاک می‌تواند از مقادیر بسیار زیاد (مانند رسوبات لسی که به‌سادگی در صحرا قابل تشخیص‌اند) تا مقادیر ناچیز (که تنها با آنالیزهای دقیق ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی قابل ردیابی هستند) متغیر باشد. Yaalon and Ganor (۱۹۷۳) خاک‌ها را بر اساس میزان ورود گرد و غبار و سهم آن در خاکرخ، به صورت پیوسته از خیلی کم تا خیلی زیاد قرار دادند که Muhs (۲۰۱۳) آن را به صورت یک مدل به تصویر کشیده است (شکل ۳).



شکل۳- پیوستار فرضی از درجات مختلف تأثیر رسوبات بادرفتی بر خاک‌ها برگرفته از Yaalon and Ganor (۱۹۷۳) و تصویر شده توسط Muhs (۲۰۱۳). (الف) خاک (مدرن یا قدیمی) تشکیل شده در رسوبات بادرفتی، مانند لس؛ (ب) خاک مدرن تشکیل شده در رسوبات بادرفتی در قسمت بالا و مخلوطی از مواد هوادیده و رسوبات بادرفتی در پائین؛ (ج) تمام خاک مدرن در مخلوطی از رسوبات بادرفتی و سنگ بستر هوادیده تشکیل شده است؛ جزء بادرفتی در صحرا قابل تشخیص است و (د) همه خاک مدرن در مخلوطی از رسوبات بادرفتی و سنگ بستر هوادیده تشکیل شده است، اما جزء بادرفتی در محل قابل تشخیص نیست و فقط با تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی قابل تشخیص است.

نمونه‌ای از تأثیر گرد و غبار، تشکیل افق‌های کلسیک و پتروکلسیک است که در اواسط قرن بیستم توسط Gile و همکاران (۱۹۶۶) تشریح شد. در شمال شرق ایران نیز، وجود لایه‌های ساپرولیتی بر روی سنگ‌های گرانیتی، بازی و فوق بازی، که حاوی بیش از ۴۰ درصد گچ و کربنات کلسیم هستند، نشان از ورود قابل توجه گچ و کربنات‌ها به این خاک‌ها از طریق گرد و غبار دارد (Karimi et al., 2009). خاک‌های اروپا، نیز به مقدار زیادی تحت تأثیر ورود گرد و غبار قرار گرفته‌اند. رسوبات لسی در بسیاری از نقاط اروپا وجود دارند و سایر خاک‌ها نیز در این قاره تا حدودی تحت تأثیر این رسوبات قرار گرفته‌اند. Scheib و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که تقریباً تمامی خاک‌های اروپا تحت تأثیر ورود گرد و غبار قرار گرفته‌اند.

مدل دیگری برای تشکیل و توسعه خاک توسط McFadden (۲۰۱۳) ارائه شده است که کاملا بر اساس ورود گرد و غبار است. این مدل، برخلاف مدل ینی که یک مدل «ضخیم‌شونده به سمت پایین (downward-thickening) است، یک مدل رشدکننده به سمت بالا» (upward-growth) محسوب می‌شود و مک‌فادن آن را پروفیل افزایشی و تورمی (accretionary and inflationary profile) نامید. این مدل بر اساس خاک‌های تکامل‌یافته در بیابان موهاوی (Mojave) ارائه شده است. در این مدل، گرد و غبار به‌مرور به سطح خاکی که دارای سنگفرش (desert pavement) است، افزوده می‌شود. این ذرات با بارش باران به زیر سنگریزه‌ها منتقل شده و به‌تدریج ضخامت خاک به سمت بالا افزایش می‌یابد (شکل ۴). به‌مرور زمان، افق‌های خاکی با درجات تکامل مختلف در این سیستم تشکیل می‌شوند. سنگفرش بیابانی و افق‌های وزیکولار از پیامدهای این فرایند تدریجی افزوده شدن گرد و غبار هستند.



شکل ۴- (الف) مدل تکاملی مرسوم یا متعارف خاکرخ که توسط ینی و دوکوچایف؛ (ب) مدل تکامل خاکرخ از طریق فرآیندهایی که تحت تاثیر تجمع و توسعه افزایشی –تورمی قرار دارند (McFadden, 2013).

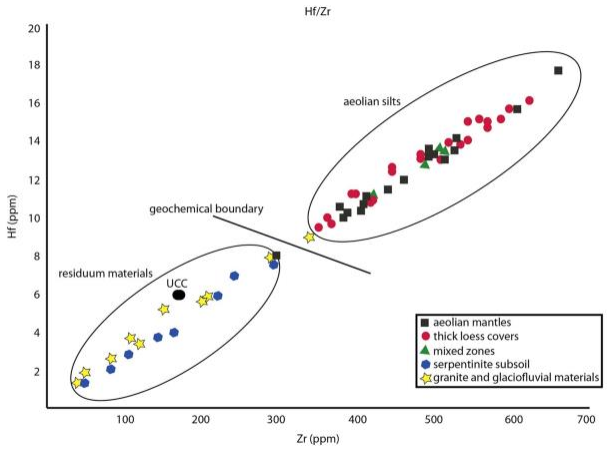
شناسایی نقش گرد و غبار در ویژگی‌های خاک‌ها

شناسایی سهم گرد و غبار در ویژگی‌های خاک، با استفاده از دو گروه شواهد صحرایی و آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. اگر گرد و غبار افزوده‌شده به خاک از نظر رنگ، توزیع اندازه ذرات و کانی‌شناسی با مواد مادری اولیه تفاوت داشته باشد، می‌توان از این تفاوت‌ها به‌عنوان قضاوت اولیه درباره ورود گرد و غبار به خاک استفاده کرد.

بافت خاک می‌تواند شاهدی بر افزوده شدن مواد بادرفتی باشد. فراوانی بخش سیلت در خاک‌های تشکیل‌شده بر روی سنگ‌های گرانیتی و اولترامافیک (فوق بازی) در جنوب مشهد، که معمولا چنین بافتی در این خاک‌ها دور از انتظار است، دلیلی بر افزوده شدن این ذرات از طریق باد (گرد و غبار) باشد (Karimi. Waroszewski و همکاران (۲۰۱۷) از این ویژگی برای تشخیص صحرایی افزوده شدن گرد و غبار به خاک‌های تشکیل‌شده بر روی انواع مواد مادری در جنوب غرب لهستان استفاده کردند. برخی از کانی‌ها، بویژه گچ و کربنات کلسیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در مطالعات تشریح خاک به سادگی قابل تشخیص هستند و حضور این کانی‌ها در خاک‌هایی که مواد مادری اولیه آن‌ها فاقد این کانی‌هاست، می‌تواند شاهدی بر افزوده شدن از طریق گرد و غبار باشد.

Heidari and Raheb (۲۰۲۰) سهم رسوبات بادرفتی در تکامل خاک بر روی مواد مادری بازالتی را با شواهد توزیع اندازه ذرات، ویژگی‌های ژئوشیمیایی و میکرومورفولوژی نشان دادند. روندهای غیرقابل انتظار تغییرات عمقی شن و سیلت با روند طبیعی افزایش سنگریزه در تضاد بود که دلیل آن را افزایش این ذرات را از خارج از سیستم (بادرفتی) بیان کردند. الگوهای توزیع نامنظم اکسیدهای عناصر اصلی و بیشتر بودن آنها در لایه‌های بالایی در مقایسه با افق‌های پایینی که مستقیما روی سنگ بستر قرار دارند را هم به افزودن مواد خارج ار سیستم نسبت داده شد، به‌ویژه این که مواد بادرفتی منجر به رقیق شدن مقدار SiO2 در افق‌های بالایی شده است. علاوه بر این، وجود کربنات‌ها در خاک، که در بازالت (سنگ بستر) و جود ندارد و با در نظر گرفتن هوادیدگی کم خاک‌ها، نیز شاهد دیگر در این راستا بود. Heidari و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه دیگر در خاک‌های دامنه‌های جنوبی البرز، با استفاده از شواهد مشابه، نقش اضافه شدن مواد بادرفتی به خاک‌ها را در تشکیل و تحول خاک پررنگ نشان دادند.

داده‌های آزمایشگاهی، شامل ترکیب عنصری، عناصر نادر خاکی، کانی‌شناسی و ایزوتوپی از مهم‌ترین روش‌های آزمایشگاهی برای تشخیص ورود گرد و غبار به خاک محسوب می‌شوند. آنالیزهای عنصری پرکاربردترین این آنالیزها هستند. مقایسه غلظت عناصر اصلی و فرعی در مواد مادری خاک و گرد و غبار موجود در منطقه، می‌تواند نشان‌دهنده ورود گرد و غبار به خاک باشد (Scheib et al., 2013; Waroszewski, 2017; Bayat et al., 2023). تفاوت در رفتار ژئوشیمیایی برخی عناصر مانند Sr، Rb، Zr، Pb، Th، Ga، Sc و عناصر نادر خاکی (REEs) می‌تواند به‌عنوان شاخصی مفید برای تعیین فرآیندهای زمین‌شناسی، منشأیابی، هوادیدگی و رسوب‌گذاری به کار گرفته شود. همچنین، استفاده از الگوی عناصر نادر خاکی و تعیین «اثر انگشت ژئوشیمیایی» در افق‌های مختلف خاک و نمونه‌های گرد و غبار، می‌تواند به قضاوت قابل قبولی درباره منشا چندگانه رسوبات در خاک منجر شود. عناصر Hf و Zr نیز به‌خوبی در این زمینه استفاده شده‌اند. در مطالعه‌ای در اروپا، غلظت زمینه این دو عنصر در خاک‌ها تعیین شد. با توجه به این که این دو عنصر تمایل به تجمع در بخش سیلت دارند، از تفاوت غلظت آن‌ها در خاک نسبت به مقدار زمینه، برای تخمین میزان آلودگی خاک‌ها به رسوبات بادرفتی استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی خاک‌ها در این قاره، از کم تا زیاد، به رسوبات بادرفتی آلوده شده‌اند (Scheib et al., 2013). از نمودار همبستگی (plot) این دو عنصر نیز برای تفکیک افق‌های حاوی درجات مختلفی از رسوبات بادرفتی در خاک‌های توسعه‌یافته بر روی مواد مادری گوناگون در لهستان استفاده شد (شکل ۵).



شکل ۵- تقسیم‌بندی افق‌های مختلف با درجات متفاوت وجود مواد بادرفتی بر اساس نمودار دوگانه هافنیم و زیرکونیم در جنوب غرب لهستان (Waroszewski et al., 2017)

استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار برای تعیین منشا رسوبات کاربرد فراوانی دارد. Rao و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی با عنوان «ژئوشیمی ایزوتوپ Sr و Nd در گرد و غبار مناطق خشک و نیمه‌خشک چین» به بررسی منشا لس و تکامل آن پرداختند.

Van der Hoven و Quade (۲۰۰۲) از نسبت ایزوتوپی ($Sr/^{86}Sr^{87}$) به‌عنوان ردیاب کلسیم استفاده کردند. نسبت ($Sr/^{86}Sr^{87}$) در کربنات‌های پدوژنیک (به‌طور متوسط ۰/۷۰۷۹) مشابه نسبت متوسط سنگ آهک دریایی در منطقه و کاملا متفاوت از سنگ بستر بازالتی (به‌طور متوسط ۰/۷۰۵۳) است. این امر نشان می‌دهد که گرد و غبار، منبع اصلی کلسیم بوده و چرخه کلسیم در این خاک‌ها عمدتا از طریق هوادیدگی شیمیایی کانی‌های کربناته موجود در رسوبات بادرفتی (گرد و غبار) کنترل می‌شود.

Porder و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به بررسی هوادیدگی شیمیایی، توازن جرم و میزان ورود گرد و غبار در طول زمان در جزایر هاوایی پرداختند. با وجود این که هاوایی در یکی از کم‌گردوغبارترین مناطق نیمکره شمالی واقع شده است، طی ده‌ها تا صدها هزار سال، تجمع گرد و غبار در خاک‌های آن تاثیر قابل توجهی بر ذخایر عناصر غذایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی خاک‌ها داشته است. آن‌ها میزان هوادیدگی شیمیایی، و همچنین تخلیه و غنی‌شدگی هر یک از عناصر اصلی را در افق‌های مختلف خاک نسبت به ماده مادری اندازه‌گیری کردند. همچنین، با فرض اینکه تمامی تفاوت‌ها نسبت به ماده مادری بازالتی ناشی از ورود گرد و غبار است، با استفاده از ردیاب‌هایی نظیر استرانسیم (Sr) و نیوبیم (Nb) و اندازه‌گیری مقدار کانی‌هایی مانند کوارتز و میکا (که در بازالت اولیه وجود ندارند)، منشا گرد و غبار بادرفتی و میزان رسوب آن را محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوهای رسوب گرد و غبار، چه در گذشته و چه در حال، می‌توانند نقش مهمی در کنترل میزان هوادیدگی شیمیایی در مقیاس جهانی داشته باشند.

یکی از قطعی‌ترین شواهد برای ورود گرد و غبار، وجود کانی‌های «غیربومی» در خاک است - کانی‌هایی که نمی‌توانستند از هوادیدگی سنگ بستر محلی تشکیل شده باشند. به عنوان مثال، وجود کوارتز در خاکی که بر روی بازالت تشکیل شده است، گواه روشنی بر یک منبع خارجی است، زیرا بازالت یک سنگ مافیک است که حاوی کوارتز نیست (Muhs et al., 2014). به طور مشابه، وجود مگنتیت آواری، یک کانی اکسید آهن که در سنگ‌های آذرین تشکیل می‌شود، در خاک‌هایی که بر روی ماسه‌سنگ غنی از کوارتز تشکیل شده‌اند، شاهدی بر منشا بادرفتی از اراضی آذرین ارائه می‌دهد (Reynold et al., 2001).

رسوبات لسی، سنگفرش بیابانی و افق وزیکولار

پهنه‌های لسی و سنگفرش بیابانی، دو لندفرم حاصل از رسوب گرد و غبار هستند که رسوبات لسی ار مناطق خشک تا مرطوب در کره زمین پراکنده هستند. سنگفرش بیابانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمول است (Ka ,Truk and Graham, 2011; Karimi et al., 2011). افق‌های وزیکولار و سنگفرش بیابانی، به همراه یکدیگر در مناطق خشک توسعه پیدا می‌کنند.

رسوبات لسی، رسوبات بادرفتی با غالبیت ذرات سیلت هستند. این رسوبات در دوره‌های سرد در کواترنری نهشته شده‌اند. مهم‌ترین پهنه‌های لسی در فلات لسی چین، اروپا؛ آسیای میانه و آمریکای جنوبی است. در مناطق خشک و بیابانی هم رسوبات لسی با ضخامت کم و پراکنده وجود دارد. در ایران نیز پهنه‌های لسی در شمال کشور و در دیگر نقاط ایران هم با پراکندگی کم شناسایی شده است (Karimi et al., 2009).

سنگفرش بیابانی از لندفرم‌های معمول در مناطق بیابانی و حاشیه بیابانی در دشت‌ها و دامنه‌ها (مخروط افکنه و پدیمنت) هستند که معمولا در زیر آنها افق‌های وزیکولار وجود دارد. تصور می‌شد که سنگفرش بیابانی به دلیل برداشته شدن ذرات ریز و برجا ماندن ذرات دشت است؛ ولی عامل اصلی آن انتقال و رسوب ذرات درشت توسط فرایندهای آبرفتی یا تولید ذرات درشت به صورت درجا است و سپس رسوب گرد و غبار بر روی ذرات درشت و انتقال آن به زیر توسط بارندگی است. تناوب این فرایند در طول صد ها یا هزاران سال، باعث توسعه و تکامل سنگفرش بیابانی و همچنین تشکیل افق وزیکولار در زیر سنگفرش بیابانی است (McAuliffe et al., 2018).

افق وزیکولار، که معمولا در زیر سنگفرش بیابانی یافت می‌شود، با تخلخل زیاد و ساختار اسفنجی‌شکل خود، به‌سادگی در صحرا قابل تشخیص است . این افق می‌تواند نشانه‌ای از تاثیرپذیری خاک زیرین از گرد و غبار نیز باشد؛ گرد و غباری که

ممکن است در خاک زیرین هضم و جذب شده و تنها با آنالیزهای آزمایشگاهی دقیق قابل تشخیص باشد (Bayat et al., 2023). آنالیزهای آزمایشگاهی مانند توزیع اندازه ذرات، کانی‌شناسی و آنالیزهای عنصری هم به خوبی قابلیت تفکیک منشا افق‌های وزیکولار را با خاک زیرن دارند (McAuliffe et al., 2018; Bayat et al., 2023; Bayat et al., 2022).

جمع بندی

گرد و غبار به‌عنوان یکی از عوامل پویای محیطی، نقش چشم‌گیری در شکل‌گیری، تحول و ویژگی‌های خاک در سراسر کره زمین دارد. خاک به عنوان یک سامانه باز، در همه جای کره زمین، تحت تاثیر ورود گرد و غبار است. این پدیده نه تنها بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثر می‌گذارد، بلکه می‌تواند مسیر تکاملی خاک را تغییر دهد و در برخی مناطق عامل اصلی تشکیل لس، سنگفرش بیابانی و افق‌های وزیکولار باشد. داده‌های صحرایی، آنالیزهای شیمیایی، کانی‌شناسی، عنصری و ایزوتوپی شواهد محکمی از ورود ذرات بادرفتی به خاک ارائه می‌دهند. با توجه به گستردگی و اهمیت این پدیده، گرد و غبار می‌تواند به‌عنوان یک عامل مستقل در فرآیند خاک‌سازی در نظر گرفته شود؛ عاملی که در کنار پنج عامل شناخته شده خاک‌سازی، نقشی حیاتی در شناخت، طبقه‌بندی و تفسیر خاک‌ها ایفا می‌کند. بنابراین، بررسی سهم گرد و غبار در مطالعات خاک‌شناسی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است و شایسته است که پژوهشگران خاک، در تجزیه و تحلیل‌های خود، تاثیر گرد و غبار را در پس‌زمینه تحلیل‌های خود مدنظر قرار دهند.

فهرست منابع

Adeyemi, A., Kok, J. F., Murray, B. J., Ryder, C. L., Stuut, J.-B. W., et al. (2022). A review of coarse mineral dust in the Earth system. Aeolian Research, 60, 100849.

Bayat, O., Karimi, A., May, J.-H., Fattahi, M., Wiesenberg, G. L. B., Egli, M. (2023). High-resolution record of stable isotopes in soil carbonates reveals environmental dynamics in an arid region (central Iran) during the last 32 ka. Frontiers in Earth Science, 11, 1154544.

Bayat, O., & Karimi, A. (2022). Geochemistry, mineralogy, and environmental interpretation of vesicular horizons in the soils of the Segzi region, eastern Isfahan. Geography and Environmental Planning, 33(3), 21–42.

Drakaki, E., Amiridis, V., Tsekeri, A., Gkikas, A., Proestakis, E., Mallios, S., Solomos, S., Spyrou, C., Marinou, E., Ryder, C., Bouris, D., Katsafados, P. (2022). Modelling coarse and giant desert dust particles. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 1–36.

Engelstaedter, S., Tegen, I., Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. Earth-Science Reviews, 79, 73–100.

Gile, L. H., Peterson, F. F., Grossman, R. B. (1966). Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. Soil Science, 101, 347–360.

Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. Reviews of Geophysics, 50, RG3005.

Heidari, A., Maria, K., Marina, L. (2021). Reconstruction of the paleo-environments of northern and southern slopes of the Alborz Mountain chain based on preserved evidence in soils. Quaternary International, 590, 5–14.

Heidari, A., Raheb, A. (2020). Geochemical indices for soils developed on basalt in arid to sub-humid climosequence of Central Iran. Journal of Mountain Science, 17, 1–14.

Karimi, A., Khademi, H., Kehl, M., Jalalian, A. (2009). Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in northeastern Iran. Geoderma, 148, 241–250.

Karimi, A., Khademi, H., Jalalian, A. (2011). Loess: Characteristics and implications in paleoclimate studies. Physical Geography Research, 43(76), 1–20.

Karimi, A., Khormali, F., Wang, X. (2017). Discrimination of sand dunes and loess deposits using grain-size analysis in northeastern Iran. Arabian Journal of Geosciences, 10, 275.

Krätschmer, S., van der Does, M., Lamy, F., Lohmann, G., Völker, C., Werner, M. (2022). Simulating glacial dust changes in the Southern Hemisphere using ECHAM6.3-HAM2.3. Climate of the Past, 18(1), 67–87.

Mahowald, N., Albani, S., Kok, J. F., Engelstaedter, S., Scanza, R., Ward, D. S., Flanner, M. G. (2014). The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. Aeolian Research, 15, 53–71.

Mahowald, N. M., Muhs, D. R., Levis, S., Rasch, P. J., Yoshioka, M., Zender, C. S., Luo, C. (2006). Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period, preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates. Journal of Geophysical Research, 111, D10202.

McAuliffe, J. R., McFadden, L. D., Hoffman, M. T. (2018). Role of aeolian dust in shaping landscapes and soils of arid and semi-arid South Africa. Geosciences, 8, 171.

McFadden, L. D. (2013). Strongly dust-influenced soils and what they tell us about landscape dynamics in vegetated aridlands of the southwestern United States. In M. E. Bickford (Ed.), The web of geological sciences: Advances, impacts, and interactions (pp. 501–532). Geological Society of America Special Paper 500.

Muhs, D. R. (2013). The geologic records of dust in the Quaternary. Aeolian Research, 9, 3–48.

Muhs, D. R., Prospero, J. M., Baddock, M. C., Gill, T. E. (2014). Identifying sources of aeolian mineral dust: Present and past. In P. Knippertz J.-B. W. Stuut (Eds.), Mineral Dust. Springer, Dordrecht.

Porder, S., Hilley, G. E., Chadwick, O. A. (2007). Chemical weathering, mass loss, and dust inputs across a climate-by-time matrix in the Hawaiian Islands. Earth and Planetary Science Letters, 258(3–4), 414–427.

Prospero, J. M. (1996). Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An overview. In S. Guerzoni R. Chester (Eds.), The impact of desert dust across the Mediterranean (pp. 133–151). Springer, Dordrecht.

Prospero, J. M., Charlson, R. J., Mohnen, V., Jaenicke, R., Delany, A. C., Moyers, J., Zoller, W., Rahn, K. (1983). The atmospheric aerosol system: An overview. Reviews of Geophysics and Space Physics, 21, 1607–1629.

Pye, K. (1987). Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, San Diego, CA.

Rao, W., Yang, J., Chen, J., Li, G. (2006). Sr-Nd isotope geochemistry of eolian dust of the arid-semiarid areas in China: Implications for loess provenance and monsoon evolution. Chinese Science Bulletin, 51(12), 1401–1412.

Reynold, R., Belnap, J., Reheis, M., Lamothe, P., Luiszer, F. (2001). Aeolian dust in Colorado Plateau soils: Nutrient inputs and recent change in source. Proceedings of the National Academy of Sciences, 98(13), 7123–7127.

Schaetzl, R. J., Thompson, M. L. (2015). Soils: Genesis and geomorphology (2nd ed.). Cambridge University Press, New York.

Scheib, A. J., Birke, M., Dinelli, E., GEMAS Project Team. (2013). Geochemical evidence of aeolian deposits in European soils. Boreas, 42(3), 530–544.

Turk, J. K., Graham, R. C. (2011). Distribution and properties of vesicular horizons in the western United States. Soil Science Society of America Journal, 75, 1449–1461.

Van der Does, M., Knippertz, P., Zschenderlein, P., Harrison, R. G., Stuut, J.-B. W. (2018). The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles. Science Advances, 4, eaau2768.

Van der Hoven, S. J., Quade, J. (2002). Tracing spatial and temporal variations in the sources of calcium in pedogenic carbonates in a semiarid environment. Geoderma, 108(3–4), 259–276.

Waroszewski, J., Sprafke, T., Kabala, C., Musztyfaga, E., Łabaz, B., Woźniczka, P. (2018). Aeolian silt contribution to soils on mountain slopes (Mt. Ślęża, southwest Poland). Quaternary Research, 89(3), 702–717.

Yaalon, D. H., Ganor, E. (1973). The influence of dust on soils during the Quaternary. Soil Science, 116, 146–155.

Zheng, Y., Zhao, T., Che, H., Liu, Y., Han, Y., Liu, C., Xiong, J., Liu, J., Zhou, Y. (2016). A 20-year simulated climatology of global dust aerosol deposition. Science of the Total Environment, 557–558, 861–868.

Ziyaee, A., Karimi, A., Hirmas, D. R., Kehl, M., Lakzian, A., Khademi, H., Mechem, D. B. (2018). Spatial and temporal variations of airborne dust fallout in Khorasan Razavi Province, northeastern Iran. Geoderma, 326, 42–55.

The role of dust in the formation and evolution of soils and landforms

Alireza Karimi[1]*, Omid Bayat[2]
Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran; *karimi-a@um.ac.ir Mashhad
Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland; omid.bayat@geo.uzh.ch

Abstract)

Dust refers to particulate matter suspended in a gaseous medium (the atmosphere). The dust has affected all parts of the Earth- from the equator to the polar ice regions and from the ocean floors to high mountain ranges- during various geological periods. The average annual global dust deposition is estimated about 200 g m^{-2}. The impact of dust on the physical, chemical, and mineralogical properties of soils, as well as the formation of loess deposits, vesicular horizons, and desert pavements, are some of the most significant consequences of dust addition to terrestrial surfaces. The identification of dust contributions to soil properties can be achieved through field and laboratory evidence. In the field, soil texture, color, and certain minerals such as gypsum, calcite, and quartz are the indicators of dust addition to soil. Laboratory data, including elemental composition, rare earth elements, mineralogical, and isotopic analyses, are among the most important methods for detecting dust inputs into soils. The impact of dust on soil properties and its evolution is so important and therefore the dust deposition should be regarded as a major and effective factor in soil formation and evolution across the world.

Keywords: Dust fallout addition, Soil genesis models, vesicular horizon, desert pavement