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

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

کارکردهای بوم‌سازگان حشرات خاکزی به‌عنوان زیست‌نشانگرهای کیفیت خاک

محمدمهدی ربیعه[1*]

۱- استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند. ایران
(**mmrabie@birjand.ac.ir**)

چکیده

حشرات خاکزی نقش کلیدی در پایداری اکوسیستم خاک ایفا می‌کنندوبا فعالیت‌هایی مانند حفر تونل، مخلوط کردن ذرات و انتقال مواد آلی، ساختار، تهویه و نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشند. این موجودات با تسریع تجزیه موادآلی وپراکندگی میکروارگانیسم‌ها چرخه عناصر غذایی راتقویت کرده وباروری وسلامت اکوسیستم خاک را ارتقا می‌دهند. به‌دلیل حساسیت بالای حشرات خاکزی به تغییرات محیطی، گروه‌هایی مانند پادمان‌ها، سوسک‌های Carabidae و Scarabaeidae به‌عنوان زیست‌نشانگرهای مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک شناخته می‌شوندو می‌توانندهشدارهای سریع در برابر آلودگی‌هاو فشارهای انسانی ارائه دهند.

درایران، تنوع بالای حشرات خاکزی، به‌ویژه پادمان‌هاوسایربندپایان خاکزی، فرصت ارزشمندی برای پایش زیستی و مدیریت خاک فراهم می‌کند. گرچه مطالعات تاکنون بیشتر توصیفی وفهرست‌برداری گونه‌ای بوده، زیرساخت لازم برای کاربرد عملی آن‌هادارزیابی فشارهای محیطی واصلاح خاک فراهم شده است. زیست‌فناوری خاک نیز با بهره‌گیری از حشرات خاکزی و سایرارگانیسم‌ها، از جمله استفاده ازاصلاحگرهایی مانند بیوچار، کیفیت، پایداری و خودپالایی خاک را بهبود می‌بخشد. ادغام پایش زیستی حشرات خاکزی با رویکردهای زیست‌فناورانه می‌تواند به مدیریت پایدار خاک، افزایش بهره‌وری و حفاظت بلندمدت ازمنابع خاک در ایران کمک کند.

واژگان کلیدی:حشرات خاکزی، زیست نشانگر، کیفیت وسلامت خاک، تنوع زیستی خاک، زیست فناوری خاک

مقدمه

حشرات خاکزی یکی ازگروه‌های کلیدی بی‌مهرگان خاک هستند که نقش‌های اکولوژیکی متنوع وحیاتی دراکوسیستم‌های خاکی ایفا می‌کنند. این نقش‌هاشامل تجزیه موادآلی، تهویه خاک، بازچرخانی عناصرمغذی وتسهیل فعالیت میکروبی می‌باشد (Lavelle & Spain, 2001) به دلیل حساسیت بالای حشرات خاکزی به تغییرات محیطی، ازآن‌ه به‌عنوان زیست‌نشانگرهای مناسب برای ارزیابی کیفیت وسلامت خاک استفاده می‌شود (Delgado-Baquerizo et al., 2020) .

حشرات خاکزی شامل گروه‌های متنوعی ازحشرات هستند که هرکدام نقش ویژه‌ای دراکوسیستم خاک دارند. از جمله مهم‌ترین گروه‌هامی‌توان به سوسک‌ها (Coleoptera) ، مورچه‌ها(Formicidae) ،دم چنگالان (Diplura) وبرخی گونه‌های مگس‌های خاکزی (Sciaridae, Mycetophilidae) اشاره کرد (Langraf, V., et al., 1997) .از گونه‌های شاخص می‌توان به سوسک‌های خانواده Carabidae مانند Carabus coriaceus و Pterostichus melanarius ا شاره نمودکه نقش مهمی درتهویه وباروری خاک دارند1988 (Lal, R.) . نوع گونه‌ای این حشرات درمحیط‌های مختلف به‌طورقابل توجهی متفاوت است واغلب باکیفیت وساختارخاک مرتبط است. بوم‌سازگان حشرات خاکزی شامل شبکه‌های پیچیده‌ای ازتعاملات بین گونه‌های مختلف حشرات، میکروارگانیسم‌هاواجزای فیزیکی وشیمیایی خاک است که عملکرد اکوسیستم راشکل می‌دهد(Lavelle & Spain, 2001).این حشرات بافعالیت‌های خود مانندتونل‌زنی، تغذیه ازموادآلی وپراکندگی میکروارگانیسم‌ها، اکوسیستم خاک رابه‌صورت پویاتنظیم می‌کنند. مطالعات فون حشرات خاکزی در خاک‌های جنگلی، کشاورزی ومراتع نشان داده است که گونه‌های غالب و ترکیب جمعیتی آن‌هامی‌تواندشاخصی قابل اعتمادبرای نوع وکیفیت خاک باشد(Rousseau et al., 2013) .

ایران باتنوع اقلیمی وخاکی گسترده، میزبان جمعیت‌های متنوعی از حشرات خاکزی است که هنوز بسیاری از گونه‌هاونقش‌های اکولوژیکی آن‌ها به‌طورکامل مطالعه نشده‌اند. بررسی جمعیت وتنوع این حشرات در خاک‌های زراعی، باغ‌هاومناطق طبیعی می‌تواناطلاعات مهمی برای مدیریت پایدار خاک وحفظ تنوع زیستی ارائه دهد. هدف ازاین مطالعه بررسی کارکردهای بوم‌سازگان حشرات خاکزی وارزیابی توانایی آن‌هابه‌عنوان زیست‌نشانگرهای کیفیت خاک دراکوسیستم‌های مختلف ایران است. این تحقیق می‌تواندبه توسعه روش‌های پایش زیستی وزیست‌فناوری خاک کمک کرده واطلاعات پایه‌ای برای مدیریت پایدارخاک فراهم آورد.

شکل ۱- دو گونه از پادمان که از خاک های کشاورزی استان خراسان جنوبی جداسازی شده است.

نقش حشرات خاکزی در حفظ کیفیت خاک

حشرات خاکزی مانندسوسک‌ها، مورچه‌هاوکرم‌های خاکی بافعالیت‌های فیزیکی وبیوشیمیایی خودتأثیرمهمی برکیفیت خاک دارند. فعالیت‌های تونل‌زنی وحفرکانال‌های زیرزمینی توسط این حشرات باعث بهبودساختار خاک،افزایش تهویه ونفوذپذیری آب وهوادرخاک وکاهش تراکم خاک می‌شود(Scheu, 2003) . مورچه‌هاباایجادلانه‌هاو تونل‌های گسترده، ذرات خاک رامخلوط

کرده ومواداًلی سطحی رابه عمق خاک منتقل می‌کنند که این امر موجب بهبود ظرفیت نگهداری آب وافزایش تهویه ریشه‌های گیاهان می‌شود(Lavelle, P., & Spain, A. V 2001).

حشرات خاکزی همچنین باتجزیه مواداًلی وتبدیل آن‌هابه هوموس،چرخه عناصرمغذی مانندنیتروژن، فسفر وکربن را تسریع می‌کنند(Edwards et al., 2010). مطالعات تجربی نشان داده‌اندکه حضورجمعیت‌های متنوع حشرات خاکزی درخاک‌های زراعی، سبب افزایش محتوای هوموس وظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شودوسلامت عمومی اکوسیستم خاک رااارتقا می‌دهد (Barros et al., 2016). علاوه براین فعالیت حشرات خاکزی درپراکندگی میکروارگانیسم‌ها مفیدخاک نقش دارد، زیرابسیارازباکتری‌هاوقارچ‌هابامواددفعی وتونل‌های حشرات توزیع می‌شوندواین امربه تجزیه سریع‌ترمواداًلی وافزایش باروری خاک کمک می‌کند(Decaëns et al.,2004). بنابراین، این فعالیت‌ها نشان می‌دهدکه حشرات خاکزی نه تنهابه عنوان شاخص‌های زیستی برای ارزیابی سلامت خاک عمل می‌کنندبلکه نقش مستقیم دربهبودکیفیت، باروری وپایداری اکوسیستم خاک دارند (Lal, R1988) .

حشرات خاکزی به‌عنوان زیست‌نشانگرهای کیفیت خاک زیست‌نشانگرهاموجوداتی هستندکه تغییرات جمعیتی ورفتاری آن‌هامی‌تواندبه‌طورمستقیم با تغییرات محیطی وکیفیت اکوسیستم مرتبط باشد(McGeoch, 1998) . مطالعات نشان می‌دهدکه کاهش تنوع وفراوانی حشرات خاکزی اغلب بافرسایش خاک،آلودگی شیمیایی وکاهش مواداًلی مرتبط است Nsabimana, D). (2018بنابراین پایش این حشرات می‌تواندابزارمؤثری برای شناسایی مناطق تحت فشارانسانی وارزیابی اقدامات مدیریت خاک فراهم آورد(Collins,et al.,2021). تحقیقات علمی، گونه‌های مختلف حشرات خاکزی به‌عنوان شاخص‌های زیستی مورداستفاده قرارگرفته‌اند. برای مثال، پادمان‌ها (Collembola) به دلیل حساسیت بالابه آفت‌کش‌هاوآلاینده‌های خاک، یکی ازگروه‌های شاخص محسوب می‌شوند؛ مطالعات نشان داده‌اندکه کاهش جمعیت و تغییردر تنوع گونه‌ای پادمان‌هامی‌تواندبه‌عنوان شاخصی برای آلودگی شیمیایی وکاهش کیفیت خاک استفاده شود(Fiera, C2009) .

همچنین، سوسک‌های خانواده Carabidae نیزبه‌عنوان زیست‌نشانگرهای مؤثر برای حضورآلاینده‌ها،ازجمله میکروپلاستیک‌ها، موردبررسی قرار گرفته‌اند. تحقیقات نشان داده‌اندکه تغییرات جمعیت این سوسک‌ها با میزان آلودگی خاک همبستگی دارد و می‌تواند برای پایش اکولوژیکی خاک به کار رود(Staczek et al., 2025) . علاوه براین، سوسک‌های خرطومی (Scarabaeidae) به‌ویژه لاروهای آن‌هابه تغییرات فیزیولوژیکی وسلولی درمواجهه باآلودگی خاک پاسخ می‌دهند، که این ویژگی آن‌ها رابه شاخصی مناسب برای ارزیابی اثرات آفت‌کش‌هاوآلاینده‌هابراکوسیستم خاک تبدیل می‌کند(Hussein et al., 2025) .

حشرات خاکزی نه تنهاشاخص‌های حساس وقابل اعتمادی برای پایش کیفیت خاک هستند، بلکه اطلاعات ارزشمندی درباره تأثیر فعالیت‌های انسانی، آلودگی‌هاوتغییرات اکوسیستم‌های خاکی ارائه می‌دهند. بنابراین، استفاده ازحشرات خاکزی به‌عنوان زیست‌نشانگرمی‌تواندبه برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و حفاظت از منابع خاک کمک شایانی کند. استفاده ازحشرات خاکزی به‌عنوان زیست‌نشانگرمی‌تواندبه برنامه‌ریزی‌های مدیریتی وحفاظت از منابع خاک کمک شایانی کند، زیرااین موجودات قادرندبه‌سرعت نسبت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهندوهشدارهای اولیه درموردکاهش کیفیت خاک راآشکارسازند (Collins,et al.,2021). چنین داده‌هایی به مدیران منابع طبیعی امکان می‌دهدتااقداماتی همچون کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی،افزایش پوشش گیاهی وبه‌کارگیری روش‌های کشاورزی حفاظتی رادراولویت قرار دهند(Fiera, C 2009) .

درایران، باتوجه به چالش‌هایی نظیر بیابان‌زایی، کاهش ماده آلی خاک و مصرف بالای کودوسموم شیمیایی، استفاده ازحشرات خاکزی به‌عنوان شاخص‌های زیستی می‌تواندابزارمؤثری برای ارزیابی سلامت خاک‌های زراعی و مرتعی باشد. تلفیق داده‌های حاصل ازپایش حشرات خاکزی باسیاست‌های کشاورزی پایداروmدیریت منابع طبیعی درایران می‌تواندرویکردی نوین برای افزایش بهره‌وری، کاهش فشارهای انسانی وحفاظت بلندمدت ازخاک به‌عنوان یکی ازمهم‌ترین سرمایه‌های طبیعی کشورفراهم سازد.

کاربردهای زیست‌فناوری خاک

زیست‌فناوری خاک شاخه‌ای میان‌رشته‌ای ازعلوم خاک، بوم‌شناسی و زیست‌فناوری است که باهدف بهبودکیفیت، پایداری وبهره‌وری خاک از موجودات زنده وفرآیندهای زیستی استفاده می‌کند (Gadd, 2004) . در این حوزه،ارگانیسم‌های خاکزی از

جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و به‌ویژه حشرات خاکزی، به‌عنوان عوامل کلیدی در تجزیه موادآلی، بازچرخانی عناصر غذایی، اصلاح ساختارخاک وکاهش اثرات آلاینده‌هاایفای نقش می‌کنند(Lavelle et al,.2006) .

حشرات خاکزی درزیست‌فناوری خاک چندین کارکرداساسی دارند:

۱. شاخص‌های بیولوژیکی (Bioindicators) تغییردر فراوانی یا تنوع گروه‌هایی مانند Collembola و Carabidae می‌تواند به‌طور مستقیم نشان‌دهنده اثرات مصرف کودهاوآفت‌کش‌هابر سلامت خاک باشد(Collins,et al.,2021) .

۲ .بهبودکیفیت فیزیکی خاک:گونه‌هایی مانندسوسک‌های کودزی (Scarabaeidae) بادفن موادآلی وافزایش نفوذپذیری خاک، شرایط بهتری برای رشد گیاهان فراهم می‌کنند(Nichols et al., 2008) .

۳ .حذف وکاهش آلاینده‌ها:برخی گونه‌های حشرات بامشارکت درچرخه کربن و نیتروژن،اثرات منفی آلودگی‌های شیمیایی راکاهش می‌دهندوظرفیت خودپالایی خاک راتقویت می‌کنند(Rousseau et al., 2013) .

۴ .مدل‌سازی و پیش‌بینی:استفاده ازداده‌های حاصل ازجوامع حشرات خاکزی درمدل‌های زیست‌فناورانه، امکان پیش‌بینی تغییرات کیفیت خاک در شرایط مدیریت متفاوت یا تغییرات اقلیمی را فراهم می‌آورد(Ponge et al., 2013)).

یکی ازنمونه‌های بارزاستفاده اززیست‌فناوری خاک درارتباط با حشرات خاکزی، مطالعه‌ای است که توسط Kayiranga وهمکاران(۲۰۲۳)انجام شد.این پژوهش به بررسی اثرآلودگی خاک‌های شهری بافلزات سنگین نظیرسرب و کادمیوم برجمعیت وتنوع گونه‌های پادمان‌ها(Collembola) وهمچنین ارزیابی توان بازیابی خاک از طریق به‌کارگیری اصلاحگر زیستی بیوچار (Biochar)پرداخته است. نتایج نشان دادکه باافزایش غلظت فلزات سنگین، میزان تولیدمثل ورشدپادمان‌هابه‌طورچشمگیری کاهش یافته وشاخص‌های زیستی مرتبط باکیفیت خاک به سمت شرایط بحرانی حرکت می‌کنند. بااین حال،افزودن بیوچاربه خاک منجربه کاهش دسترسی‌پذیری فلزات سنگین، بهبودویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مانندظرفیت نگهداری آب و افزایش کربن آلی، ودرنهایت بازگشت تدریجی جمعیت پادمان‌هابه سطح طبیعی شد. این تحقیق نشان دادکه تلفیق پایش زیستی حشرات خاکزی با روش‌های زیست‌فناورانه مانندبیوچارمی‌تواندابزاری کارآمدبرای کاهش آلودگی، بهبودکیفیت زیستگاه وارتقای سلامت کلی اکوسیستم خاک باشد. چنین رویکردی نه تنهاارزش علمی درحوزه اکولوژی خاک دارد، بلکه از منظرمدیریت عملی منابع خاک نیز بسیارکاربردی است ومی‌تواندمبنای تصمیم‌گیری‌های پایداردرکشاورزی ومدیریت اراضی به‌ویژه درمناطق تحت فشار فعالیت‌های صنعتی وشهری قرارگیرد.

مطالعات انجام شده درایران

درایران، پژوهش‌های متنوعی دربارهٔ فون، تنوع زیستی وزیست‌شناسی پادمان‌هاو دیگر بندپایان خاکزی انجام شده است که نشان‌دهندهٔ اهمیت این گروه درمطالعات خاکی وامکان استفادهٔ آن‌هابه‌عنوان شاخص‌های زیستی است. بررسی‌های اولیه وفهرست‌های گونه‌ای، مانندمعرفی وجمع‌آوری اطلاعات پایه‌ای مربوط به پادمان‌های ایران که توسط شایان‌مهروهمکاران ارائه شده است، پایگاه شناختی مهمی برای مطالعات اکولوژیک وپایش زیستی فراهم آورده وفهرستی ازگونه‌هاوپراکنش‌های جغرافیایی رادردسترس محققان قرار داده(Nsabimana, D2018)). مطالعات تکمیلی وچک‌لیست‌های اخیرنیز نشان می‌دهندکه بیش ازدویست گونهٔ ثبت‌شده وده‌هاجنس ازپادمان‌هادرزیستگاه‌های مختلف کشورگزارش شده‌اند، امری که ضرورت پایش ساختاری وعملکردی این گروه‌هاراتقویت می‌کند(Najafi et al., 2023) .

مطالعات میدانی دراستان‌های مختلف، ازجمله بررسی‌های فون پادمان دراستان‌های مازندران ولرستان، تنوع وتوزیع گروه‌های پادمان رادر اکوسیستم‌های جنگلی وکشاورزی موردارزیابی قرار داده ونشان داده‌اند که ترکیب گونه‌ای وتراکم پادمان‌ها با نوع پوشش گیاهی، ترکیب خاک و مدیریت اراضی درهمبستگی است (Nsabimana, D 2018 , Nsabimana, D 2018). علاوه بر پادمان‌ها، پژوهش‌های دیگری نیز به بررسی کنه‌هاوسایر بندپایان خاکزی پرداخته‌اندکه وجودوتغییرات آن‌هارادرپارامترهای محیطی مختلف گزارش کرده‌اند؛این تحقیقات مبنای فنی لازم برای کاربردآن‌هابه‌عنوان شاخص زیستی رافراهم می‌کنند(Manu et al., 2022).

اگرچه بیشترمطالعات ایرانی تاکنون برروی توصیف گونه‌ای، چک‌لیست‌هاوالگوهای توزیع مکانی-فصلی متمرکزبوده‌اند،چندین پایان‌نامه ومقالات ک ربردی نیزنشان داده‌اندکه تغییرات جوامع حشرات خاکزی می‌تواندبه‌عنوان نشانگرهای محلی فشارهای محیطی(مانند تغییرکاربری زمین، شخم شدیدیامصرف غیرمجازآفت‌کش‌ها) به‌کاررود؛ برای مثال پژوهش‌های مزرعه‌ای

درسیستم‌های زراعی نشان دادندکه سیستم‌های مدیریتی مختلف (ارگانیک دربرابرمتعارف) برتنوع وفراوانی حشرات خاکزی تأثیرقابل‌توجه دارندواین تفاوت‌هاقابل استفاده در برنامه‌ریزی مدیریتی است(Rad et al., 2019) . به‌علاوه،مطالعات اخیرکه از روش‌های جدیدی مانندبارکدینگ DNA برای شناسایی گونه‌هااستفاده کرده‌اند، امکان پایش سریع‌ترودقیق‌ترجوامع حشرات خاکزی رافراهم آورده و ابزارهای لازم برای کاربردهای زیست‌نشانی درایران را توسعه داده‌اند(Saberi-Pirooz et al., 2024) .

درزمینه کاربردعملی به‌عنوان شاخص زیستی، باید توجه کردکه درایران هنوزمطالعات بلندمدت ومداخلاتی که به‌طور صریح از حشرات خاکزی برای ارزیابی اقدامات اصلاحی خاک (مثلاًاصلحگرها، کاهش آفت‌کش، یاتکنیک‌های زیست‌فناورانه مانندبیوچار)استفاده کنند، نسبتاًمحدوداست؛ بیشتر تحقیقات موجودتوصیفی یامقایسه‌ای هستند. بااین وجود، وجود چک‌لیست‌های گونه‌ای گسترده ومطالعات محلی متعدد(به‌ویژه روی Collembola وگروه‌های مرتبط) زیرساخت لازم برای اجرای مطالعات کاربردی وآزمایش‌های میدانی (مانند پایش اثر کود/سم یاارزیابی بازیابی خاک)رافراهم می‌آورد(Shayanmehr, 2013).

نتیجه‌گیری

حشرات خاکزی به‌عنوان اجزای کلیدی اکوسیستم‌های خاکی، نه تنهادر فرآیندهای بنیادینی مانند تجزیه موادآلی، بازچرخانی عناصرغذایی و بهبودساختار خاک نقش ایفامی‌کنند، بلکه به دلیل حساسیت بالای خودبه تغییرات محیطی، ابزارارزشمندی برای پایش وارزیابی کیفیت خاک محسوب می‌شوند. شواهدعلمی نشان می‌دهدکه استفاده ازاین موجودات به‌عنوان زیست‌نشانگر،امکان شناسایی سریع تغییرات ناشی ازفعالیت‌های انسانی، آلودگی‌های شیمیایی ومدیریت نامناسب اراضی رافراهم می‌آوردومی‌تواندمبنای تصمیم‌گیری برای رویکردهای اصلاحی و زیست‌فناورانه باشد. درایران، باوجودتنوع اقلیمی وخاکی گسترده، پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاًبرجنبه‌های توصیفی وفهرست‌برداری گونه‌ای متمرکز بوده‌اند. هرچنداین مطالعات پایه‌ای اهمیت بسیاری درشناخت فون حشرات خاکزی دارند، اماگذاراز سطح توصیف به سمت کاربردعملی درمدیریت پایدارخاک ضروری است. به‌ویژه درشرایطی که کشوربا چالش‌هایی نظیرکاهش ماده آلی خاک،مصرف بالای نهاده‌های شیمیایی، بیابان‌زایی وفشارهای ناشی ازتغییرکاربری زمین روبه‌روست، بهره‌گیری ازظرفیت حشرات خاکزی درقالب رویکردهای زیست‌فناورانه (مانند پایش اثرات کودوآفت‌کش، ارزیابی تأثیراصلاحگرهایی نظیربیوچار، ومدل‌سازی اکولوژیک) می‌تواند مسیر تازه‌ای برای مدیریت منابع خاک فراهم سازد.نتایج مطالعات جهانی وشواهدمحدوددداخلی نشان می‌دهدکه ادغام پایش زیستی حشرات خاکزی باسیاست‌های کشاورزی پایدار، می‌تواندمنجربه بهبود بهره‌وری، افزایش سلامت اکوسیستم خاک، کاهش فشارهای انسانی و حفاظت بلندمدت از خاک به‌عنوان یکی از سرمایه‌های حیاتی کشور شود. بنابراین، توسعه تحقیقات میان‌رشته‌ای، طراحی آزمایش‌های میدانی بلندمدت واستفاده ازفناوری‌های نوین(مانند بارکدینگ DNAومدل‌های زیست‌فناورانه)می‌تواندآینده‌ای نویدبخش برای مدیریت علمی وپایدار خاک درایران رقم بزند.

فهرست منابع

Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. Nature, 515(7528), 505-511.

Biological reviews, 73(2), 181-201.

Collins, M. K., Magle, S. B., & Gallo, T. (2021). Global trends in urban wildlife ecology and conservation. Biological Conservation, 261, 109236.

Decaëns, T., Jiménez, J. J., Barros, E., Chauvel, A., Blanchart, E., Fragoso, C., & Lavelle, P. (2004). Soil macrofaunal communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. Agriculture, ecosystems & environment, 103(2), 301-312.

Delgado-Baquerizo , M., Reich, P. B., Trivedi, C., Eldridge, D. J., Abades, S., Alfaro, F. D., ... & Singh, B. K. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes.

Ecology and urban planning. Biodiversity & Conservation, 8(1), 119-131. Barros, E., Taboada, M. A., & Lavelle, P. (2016). Earthworm activity and its effect on soil organic matter and nutrient cycling in agroecosystems.AppliedSoilEcology,98,85–94.

https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.09.011

Edwards, C. A., Arancon, N. Q., & Sherman, R. L. (Eds.). (2010). Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management.
Fiera, C. (2009). Biodiversity of Collembola in urban soils and their use as bioindicators for pollution. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44, 868-873.
Gadd, G. M. (2004). Mycotransformation of organic and inorganic substrates. Mycologist, 18(2), 60-70.
Guéi, A. M., & Tondoh, J. E. (2012). Ecological preferences of earthworms for land-use types in semi-deciduous forest areas, Ivory Coast. Ecological Indicators, 18, 644-651.
Hussein, H. S., Nasser, T. A., Saad, M., Abo-Shanab, A. S., & El-Samad, L. M. (2025). Physiological, molecular and histological response of Pentodon bispinosus larvae (Coleoptera: Scarabaeidae) as a novel bioindicator for soil pollutants. Scientific Reports, 15(1), 31173.
Lal, R. (1988). Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. Agriculture, ecosystems & environment, 24(1-3), 101-116.
Langraf, V., Petrovičová, K., Schlarmannová, J., David, S., Avtaeva, T. A., & Brygadyrenko, V. V. (2021). Assessment of soil quality in agroecosystems based on soil fauna. Biosystems Diversity, 29(4), 319-325.
Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001 Ding, J., Gower, J. E., & Schmidt, D. S. (2006). Springer Science+ Business Media, LLC. Multivariate Public Key Cryptosystems.
Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). Soil ecology. Dordrecht: Springer Netherlands.
Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... & Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. European journal of soil biology, 42, S3-S15.
Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... & Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. European journal of soil biology, 42, S3-S15.
Manu, M., Bîrsan, C. C., Chiriac, L. S., & Onete, M. (2022). Acarological characterisation (Acari: Mesostigmata) of an urban green area in Bucharest, Romania. Scientific Papers. Series D. Animal Science, 65(1).
McGEOCH, M. A. (1998). The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators.
McGEOCH, M. A. (1998). The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. Biological reviews, 73(2), 181-201.
Nature ecology & evolution, 4(2), 210-220.
Nsabimana, D. (2018). Use of soil and litter arthropods as biological indicators of soil quality in forest plantations and agricultural lands: A Review.
Nsabimana, D. (2018). Use of soil and litter arthropods as biological indicators of soil quality in forest plantations and agricultural lands: A Review.
Nsabimana, D. (2018). Use of soil and litter arthropods as biological indicators of soil quality in forest plantations and agricultural lands: A Review.
Ponge, J. F., Pérès, G., Guernion, M., Ruiz-Camacho, N., Cortet, J., Pernin, C., ... & Cluzeau, D. (2013). The impact of agricultural practices on soil biota: a regional study. Soil Biology and Biochemistry, 67, 271-284.
Rad, M. M., Moghaddam, P. R., Parsa, M., Asadi, G. A., & Shahnoshi, N. (2019). Insect's biodiversity in conventional and organic agro-ecosystems for wheat (Triticum aestivum L.) and potato (Solanum tuberosum) in Fariman region..
Rousseau, L., Fonte, S. J., Tellez, O., van der Hoek, R., & Lavelle, P. (2013). Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. Ecological indicators, 27, 71-82.
Scheu, S. (2003). Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives. Pedobiologia, 47(5–6), 846–856. https://doi.org/10.1078/0031-4056-00255
Staczek, F. M., & Mbora, D. N. (2025). Microplastics inhibit the decomposition of soil organic matter by adult darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae). Environmental Entomology, 54(1), 86-100.

Ecosystem Functions of Soil-Dwelling Insects as Bioindicators of Soil Quality: From Biodiversity to Sustainable Biotechnology

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

Abstract

Soil-dwelling insects play a key role in maintaining the sustainability of soil ecosystems by improving soil structure, aeration and permeability through activities such as tunneling, particle mixing, and organic matter redistribution. By accelerating organic matter decomposition and dispersing beneficial microorganisms, these organisms enhance nutrient cycling, fertility, and overall soil health. Due to their high sensitivity to

environmental changes groups such as Collembola, Carabidae, and Scarabaeidae beetles are recognized as effective bioindicators for assessing soil quality and can provide early warnings of pollution and anthropogenic pressures.
In Iran, the high diversity of soil insects, particularly Collembola and other soil arthropods, offers valuable opportunities for biological monitoring and soil management. Although most studies have so far focused on descriptive surveys and species inventories, the existing data provide a solid foundation for practical applications in evaluating environmental pressures and soil restoration. Soil biotechnology, utilizing soil insects and other organisms such as through the application of biochar can enhance soil quality, sustainability, and self-purification. Integrating biological monitoring of soil insects with biotechnological approaches can support sustainable soil management, increase productivity and ensure long-term conservation of soil resources in Iran.

Keywords:Soil-dwelling insects،Soil bioindicators،Soil quality and health،Soil biodiversity،Soil biotechnology