



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تأثیر تغییر اقلیم و آلاینده‌های نوظهور خاک بر خدمات اکوسیستمی حشرات خاکری و پایداری

بوم‌سازگان خاک

محمد مهدی ربیعه^{۱*}

۱-استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند ایران

(mmrabie@birjand.ac.ir)

چکیده

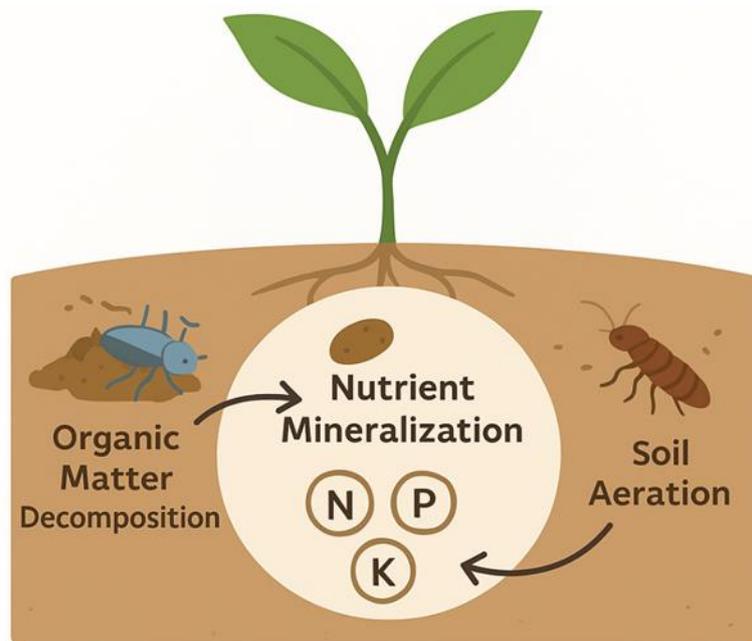
خاک‌ها بوم‌سازگان‌های پویا هستند و حشرات و بندپایان خاک نقش کلیدی در تجزیه مواد آلی، تهویه خاک و حفظ چرخه عناصر غذایی دارند، اما این خدمات تحت تأثیر تنش‌های انسانی مانند تغییر اقلیم و آلاینده‌های نوظهور قرار گرفته‌اند. تغییر اقلیم با افزایش دما، خشکی و تغییر الگوهای بارش باعث کاهش تنوع و فعالیت حشرات خاکری شده و عملکردهای اکوسیستمی خاک، از جمله تجزیه مواد آلی و تثبیت کربن، را تهدید می‌کند. اثرات شامل کاهش و فورواندازه بدنی، تغییر معاملات تولیدمثلی و عدم هم‌زمانی فعالیت با منابع غذایی است. آلاینده‌های نوظهور مانند ریزپلاستیک‌ها و ترکیبات شیمیایی نیز با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ترکیب جوامع میکروبی، بقا، تولیدمثل و تنوع گونه‌ای حشرات خاکری را کاهش داده و فرآیندهای اکولوژیکی خاک را مختل می‌کنند. ترکیب تغییر اقلیم و آلاینده‌ها فشار مضاعفی بر حشرات خاکری وارد کرده و اثرات هم‌افزا می‌تواند آسیب‌پذیری اکوسیستم خاک را افزایش دهد. در ایران، تحقیقات درباره اثرات هم‌افزای این عوامل محدود است، اگرچه شواهدی از وجود آلاینده‌ها در خاک‌های کشاورزی و شهری مشاهده شده است. بنابراین، پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و طولانی‌مدت برای بررسی واکنش مستقیم حشرات خاکری و تدوین سیاست‌های مدیریتی پایدار ضروری است تا تاب‌آوری خاک و خدمات اکوسیستمی آن حفظ شود.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، آلاینده‌های نوظهور خاک، ریزپلاستیک‌ها، حشرات خاکری، خدمات اکوسیستمی خاک

مقدمه

خاک‌ها بوم‌سازگان‌هایی پویا هستند که به واسطه فرایندهای زیستی، شیمیایی و فیزیکی شکل می‌گیرند. در میان زیست‌مندان خاک، حشرات و سایر بندپایان نقش مهمی در خدمات اکوسیستمی نظیر تجزیه مواد آلی، معدنی‌سازی مواد غذایی و تهویه خاک دارند. این جانوران با خرد کردن بقایای گیاهی و مدفوع جانوری، سرعت تجزیه و دسترسی مواد آلی برای میکروارگانیسم‌ها را افزایش می‌دهند و بدین ترتیب چرخه عناصر غذایی در خاک تسهیل می‌شود. فعالیت‌های حرکتی و حفاری این جانداران، ساختار خاک را بهبود داده و موجب افزایش نفوذپذیری آب و تهویه می‌گردد که برای رشد ریشه گیاهان حیاتی است. علاوه بر این، برخی گروه‌ها مانند پادمان (Collembola) و کنه‌ها با تنظیم جمعیت میکروبی، پویایی جوامع میکروبی خاک را حفظ کرده و به پایداری بلندمدت بوم‌سازگان کمک می‌کنند (شکل ۱). این خدمات به طور فزاینده‌ای تحت فشار تنش‌های انسانی قرار دارند. تغییر اقلیم، الگوهای دما و رطوبت را در گون می‌سازد و آلاینده‌هایی مانند ریزپلاستیک‌ها و آفت‌کش‌ها نیز فرایندها و تنوع زیستی خاک را مختل می‌کنند (Yang et al., 2021; Machado et al., 2018). درک نحوه تأثیر متقابل این تنش‌ها بر حشرات خاکری برای پیش‌بینی تاب‌آوری بوم‌سازگان‌های خاک ضروری است. تاب‌آوری بوم‌سازگان خاک به توانایی آن در حفظ کارکردهای حیاتی و بازیابی پس از اختلالات زیستی یا شیمیایی اشاره دارد. این ویژگی تعیین می‌کند که خاک تا چه اندازه می‌تواند در برابر تغییرات شدید اقلیمی یا ورود آلاینده‌ها پایداری نشان دهد و پس از آن به وضعیت پایدار یا نزدیک به تعادل اولیه بازگردد. کاهش تاب‌آوری به معنای افزایش آسیب‌پذیری خدمات اکوسیستمی خاک و تهدید امنیت غذایی و زیست‌محیطی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای است.

با این حال، در ایران تاکنون مطالعات اندکی به بررسی هم‌زمان این عوامل پرداخته‌اند و اغلب پژوهش‌ها یا بر تغییرات اقلیمی یا بر آلودگی‌های نوظهور متمرکز بوده‌اند. هدف این مطالعه بررسی اثر هم‌افزای تغییر اقلیم و آلاینده‌های نوظهور خاک بر خدمات اکوسیستمی حشرات خاکری است؛ موضوعی که می‌تواند توجه بیشتری را به اهمیت این مسئله در مدیریت پایدار خاک‌های ایران جلب کند.



Soil Insects & Arthropods



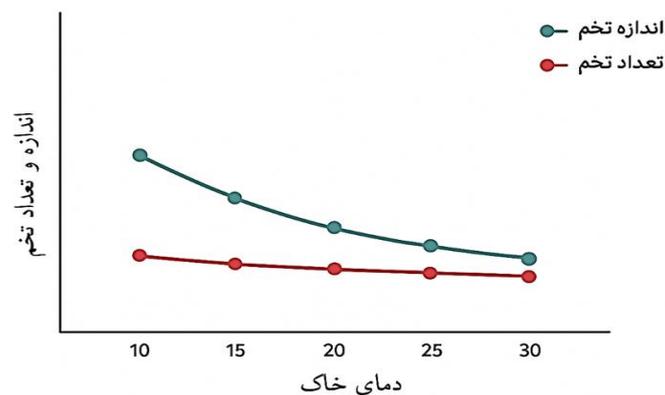
شکل ۱- نقش حشرات خاکزی و بندپایان در تجزیه مواد آلی، معدنی سازی مواد غذایی، تهویه خاک و حفظ چرخه عناصر غذایی.

تغییرات اقلیمی در دنیا

در دهه‌های اخیر روند تغییر اقلیم جهانی با شواهد علمی گسترده تایید شده است؛ فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی، باعث افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن، متان و نیتروژن اکسید در جو شده‌اند که اثر گلخانه‌ای را تقویت می‌کنند و منجر به افزایش دمای سطح زمین می‌گردند (Malik et al., 2016; Singh, 2024). به‌علاوه، بازخوردهای آب‌وهوایی مانند افزایش بخار آب که خود گاز گلخانه‌ای است. این روند را تشدید می‌کنند (Manabe, 2019). از دوران صنعتی شدن تاکنون، غلظت CO₂ بیش از ۴۰٪ افزایش یافته و انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان بی‌سابقه‌ای ادامه دارد. مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که در صورتی که اقدامات مهار انتشار گازها صورت نگیرد، تا پایان قرن بیست‌ویکم دمای متوسط جهانی ممکن است بین ۲/۰ تا ۴/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (Raftery et al., 2017). در گزارش (Masson-Delmotte و همکاران ۲۰۲۱)، پیش‌بینی شده است که گرمادگی‌ها، دوره‌های خشکی شدیدتر، تغییرالگوهای بارندگی و نفوذ امواج گرما در بسیاری از مناطق افزایش یابند (Masson-Delmotte et al., 2021). همچنین در بازه ۲۰۲۵-۲۰۲۹ احتمال چشمگیری وجود دارد که میانگین دمای جهانی از آستانه ۱/۵°C عبور کند (Lindsey & Dahlman, 2020). سناریوهای انتشار متنوعی مانند SSP1-1.9، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهند که اگر انتشار به‌طور چشمگیر کاهش نیابد، جهان ممکن است به گرمایش‌هایی فراتر از ۳ درجه سانتی‌گراد برسد (Mukherji et al., 2023). بازخوردهایی مانند کاهش بازتاب سطح یخ (ice-albedo feedback) و آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای از یخ‌های دائمی قطبی می‌توانند این افزایش دما را تشدید کنند (Masson-Delmotte et al., 2021). در مجموع، روند تغییر اقلیم نه فقط نتیجه مستمر دخالت بشری در چرخه انرژی زمین است، بلکه مسیر آینده آن به شدت به سیاست‌های کاهش انتشار، بازگرداندن کربن به اکوسیستم‌ها و توان انطباق جوامع بستگی دارد (Mukherji et al., 2023). این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای نیز به همراه دارند. یکی از مهم‌ترین نتایج آن افزایش سطح آب دریاها به دلیل ذوب یخ‌های قطبی و انبساط گرمایی آب است که خطر سیلاب و از دست رفتن زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی را به‌ویژه در شهرهای ساحلی افزایش می‌دهد (Masson-Delmotte 2021 et al.). همچنین، تغییر اقلیم منجر به شدت‌گیری بلایای طبیعی از جمله طوفان‌های استوایی، سیلاب‌های ناگهانی و امواج گرمایی می‌شود که زیرساخت‌ها و معیشت انسان‌ها را تهدید می‌کنند (Diffenbaugh & Burke, 2019). از سوی دیگر، تغییرات دما و بارش موجب کاهش بازده محصولات کشاورزی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک و افزایش شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی شده و به این ترتیب امنیت غذایی جهان را به مخاطره می‌اندازد (Porter et al., 2014). تنوع زیستی نیز به شدت تحت فشار قرار می‌گیرد، زیرا بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری قادر به سازگاری با تغییرات سریع زیستگاه‌ها نیستند و خطر انقراض آن‌ها افزایش می‌یابد (Urban, 2015). تأثیرات تغییر اقلیم محدود به محیط زیست نیست؛ بلکه سلامت انسان نیز با افزایش بیماری‌های ناشی از گرما، گسترش بیماری‌های ناقل‌محور نظیر مالاریا و تب‌دنگی، و مشکلات تنفسی ناشی از آلودگی هوا و گردوغبار به خطر می‌افتد (Haines et al., 2006). افزون بر این، پیامدهای اجتماعی و اقتصادی شامل مهاجرت اقلیمی، کاهش بهره‌وری اقتصادی، افزایش نابرابری‌ها و حتی بروز تنش‌های سیاسی و امنیتی نیز از نتایج احتمالی این روند هستند (Mach et al., 2019). در مجموع، روند تغییر اقلیم نه فقط نتیجه مستمر دخالت بشری در چرخه انرژی زمین است، بلکه مسیر آینده آن به شدت به سیاست‌های کاهش انتشار، بازگرداندن کربن به اکوسیستم‌ها و توان انطباق جوامع بستگی دارد (Mukherji et al., 2023).

تغییر اقلیم و حشرات خاکزی

تغییر اقلیم از طریق افزایش فراوانی رخدادهای حدی، گرمایش و تغییر الگوهای بارش، بوم‌سازگان‌های خاک را بازآرایی می‌کند. فراتحلیل‌ها نشان داده‌اند که تغییرات زیست‌محیطی جهانی، به‌طور معناداری تنوع زیستی خاک را کاهش می‌دهند (Phillips et al., 2024). برای حشرات خاکزی، این تنش‌ها می‌توانند فنولوژی، پویایی جمعیت و تعاملات تغذیه‌ای را تغییر دهند و در نهایت بر عملکردهای خاک اثرگذار باشند. پژوهش‌ها روی کرم‌های خاکی نشان داده‌اند که گرما و خشکسالی موجب تغییر در ترکیب جوامع و کاهش فعالیت می‌شود؛ پیامدی که احتمالاً در مورد حشرات خاکزی نیز صادق است (Leal Filho et al., 2023). این اختلالات خدماتی نظیر تجزیه مواد آلی و تثبیت کربن را تهدید می‌کنند. مطالعه‌ای که اثر گرمایش بلندمدت را بر میکروآرتروپودها بررسی کرده است نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت باعث کاهش قابل توجهی در وفور و اندازه بدنی این موجودات می‌شود، به طوری که جمعیت‌های شکارچی کاهش یافته‌اند و تعادل غذاخوری خاکیان به سمت باکتری‌ها و ویروس‌ها متمایل شده است (Dahl et al., 2023). در پادمان، تغییر دمای خاک نه تنها بر تعداد تخم و اندازه تخم تأثیر گذاشته است، بلکه معاملات تولید مثلی بین اندازه تخم و تعداد تخم در دماهای پایین‌تر و بالا متفاوت بوده است: در دماهای پایین‌تر، اندازه تخم بزرگ‌تر شده در حالی که تعداد تخم در همان گونه‌ها کاهش نیافته یا تفاوت کمی داشته است، و در دماهای بالا معامله بین تعداد و اندازه تخم غالب می‌شود (Marty et al., 2022).



شکل ۲- رابطه تغییر دمای خاک و تعداد و اندازه تخم در پادمان خاک

خشکی نیز تأثیرات مستقیمی بر فعالیت تغذیه‌ای و تجزیه مواد آلی دارد. کاهش رطوبت خاک موجب کاهش حرکت و فعالیت میکروآرتروپودها و کند شدن تجزیه شده‌است؛ در برخی مطالعات، افزایش افراطی در نوسانات بارش باعث کاهش تنوع گونه‌های حشرات خاکزی برگ‌خاک شده است. همچنین تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث عدم همزمانی (mismatch) بین فعالیت زمینی حشرات خاکزی و دوره‌های منابع غذایی مثل برگ‌ریزی گیاهان یا نفوذ مواد آلی شود؛ برای مثال، در زیستگاه‌های قطبی با ذوب برف زودتر، حشرات خاکزی ممکن است پیش از رسیدن منابع غذا وارد فعالیت شوند و دچار کمبود غذایی شوند (Peña-Aguilera et al., 2023).

در مطالعه‌ای در اکوسیستم کوهستانی قطبی، رابطه بین الگوهای ارتفاعی، دمای خاک و رطوبت باتنوع و ساختار جوامع بندپایان زمینی بررسی شد؛ نتایج نشان دادند که کاهش دوره‌های برفی و افزایش دما تأثیرات قابل توجهی بر تنوع گونه‌ای و همبستگی بین مفاهیم گیاهی و بندپایانی دارد (Peña-Aguilera et al., 2023).

مطالعات متعددی در اکوسیستم‌های کوهستانی و قطبی نشان داده‌اند که عوامل میکرواقلیمی مانند دما و رطوبت خاک همراه با گرادیان‌های ارتفاعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری تنوع و ساختار جوامع بندپایان زمینی دارند. برای نمونه، بررسی دو چشم‌انداز زیر قطبی نشان داد که کاهش دوره‌های برفی و افزایش دما باعث تغییرات قابل توجهی در تنوع گونه‌ای و فراوانی بندپایان شده و همبستگی میان جوامع گیاهی و بندپایان نیز تحت تأثیر قرار گرفته است (Peña-Aguilera et al., 2023).

علاوه، نتایج آزمایش‌های میدانی در مناطق قطبی نشان می‌دهد که تغییر در عمق و پایداری برف زمستانی می‌تواند اثرات ناهمگنی بر جوامع میکروارتروپودها داشته باشد؛ به طوری که افزایش پوشش برف گرچه به گرم‌تر شدن خاک منجر می‌شود، اما پیامدهای آن بر ترکیب جامعه بین سال‌های مختلف و متناسب با شرایط ذوب برف در بهار متفاوت است (Krab et al., 2022). (از سوی دیگر، بررسی‌های طولانی‌مدت بیانگر آن است که تعامل بین دمای زمستان و مدت زمان پوشش برفی، عامل اصلی بقاوالگوی توزیع محلی بندپایان خاکزی به شمار می‌رود و کاهش یا تغییر این دوره می‌تواند ساختار جامعه را به طور اساسی بازآرایی کند) (Coulson et al., 2023).

در مطالعات تنوع آلفا و بتا در نواحی توندرا ارتفاعات نیز مشخص شده است که دماورطوبت خاک از مهم‌ترین متغیرها برای پیش‌بینی تغییرات فضایی و زمانی بندپایان به شمار می‌آیند؛ تغییرات پوشش برف که منجر به تغییر رطوبت و دمای فصل رشد می‌شود، باعث جابجایی الگوهای جامعه و تغییر در روابط گیاه-بندپایان خواهد شد (Hein et al., 2024). افزون بر این، پژوهش‌های مرتبط با گرادپایان‌های ارتفاعی نشان داده‌اند که رطوبت خاک و پوشش آلی برگ از کلیدی‌ترین عوامل تعیین‌کننده غنای گونه‌ای و تراکم بندپایان خاکزی در ارتفاعات مختلف هستند و هر گونه تغییر اقلیمی که این متغیرها را دگرگون کند، به طور مستقیم بر تنوع زیستی و ساختار اکوسیستم‌های خاکی اثر خواهد گذاشت (Qin et al., 2024).

آلاینده‌های نوظهور خاک و تأثیرات آن‌ها بر حشرات خاکزی آلاینده‌های نوظهور (ECs) به ترکیبات شیمیایی اطلاق می‌شوند که به طور گسترده در محیط زیست منتشر شده‌اند، اما هنوز به طور کامل ارزیابی نشده‌اند. این آلاینده‌ها می‌توانند از طریق جذب توسط ریشه‌های گیاهان یا بلع توسط جانوران خاکی وارد زنجیره غذایی شوند و اثرات منفی بر سلامت اکوسیستم‌های خاکی داشته باشند. مطالعات نشان داده‌اند که ECS می‌تواند ترکیب جوامع میکروبی خاک را تغییر داده و عملکردهای بوم‌سازگانی خاک را تحت تأثیر قرار دهند (Beaumelle et al., 2023).

ریزپلاستیک‌هایی از مهم‌ترین آلاینده‌های نوظهور هستند که به طور فزاینده‌ای در محیط‌های خاکی مشاهده می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که ریزپلاستیک‌ها می‌توانند بر جوامع خاکی تأثیر منفی بگذارند و باعث کاهش تنوع زیستی و تغییر در ساختار جوامع میکروبی شوند. به عنوان مثال، یک مطالعه نشان داد که افزودن ریزپلاستیک‌ها به خاک باعث کاهش تنوع گونه‌ای نماتودها و تغییر در عملکردهای اکولوژیکی مرتبط با آن‌ها شد (Boots, 2022).

همچنین، ریزپلاستیک‌ها می‌توانند با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مانند تغییر در pH و رطوبت، شرایط نامساعدی برای حشرات خاکزی ایجاد کنند. این تغییرات می‌توانند منجر به کاهش بقا، تولیدمثل و تنوع گونه‌ای حشرات خاکزی شوند. مطالعات نشان داده‌اند که ریزپلاستیک‌ها می‌توانند بر رشد، تولیدمثل، طول عمر و بقا حشرات خاکزی تأثیر منفی بگذارند (Lin et al., 2020).

بطور کلی آلاینده‌های نوظهور می‌توانند از طریق تأثیر بر حشرات خاکزی، فرآیندهای اکولوژیکی مانند تجزیه مواد آلی، چرخه مواد مغذی و تثبیت کربن را تحت تأثیر قرار دهند. این تأثیرات می‌توانند منجر به کاهش کیفیت خاک و تهدید خدمات اکوسیستمی آن شوند. بنابراین، ضروری است که مطالعات بیشتری در زمینه اثرات آلاینده‌های نوظهور بر حشرات خاکزی و فرآیندهای اکولوژیکی مرتبط با آن‌ها انجام شود تا بتوان استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتری برای حفاظت از اکوسیستم‌های خاکی تدوین کرد (Wang et al., 2022; Wan et al., 2023).

تنش‌های ترکیبی: تغییر اقلیم و آلاینده‌ها بر هم‌کنش میان تغییر اقلیم و آلاینده‌ها فشار مضاعفی بر بوم‌سازگان‌های خاک وارد می‌کند. دماهای بالاتر می‌توانند سرعت تجزیه پلاستیک را افزایش داده و موجب رهایش ریزپلاستیک‌ها و افزودنی‌های شیمیایی آن‌ها در خاک شوند (Yang et al., 2021). هم‌زمان، شرایط خشکی غلظت آلاینده‌ها را در آب منفذی خاک افزایش داده و سطح تماس موجودات زنده با آلاینده‌ها را تشدید می‌کند. این اثرات هم‌افزایی‌تواننده‌ویژه بر حشرات حساس به تغییرات ریززیستگاه تأثیرگذار باشند. آلاینده‌های نوظهوری همچون داروها، آفت‌کش‌ها و نانوذرات نیز لایه‌های بیشتری از ریسک را به سیستم اضافه می‌کنند (Gomes et al., 2017). هر چند شواهدی درباره اثرات ترکیبی بر میکروب‌ها و گرم‌های خاکی وجود دارد، پژوهش‌های متمرکز بر حشرات خاکزی بسیار اندک است و این یک شکاف پژوهشی کلیدی به شمار می‌آید.

مطالعات در ایران

بررسی تعامل میان تغییر اقلیم و آلاینده‌های نوظهور خاک در ایران نشان می‌دهد که این موضوع هنوز به‌طور مستقیم و جامع بر خدمات اکوسیستمی حشرات خاکزی مطالعه نشده است. مطالعات تغییر اقلیم عمدتاً بر تغییرات پوشش گیاهی، خواص خاک و پایداری تولید کشاورزی متمرکز بوده‌اند و نتایج نشان داده که افزایش دما و تغییر الگوی بارش می‌تواند چرخه مواد آلی خاک و عملکردهای اکوسیستمی را دگرگون کند (Goroeei et al., 2021; Doulabian et al., 2017). در کنار این، بررسی نقش بی‌مهرگان خاکزی مانند کرم‌های خاکی نشان داده که تغییر کاربری زمین و شرایط اکولوژیکی به‌طور جدی بر فرآیندهای بیوژئوشیمیایی اثرگذار است و این گونه‌ها به‌عنوان شاخص‌های کلیدی پایداری خاک عمل می‌کنند (Eisenhauer et al., 2012).

از سوی دیگر، گزارش‌هایی در ایران وجود دارد که به شناسایی و پایش آلاینده‌های نوظهور در خاک‌های زراعی پرداخته‌اند. برای مثال، حضور میکروپلاستیک‌ها، فلزات سنگین و باقیمانده‌های دارویی در کودهای دامی و خاک‌های کشاورزی ایران به اثبات رسیده است (Mozaffarghadirli et al., 2023; Mohammadi et al., 2022). همچنین مطالعات متعددی در زمینه غلظت فلزات سنگین در خاک‌های شهری و کشاورزی ایران انجام شده که شواهدی از تهدیدات بالقوه برای موجودات خاکزی فراهم می‌کنند (Jalali et al., 2015).

با این حال، ارتباط مستقیم میان این آلاینده‌ها و خدمات اکوسیستمی حشرات خاکزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به بیان دیگر، اگرچه داده‌های زیست‌محیطی درباره سطوح آلودگی خاک و تغییرات اقلیمی به‌طور جداگانه وجود دارد، اما پژوهش‌های میان‌رشته‌ای که اثرات هم‌افزای این عوامل را بر تنوع و عملکرد حشرات خاکزی و پایداری بوم‌سازگان خاک بررسی کنند، هنوز در ایران محدود یا غایب هستند (Eisenhauer et al., 2012; Mohammadi et al., 2022). از این رو، خلأ پژوهشی مهمی وجود دارد که می‌تواند مبنای طرح‌های تحقیقاتی آینده برای پایش جامع‌تر خدمات اکوسیستمی بی‌مهرگان خاکی در شرایط تغییر اقلیم و افزایش آلودگی‌های نوظهور باشد.

مسیرهای آینده

اگرچه تاکنون پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه اثرات تغییر اقلیم و ریزپلاستیک‌ها بر سامانه‌های خاکی انجام شده است، اما مطالعاتی که به‌طور مستقیم بر حشرات خاکزی تمرکز داشته باشند هنوز محدود هستند. این شکاف پژوهشی ضرورت پرداختن به مسیرهای آینده را برجسته می‌سازد. نخست، بررسی واکنش‌های مستقیم حشرات خاکزی در سطوح مختلف، از جمله بقا، تولیدمثل و تغییرات در ساختار جوامع، تحت سناریوهای واقع‌بینانه‌ی تغییر اقلیم و آلودگی‌های ترکیبی اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین رویکردی می‌تواند روشن سازد که چگونه فشارهای هم‌زمان مانند گرمایش، خشکی یا حضور آلاینده‌ها بر پویایی جمعیت و تعاملات اکولوژیک این گروه‌ها اثر می‌گذارد.

علاوه بر این، تحلیل پاسخ‌های مبتنی بر ویژگی‌های عملکردی گروه‌های مختلف حشرات خاکزی، امکان شناسایی الگوهای عمومی و گونه‌های کلیدی را فراهم می‌کند که نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ عملکردهای بوم‌سازگانی دارند. درک این پاسخ‌های عملکردی برای تبیین اثرات زنجیره‌ای بر فرآیندها و خدمات اکوسیستمی خاک - نظیر تجزیه مواد آلی، چرخه‌ی مواد مغذی و تثبیت کربن - ضروری است. از سوی دیگر، پرداختن به چنین موضوعاتی مستلزم بهره‌گیری از رویکردهای تلفیقی است که پایش‌های میدانی در مقیاس واقعی، آزمایش‌های کنترل‌شده در شرایط استاندارد و مدل‌سازی‌های پیش‌بینی‌گر را در کنار یکدیگر قرار دهد. این رویکرد چندوجهی، به فهم عمیق‌تر دینامیک چندتنشی در اکوسیستم‌های خاکی کمک کرده و امکان پیش‌بینی دقیق‌تری از آینده‌ی این بوم‌سازگان‌ها فراهم می‌آورد.

در نهایت، پرداختن به این شکاف‌های دانشی نه تنها درک ما از تاب‌آوری خاک و جوامع حشرات وابسته به آن را ارتقا خواهد داد، بلکه زمینه‌ساز تدوین استراتژی‌های مدیریتی و سیاستی کارآمدتر برای حفاظت از خدمات حیاتی خاک در مواجهه با تغییرات جهانی خواهد شد.

در ایران، با وجود اهمیت بالای حشرات خاکزی در حفظ عملکردهای بوم‌سازگانی خاک، پژوهش‌های محدود و پراکنده‌ای انجام شده است. بررسی‌های موجود، از جمله مطالعات تنوع بندپایان در پارک‌های شهری و ارزیابی اثرات تغییرات کاربری زمین بر جوامع خاکی، نشان‌دهنده حساسیت بالای این جوامع به تغییرات محیطی است. با توجه به تنوع اقلیمی و اکوسیستمی ایران، از مناطق خشک و نیمه‌خشک تا جنگل‌های هیرکانی و زاگرس، نیاز به مطالعات بومی‌سازی‌شده برای درک دقیق‌تر واکنش‌های

حشرات خاکزی به تغییرات اقلیمی و آلاینده‌ها احساس می‌شود. چنین مطالعاتی می‌توانند مبنای طراحی سناریوهای مدیریتی و حفاظتی مؤثر در سطح ملی و منطقه‌ای قرار گیرند و مسیر آینده حفاظت از اکوسیستم‌های خاکی ایران را روشن سازند.

نتیجه‌گیری

مطالعات موجود به وضوح نشان می‌دهند که حشرات خاکزی، به‌عنوان بازیگران کلیدی در خدمات اکوسیستمی خاک، تحت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم تغییرات اقلیمی و آلاینده‌های نوظهور قرار دارند. افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و دوره‌های خشکی، به همراه ورود ریزپلاستیک‌ها، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها، می‌توانند همزمان ساختار جوامع خاکزی، فنولوژی، فعالیت‌های تغذیه‌ای و تولیدمثل آن‌ها را مختل کرده و در نهایت کارکردهای بوم‌سازگانی خاک مانند تجزیه مواد آلی، چرخه مواد مغذی و تثبیت کربن را کاهش دهند. شواهد بین‌المللی و محلی نشان می‌دهند که اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و آلاینده‌ها هم‌افزا و پیچیده هستند و پاسخ گونه‌ها به این فشارها نه تنها تابع شرایط محیطی محلی، بلکه به ویژگی‌های عملکردی و زیست‌محیطی گونه‌ها وابسته است. پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نیز تأکید می‌کنند که جوامع خاکزی حساس به تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های نوظهور هستند، اما داده‌های بومی در این زمینه هنوز محدود و پراکنده است. این خلأ پژوهشی ضرورت انجام مطالعات میان‌رشته‌ای، طولانی‌مدت و مبتنی بر رویکردهای تلفیقی شامل پایش میدانی، آزمایش‌های کنترل‌شده و مدل‌سازی پیش‌بینی‌گر را برجسته می‌سازد. درک دقیق نحوه تأثیر فشارهای همزمان محیطی بر حشرات خاکزی و خدمات اکوسیستمی مرتبط، نه تنها به افزایش تاب‌آوری خاک و حفاظت از کارکردهای اکوسیستمی کمک می‌کند، بلکه پایه‌ای برای تدوین سیاست‌ها و استراتژی‌های مدیریتی مؤثر در ایران و دیگر مناطق مشابه فراهم می‌آورد. چنین دانش کاربردی می‌تواند مسیر آینده حفاظت از اکوسیستم‌های خاکی، بهره‌برداری پایدار از منابع و تضمین امنیت غذایی و زیست‌محیطی را روشن سازد.

فهرست منابع

- Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., ... & Phillips, H. R. (2023). Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 60(7), 1239-1253.
- Boots, B. (2022). Implication of microplastics on soil faunal communities—identifying gaps of knowledge. *Emerging topics in life sciences*, 6(4), 403-409.
- Coulson, S. J., Convey, P., Schuur, S., & Lang, S. I. (2023). Interactions between winter temperatures and duration of exposure may structure Arctic microarthropod communities. *Journal of Thermal Biology*, 114, 103499.
- Diffenbaugh, N. S., & Burke, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(20), 9808–9813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>
- Doulabian, S., Toosi, A. S., Calbimonte, G. H., Tousi, E. G., & Alaghmand, S. (2021). Projected climate change impacts on soil erosion over Iran. *Journal of Hydrology*, 598, 126432.
- Eisenhauer, N., Reich, P. B., & Isbell, F. (2012). Decomposer diversity and identity influence plant diversity effects on ecosystem functioning. *Ecology*, 93(11), 2227–2240. <https://doi.org/10.1890/11-2266.1>
- Gomes, A. R., Justino, C., Rocha-Santos, T., Freitas, A. C., Duarte, A. C., & Pereira, R. (2017). Review of the ecotoxicological effects of emerging contaminants to soil biota. *Journal of environmental science and health, Part A*, 52(10), 992-1007.
- Goroeei, A., Srivastava, A. K., Jahanbakhshi, F., Ahmadi, A., Aynehban, A., Nendel, C., ... & Kamali, B. (2025). Projected climate change impacts on future soil organic carbon dynamics and wheat yields under different agricultural management strategies for two contrasting environments in Iran. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 30(7), 1-31.
- Guo, S., Wang, Q., Li, Z., Chen, Y., Li, H., Zhang, J., ... & Zhao, M. (2023). Ecological risk of microplastic toxicity to earthworms in soil: A bibliometric analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1126847.
- Haines, A., Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., & Corvalan, C. (2006). Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health*, 120(7), 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2006.01.002>

- Hein, N., Astrin, J. J., Beckers, N., Giebner, H., Langen, K., Löffler, J., ... & Fonseca, V. G. (2024). Arthropod diversity in the alpine tundra using metabarcoding: Spatial and temporal differences in alpha-and beta-diversity. *Ecology and Evolution*, 14(2), e10969.
- Jalali, M., Antoniadis, V., & Najafi, S. (2021). Assessment of trace element pollution in northern and western Iranian agricultural soils: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(12), 823.
- Krab, E. J., Lundin, E. J., Coulson, S. J., Dorrepaal, E., & Cooper, E. J. (2022). Experimentally increased snow depth affects high Arctic microarthropods inconsistently over two consecutive winters. *Scientific reports*, 12(1), 18049.
- Leal Filho, W., Nagy, G. J., Setti, A. F. F., Sharifi, A., Donkor, F. K., Batista, K., & Djekic, I. (2023). Handling the impacts of climate change on soil biodiversity. *Science of the Total Environment*, 869, 161671.
- Li, Y., Hou, F., Sun, L., Lan, J., Han, Z., Li, T., ... & Zhao, Z. (2024). Ecological effect of microplastics on soil microbe-driven carbon circulation and greenhouse gas emission: A review. *Journal of Environmental Management*, 364, 121429.
- Lin, D., Yang, G., Dou, P., Qian, S., Zhao, L., Yang, Y., & Fanin, N. (2020). Microplastics negatively affect soil fauna but stimulate microbial activity: insights from a field-based microplastic addition experiment. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1934), 20201268.
- Lindsey, R., & Dahlman, L. (2020). Climate change: Global temperature. *Climate. gov*, 16, 1-5.
- Mach, K. J., Kraan, C. M., Adger, W. N., Buhaug, H., Burke, M., Fearon, J. D., ... Scheffran, J. (2019). Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature*, 571(7764), 193–197. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6>
- Machado, A. A. de, Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- Malik, A., Lan, J., & Lenzen, M. (2016). Trends in global greenhouse gas emissions from 1990 to 2010. *Environmental science & technology*, 50(9), 4722–4730.
- Malik, A., Lenzen, M., & Ralph, N. (2016). Global warming contributions from Chinese export-related emissions. *Energy Economics*, 51, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.06.020>
- Manabe, S. (2019). Role of greenhouse gas in climate change. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1), 1620078.
- Marty, A., Boeriis, T., Martínez-De León, G., Holmstrup, M., & Thakur, M. P. (2022). Temperature-dependent trade-offs in maternal investments: An experimental test with two closely related soil microarthropods. *European Journal of Soil Biology*, 110, 103402.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2(1), 2391.
- Mohammadi, M., Dargahi, A., Almasi, A., Mousavi, S. A., & Mohammadi, P. (2025). Occurrence of microplastic, antibiotics, hormones, and heavy metals in livestock and poultry manure in west iran. *Scientific Reports*, 15(1), 27228.
- Mozaffarhadirli, M., Rafiee, M., Eslami, A., & Abbasi, S. (2024). Microplastic abundance and heavy metal contamination in agricultural soil with the wastewater treatment plants effluent; Tehran, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(16), 483.
- Mukherji, A., Thorne, P., & Cheung, W. W. L. (2023). IPCC sixth assessment report (AR6) synthesis report: climate change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Peña-Aguilera, P., Schmidt, N. M., Stewart, L., Parisy, B., van Der Wal, R., Lindman, L., ... & Roslin, T. (2023). Consistent imprints of elevation, soil temperature and moisture on plant and arthropod communities across two subarctic landscapes. *Insect Conservation and Diversity*, 16(5), 684-700.
- Phillips, H. R., Cameron, E. K., Eisenhauer, N., Burton, V. J., Ferlian, O., Jin, Y., ... & Beaumelle, L. (2024). Global changes and their environmental stressors have a significant impact on soil biodiversity—A meta-analysis. *Iscience*, 27(9).
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., ... Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, & M. D. Mastrandrea (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 485–533). Cambridge University Press.
- Qin, H., Shang, J., Qi, Q., Cao, B., Kong, Y., Li, Y., ... & Yi, X. (2024). Soil Moisture and Litter Coverage Drive the Altitude Gradient Pattern of Soil Arthropods in a Low-Elevation Mountain. *Diversity*, 16(5), 263.
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M., Startz, R., & Liu, P. (2017). Less than 2 C warming by 2100 unlikely. *Nature climate change*, 7(9), 637-641.

Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M. A., Liu, Y., Wang, J., ... & Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102408.

Sanders, S., Formenti, L., & Thakur, M. P. (2023). How will climate change affect the feeding biology of Collembola? *Soil Biology and Biochemistry*,

Singh, K. (2024). Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *International Journal of Multidisciplinary Educational Research*. DOI: <http://ijmer.in.doi/2024/13.4>, 29.

Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571–573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>

Wan, L., Cheng, H., Liu, Y., Shen, Y., Liu, G., & Su, X. (2023). Global meta-analysis reveals differential effects of microplastics on soil ecosystem. *Science of the Total Environment*, 867, 161403.

Wang, Q., Adams, C. A., Wang, F., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Interactions between microplastics and soil fauna: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(18), 3211-3243.

Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780, 146546.

Impacts of Climate Change and Emerging Soil Pollutants on Soil Insect Ecosystem Services and Soil Ecosystem Sustainability

Mohammad Mahdi Rabieh

Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
(mmrabie@birjand.ac.ir)

Abstract

Soils are dynamic ecosystems, and soil insects and arthropods play a key role in organic matter decomposition, soil aeration, and nutrient cycling. However, these services are increasingly affected by anthropogenic stressors such as climate change and emerging contaminants. Climate change, through rising temperatures, drought, and altered precipitation patterns, reduces the diversity and activity of soil insects, threatening ecosystem functions such as organic matter decomposition and carbon sequestration. These effects include decreased abundance and body size, altered reproductive trade-offs, and mismatches between insect activity and resource availability. Emerging contaminants, including microplastics and chemical compounds, also disrupt soil physical and chemical properties and microbial community composition, reducing survival, reproduction, and species diversity of soil insects and impairing soil ecological processes. The combination of climate change and contaminants exerts compounded pressure on soil insects, and synergistic effects can increase ecosystem vulnerability. In Iran, research on the combined impacts of these stressors is limited, although evidence of contaminants in agricultural and urban soils has been reported. Therefore, interdisciplinary and long-term studies are essential to assess the direct responses of soil insects and to develop sustainable management strategies to preserve soil resilience and its ecosystem services.

Keywords: Climate change. Emerging soil pollutants. Microplastics. Soil-dwelling insects. Soil ecosystem services