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

نقش تنوع عملکردی حشرات خاکزی در ارتقای کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیاگر خاک

محمد مهدی ربیعه* و فاطمه ایزدی

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

چکیده

کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیایی خاک با رعایت اصول شخم حداقل، پوشش دائمی خاک و تنوع کشت، موجب افزایش مواد آلی، بهبود ساختار و احیای فرآیندهای بوم‌شناختی خاک می‌شوند. حشرات خاک با ایفای نقش در تجزیه مواد آلی، تهویه، چرخه عناصر غذایی و کنترل زیستی آفات، از عوامل کلیدی پایداری و سلامت اکوسیستم‌های کشاورزی، به ویژه در شرایط خشک ایران، محسوب می‌شوند. تنوع عملکردی حشرات خاک، بازتابی از گوناگونی صفات زیستی آن‌ها، باعث حفظ پایداری، افزایش تاب‌آوری و بهبود چرخه مواد غذایی می‌شود. مدیریت‌های حفاظتی و احیایی مانند کاهش شخم، حفظ بقایا، کشت پوششی و تنوع کشت با فراهم کردن زیستگاه و منابع غذایی متنوع، تنوع عملکردی حشرات خاک را افزایش داده و خدمات اکوسیستمی خاک را تقویت می‌کنند. استفاده از مواد آلی و کاهش نهاده‌های شیمیایی فعالیت تجزیه‌کنندگان و میکروب‌ها را تقویت و پایداری چرخه مواد مغذی را افزایش می‌دهد. پژوهش‌های ایرانی نشان می‌دهد که حفظ تنوع گیاهی و مدیریت مناسب خاک، تراکم، زی‌توده و فعالیت حشرات مفید را افزایش داده و حاصل‌خیزی خاک را ارتقا می‌دهد. آینده کشاورزی ایران نیازمند بهره‌گیری از تنوع عملکردی حشرات خاک به‌عنوان سرمایه زیستی، با رویکردهای بوم‌پایه و داده‌محور، برای احیای خاک، کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و ارتقای پایداری تولید است.

واژگان کلیدی: کشاورزی حفاظتی، مدیریت احیاگر خاک، تنوع عملکردی حشرات، خدمات اکوسیستمی خاک

مقدمه

کشاورزی حفاظتی و مدیریت بازسازنده خاک (Regenerative Soil Management) دو رویکرد مکمل در جهت توسعه کشاورزی پایدار و کاهش تخریب منابع طبیعی محسوب می‌شوند. این دو نظام مدیریتی برمجموعه‌ای از روش‌های کاربردی تأکید دارند که هدف آن‌ها افزایش مواد آلی خاک، کاهش فرسایش، بهبود ساختار خاک و بازسازی فرایندهای بوم‌شناختی است. در این میان، حشرات خاک از اجزای کلیدی این فرایندها به شمار می‌آیند؛ زیرا با خرد کردن و ادغام بقایای گیاهی درخاک، تسریع تجزیه میکروبی، باز توزیع عناصرغذایی، افزایش تخلخل و هوادهی خاک و ایفای نقش در کنترل زیستی آفات، نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی و سلامت خاک ایفا می‌کنند. تمرکز بر تنوع عملکردی حشرات به‌جای صرفاً تنوع گونه‌ای، امکان درک دقیق‌تری از نقش صفات زیستی گوناگون (مانند نوع تغذیه، عمق زیست، اندازه بدن و رفتار زیستی) درکارکردهای اکوسیستمی فراهم می‌سازد و چگونگی اثر روش‌های مدیریتی بر خدمات زیست محیطی و تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی را آشکار می‌کند (Hathaway, 2016). اجرای کشاورزی حفاظتی بر سه اصل بنیادین استوار است: شخم حداقل یا بدون شخم، پوشش دائمی سطح خاک با بقایای گیاهی یا گیاهان پوششی و تنوع و تناوب کشت. حذف یا کاهش شخم از تخریب ساختار خاک جلوگیری کرده و محیط زیست پایدارتری برای جوامع حشرات و میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. نتایج مطالعات اخیر در سامانه‌های دیم ایران نشان داده است که حذف شخم در طول چند سال، باعث افزایش معنی‌دار فراوانی و تنوع عملکردی ماکروفوناهای خاک از جمله سوسک‌ها، مورچه‌ها و کرم‌های خاکی می‌شود (Parvizi et al. , 2024).

مدیریت بقایای گیاهی و استفاده از گیاهان پوششی نیز از مهم‌ترین مؤلفه‌های کشاورزی حفاظتی به‌شمار می‌روند. این رویکرد با حفظ پوشش سطحی خاک، از تبخیر بیش از حد و فرسایش جلوگیری کرده و با فراهم‌کردن مواد آلی تازه، زیستگاه و منبع غذایی برای حشرات تجزیه‌کننده و میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. در نتیجه، چرخه‌های کربن و نیتروژن فعال‌تر شده و کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک ارتقا می‌یابد (Bender et al., 2016). علاوه بر آن، کشت گیاهان پوششی متنوع به ویژه لگوم‌ها از طریق افزایش رطوبت خاک و تأمین عناصر غذایی، بستر مناسبی برای استقرار جوامع حشرات سودمند و دشمنان طبیعی آفات فراهم می‌کند.

تناوب و تنوع کشت نیز یکی از ابزارهای کلیدی در افزایش تاب‌آوری زیستی مزارع محسوب می‌شود. ترکیب محصولات مختلف در چرخه‌های چندساله، نه تنها از نظر اقتصادی مزیت دارد بلکه موجب افزایش تنوع زیستگاهی و غذایی برای گروه‌های مختلف حشرات خاک می‌شود. در نتیجه، شبکه‌های غذایی خاک پیچیده‌تر شده و خدمات اکوسیستمی مانند تجزیه بقایا، تنظیم جمعیت آفات و پایداری حاصل‌خیزی تقویت می‌گردد (Zhang et al., 2020).

در مدیریت احیایی خاک، علاوه بر اصول سه‌گانه فوق، بر استفاده از کودهای آلی و کمپوست، حذف تدریجی نهاده‌های شیمیایی، افزایش فعالیت‌های زیستی خاک و احیای چرخه‌های طبیعی مواد غذایی تأکید می‌شود. افزودن کود دامی و مواد آلی به خاک، منبع انرژی و تغذیه‌ای پایداری برای جوامع میکروبی و بندپایان خاک فراهم می‌کند و با بهبود ساختار فیزیکی خاک، نفوذپذیری آب و پایداری خاک‌دانه‌ها را افزایش می‌دهد (Lal, 2020). در مقابل، استفاده بی‌رویه از کودها و سموم شیمیایی موجب کاهش جمعیت حشرات غیرهدف، تخریب روابط اکولوژیکی و ساده‌سازی ساختار عملکردی جامعه خاک می‌گردد (Beaumelle et al., 2021). بنابراین، موفقیت در کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیایی خاک مستلزم کاهش تدریجی مصرف نهاده‌های شیمیایی و جایگزینی آن‌ها با ترکیبات آلی و زیستی سازگار با محیط است.

اجرای مؤثر این رویکردها نیازمند طراحی برنامه‌های پایش و ارزیابی بلندمدت است. در این برنامه‌ها باید شاخص‌هایی نظیر تنوع عملکردی حشرات، میزان ماده آلی، پایداری خاک‌دانه‌ها، سرعت تجزیه بقایا و عملکرد محصول به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری شود. داده‌های حاصل می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری برای اصلاح سیاست‌های مدیریتی، ارزیابی سلامت خاک و بهبود روش‌های اجرایی باشند (Cárceles Rodríguez t et al., 2022).

در ایران، با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، محدودیت منابع آبی، فرسایش شدید خاک و کاهش ماده آلی، ضرورت توسعه کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیایی خاک بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. پژوهش‌های میدانی در مناطق غربی و مرکزی کشور نشان داده‌اند که بهره‌گیری از این رویکردها ضمن بهبود ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک، موجب افزایش پایداری تولید در سیستم‌های دیم نیز می‌شود (Parvizi et al., 2024). با این حال، موانعی چون کمبود آگاهی کشاورزان،

هزینه بالای تجهیزات حفاظتی، نبود سیاست‌های حمایتی مؤثر و ضعف در ارتباط میان پژوهش و ترویج، چالش‌های اصلی در مسیر گسترش این روش‌ها در ایران محسوب می‌شوند (Ataei, Sadighi, Chizari, & Abbasi, 2021).

بنابراین، دستیابی به کشاورزی پایدار در کشور مستلزم تلفیق دانش بوم‌شناسی خاک، مدیریت تنوع عملکردی حشرات و اصلاح سیاست‌های مدیریتی است. هدف از این مقاله آن است که با مروری تحلیلی بر شواهد علمی جدید، نقش تنوع عملکردی حشرات خاک در کارایی کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیایی خاک را تبیین نماید و مسیرهایی را برای توسعه راهبردهای بومی در جهت احیای خاک‌های تخریب‌شده و ارتقای پایداری کشاورزی ایران پیشنهاد کند.

اهمیت تنوع عملکردی در خاک

تنوع عملکردی در خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری اکوسیستم‌های خاکی، بازتابی از گوناگونی صفات زیستی ارگانیسم‌ها است؛ صفاتی مانند اندازه بدن، گروه تغذیه‌ای، عمق فعالیت یا لانه‌سازی، نرخ تولیدمثل، و دامنه رژیم غذایی که تعیین می‌کنند هر گونه چگونه با مواد آلی، میکروارگانیسم‌ها و سایر جانداران در تعامل است. برخلاف تنوع گونه‌ای که صرفاً شمار گونه‌ها را توصیف می‌کند، تنوع عملکردی مستقیماً به فرآیندهای اکولوژیکی متصل است و نشان می‌دهد هر گروه زیستی چه نقشی در چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی و پویایی خاک دارد. برای نمونه، تجزیه‌کنندگان درشت‌جثه مانند لارو برخی سخت‌بال‌پوشان و موریانه‌ها در تجزیه بقایای درشت گیاهی و افزایش تخلخل خاک نقش کلیدی دارند، در حالی که ریزبندپایان مانند پادمان و کنه‌ها با خرد کردن ذرات آلی و تغذیه از قارچ‌ها، به میکروب‌ها در دسترسی به منابع غذایی کمک کرده و نرخ معدنی‌شدن عناصر را افزایش می‌دهند (شکل ۱). این ترکیب از عملکردهای متنوع موجب افزونگی و هم‌پوشانی نقش‌ها در سامانه خاک می‌شود، به‌گونه‌ای که حذف یک یا چند گونه تأثیر چشمگیری بر عملکرد کلی سیستم ندارد و کارکردهای اساسی حفظ می‌شوند(Laigle, Aubin, & Gravel, 2018) .

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی اهمیت تنوع عملکردی را برای حفظ سلامت و پایداری خاک تأیید کرده‌اند. برای مثال، Morales-Fonseca و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که در زیست‌بوم‌های جنگلی مدیترانه‌ای، تنوع عملکردی بالای ماکروفونا باعث پایداری بیشتر جوامع میکروبی در برابر خشکسالی می‌شود و این ویژگی به حفظ فعالیت‌های تجزیه‌ای و چرخه مواد مغذی در شرایط تنش کمک می‌کند. یافته‌های مشابهی در پژوهش Wang et al. (2024) گزارش شده که در آن، ماکروفونا با تنوع عملکردی بالا سبب افزایش تولید ثانویه زیستی و بهبود تجزیه مواد آلی شده‌اند. در همین راستا، Chen و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های متاژنومی جهانی نشان دادند که در خاک‌هایی با تنوع عملکردی پایین، کارکردهای باریک‌تر (مانند تجزیه نوع خاصی از مواد آلی یا مقاومت در برابر تنش‌های محیطی) آسیب‌پذیرتر بوده و پایداری عملکردی در برابر تغییرات اقلیمی کاهش می‌یابد.

افزون براین، مطالعه‌ای در اندونزی (۲۰۲۲) نشان داد که تبدیل جنگل‌های طبیعی به مزارع مونوکالچر باعث کاهش شدید تنوع عملکردی ماکروفونا و در نتیجه کاهش سرعت تجزیه بقایا و افت کیفیت خاک می‌شود. این یافته اهمیت مدیریت کاربری زمین را در حفظ عملکردهای حیاتی خاک برجسته می‌کند. در مقابل، پژوهش Auclerc et al. (2022) بر آن است که استفاده از صفات عملکردی بندپایان خاک در طراحی طرح‌های احیای اکوسیستم، به انتخاب گونه‌ها و استراتژی‌هایی کمک می‌کند که به‌طور مستقیم کارکردهای کلیدی مانند تهویه، تثبیت کربن و حفظ ساختار خاک را بازسازی نمایند.

همچنین، Si-moussi و همکاران (۲۰۲۵) با مدل‌سازی توزیع گونه‌های کرم خاکی در فرانسه دریافتند که متغیرهای اقلیمی مانند بارش و دمای فصلی، اثرات متفاوتی برگونه‌ها بر اساس صفات عملکردی‌شان دارند؛ گونه‌هایی با ظرفیت پراکنش بالاتر و دامنه تغذیه گسترده‌تر در برابر تغییر اقلیم مقاوم‌تر هستند. این نتایج، نقش تنوع عملکردی را به‌عنوان سپری در برابر اختلالات اقلیمی تقویت می‌کند. از سوی دیگر، پژوهش Zúniga-Gonzalez و Caballero-Hernández (۲۰۲۴) در مزارع موز نشان داد که نوع مدیریت و الگوی بارش سالانه می‌تواند ساختار عملکردی ماکروفونا را دگرگون کند و در نتیجه بر تراکم و کیفیت فیزیکی خاک تأثیر گذارد.

مطالعه‌ای دیگر در مجله Wang et al. (2024) تأکید می‌کند که ترکیب عملکردی ماکروفونا نه‌تنها تجزیه مواد آلی بلکه کارایی چرخه مواد مغذی و حتی بهره‌وری زراعی را نیز ارتقا می‌دهد. این امر در پژوهش Morales-Fonseca و همکاران (۲۰۲۵) نیز

دیده شده است، جایی که تنوع عملکردی بالا با افزایش مقاومت سیستم خاکی در برابر تنش‌های خشکی و حرارتی همراه بوده است. در یک جمع‌بندی فراتر، Laigle و همکاران (۲۰۱۸) با مدل‌سازی شبکه غذایی خاک نشان دادند که حذف گونه‌هایی با صفات عملکردی کلیدی منجر به فروپاشی ارتباطات تروفیکی و افت شدید کارکردهای کلیدی در شبکه می‌شود.

درسطح اکوسیستم‌های کشاورزی، نتایج متعددی تأیید می‌کنندکه تنوع عملکردی با حفظ بهره‌وری، کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی و افزایش تاب‌آوری خاک پیوند مستقیم دارد. برای مثال، در سیستم‌های کشاورزی حفاظتی و احیایی، کاهش شخم، حفظ بقایای گیاهی و استفاده از تناوب‌های متنوع کشت، سبب افزایش تنوع عملکردی ماکروفونا و ارتقای خدمات اکوسیستمی از جمله کنترل آفات، تهویه خاک، و چرخه پایدار مواد غذایی می‌شود (Mamabolo et al., 2024). این شواهد همگی بیانگر آن‌اند که تنوع عملکردی نه‌تنها جنبه‌ای نظری، بلکه ابزاری کاربردی برای طراحی نظام‌های کشاورزی پایدار و احیایی است.

شکل ۱- فواید اعمال کشاورزی بازسازنده برای زیست بوم کشاورزی.

گروه‌های عملکردی حشرات خاک و خدمات زیست‌بومی آن‌ها

حشرات خاکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های زیستی اکوسیستم خاک محسوب می‌شوند که با ایفای نقش‌های عملکردی گوناگون، بر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اثرگذارند. این موجودات از طریق تجزیه مواد آلی، بهبود ساختمان خاک، تنظیم چرخه عناصر غذایی، کنترل زیستی آفات و افزایش پایداری عملکرد محصولات کشاورزی، نقش کلیدی در حفظ سلامت خاک و پایداری اکوسیستم‌های زراعی و طبیعی دارند (Neher, 1999; Frouz, 2018). به‌طور کلی، عملکردهای اصلی حشرات خاک در چهار گروه عمده شامل تجزیه‌کنندگان و ساپروفاژها، زیست‌مهندسان خاک، ریزبندپایان و شکارگران و پارازیتوئیدها طبقه‌بندی می‌شوند که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شوند.

گروه تجزیه‌کنندگان و ساپروفاژها شامل لارو سوسک‌ها، برخی بندپایان خاکزی بوده و نخستین مرحله از چرخه تجزیه مواد آلی را تشکیل می‌دهند. این گروه با خردکردن و تکه‌تکه‌کردن بقایای گیاهی و آلی، سطح تماس مواد آلی را برای فعالیت میکروبی افزایش می‌دهند و از این طریق به تشکیل مواد آلی ذره‌ای کمک می‌کنند (Frouz, 2018). فعالیت مکانیکی آن‌ها موجب انتقال

افقی و عمودی ذرات آلی در خاک شده و اختلاط مواد در لایه‌های مختلف را تسهیل می‌کند. این فرآیندها افزون بر تسریع تجزیه، موجب تحریک فعالیت میکروبی و افزایش بازده تنفس میکروبی در نواحی فعال خاک می‌شوند. در نتیجه، تجزیه‌کنندگان نقش مهمی در چرخه عناصر غذایی و تعادل بین انباشت و معدنی‌سازی مواد آلی ایفا می‌کنند (Neher, 1999).

دسته دوم یعنی زیست‌مهندسان یا زیربناگران خاک (Bioturbators / Ecosystem Engineers) شامل گروه‌هایی از حشرات مانند مورچگان، موریانه‌ها و برخی سوسک‌های حفار هستند که با ایجاد شبکه‌های زیرزمینی، حفر تونل‌ها و اختلاط مکانیکی ذرات، ساختار فیزیکی خاک را دگرگون می‌کنند (Mishra & Singh, 2022). فعالیت آن‌ها از سه مکانیسم عمده پیروی می‌کند: انتقال مواد آلی و معدنی بین لایه‌های مختلف، تحول از طریق تغییر شیمیایی مواد هنگام عبور از دستگاه گوارش و چرای میکروبی که طی آن جمعیت میکروب‌ها و قارچ‌ها کنترل و تعدیل می‌شود (Frouz, J. 2018). نتیجه این فرایندها افزایش تخلخل و نفوذپذیری خاک، بهبود تهویه و رطوبت، تشکیل خاک‌دانه‌های پایدار و در نهایت ارتقای ظرفیت نگهداری آب در خاک است (Mishra, A., & Singh, 2020).

ریزبندپایان (Microarthropods) که عمدتاً شامل پادمان و کنه‌ها هستند، با وجود اندازه کوچک، نقشی بزرگ در پویایی خاک دارند. آن‌ها از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها و مواد آلی ریز تغذیه کرده و از طریق چراگری، به آزادسازی عناصر مغذی و معدنی‌سازی نیتروژن و فسفر کمک می‌کنند (Neher, 1999). این موجودات با تنظیم ترکیب جوامع میکروبی خاک، موجب برقراری تعادل زیستی بین قارچ‌ها، باکتری‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها می‌شوند (Menta & Remelli, 2020). افزون بر آن، ریزبندپایان در مقیاس میکروسکوپی به جابجایی ذرات خاک کمک کرده و از این طریق اختلاط ظریفی را در ساختار خاک پدید می‌آورند که برای پایداری میکروزیستگاه‌های خاکی ضروری است. به‌علاوه، حضور آن‌ها می‌تواند به‌طور غیرمستقیم در تنظیم جمعیت آفات و تحریک مقاومت القایی گیاهان نقش داشته باشد (Neher, 1999).

شکارگران و پارازیتوئیدها گروه دیگری از حشرات خاکی‌اند که با کنترل جمعیت سایر بندپایان، نقش اساسی در تنظیم زنجیره‌های غذایی زیرزمینی دارند. خانواده‌هایی چون کارابیده (Carabidae)، استافی‌لینیده (Staphylinidae) و زنبورهای پارازیتوئید از مهم‌ترین اعضای این گروه هستند. این حشرات از لاروها و پوره‌های آفات تغذیه کرده و موجب کاهش فشار جمعیتی آفات می‌شوند (Menta& Remelli, 2020). علاوه بر کنترل زیستی، فعالیت شکارگران در انتقال انرژی به سطوح بالاتر زنجیره غذایی و در تقویت بازخوردهای زیستی گیاه و خاک مؤثر است (Nawaz & Ahmad, 2014). برخی از آن‌ها با تأثیر بر میکروبیوم ریشه، به‌طور غیرمستقیم مقاومت گیاه را در برابر آفات افزایش می‌دهند. حضور این گروه در خاک‌های زراعی با کاهش خسارت آفات و بهبود عملکرد محصول مرتبط شناخته شده است (Elmquist et al., 2024).

در مجموع، گروه‌های عملکردی مختلف حشرات خاک با تعاملات چندجانبه خود، زیربنای خدمات اکوسیستمی متعددی را فراهم می‌آورند. این خدمات شامل تجزیه و چرخه عناصر غذایی، بهبود ساختمان و تهویه خاک، تنظیم رطوبت، مهار زیستی آفات و در نهایت پایداری عملکرد محصولات زراعی است .(McCary et al., 2021) مطالعات اخیر نشان می‌دهد که فعالیت‌های حفاظت خاک، مانند کاهش شخم، استفاده از پوشش گیاهی دائمی و حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، با افزایش تنوع و فراوانی حشرات خاکی، کارایی این خدمات را تقویت می‌کنند (Nawaz & Ahmad, 2014). از سوی دیگر، آلودگی‌های شیمیایی و تغییرات اقلیمی می‌توانند اثرات منفی بر فعالیت و جمعیت این موجودات داشته باشند (Seidenath et al., 2021). در نهایت، درک دقیق‌تر از تعاملات میان گروه‌های عملکردی حشرات خاک و سازوکارهای اکولوژیکی آن‌ها برای توسعه راهبردهای مدیریت پایدار خاک و حفظ سلامت اکوسیستم‌های زراعی ضروری است (Nie et al., 2025).

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به بررسی نقش عملکردی حشرات خاک و اثرات آن‌ها بر پویایی مواد آلی، چرخه عناصر غذایی، سلامت خاک و پایداری اکوسیستم‌ها پرداخته‌اند. در یکی از جامع‌ترین بررسی‌ها، Neher (1999) نشان داد که ریزبندپایان خاک، به‌ویژه فنرپایان و کنه‌ها، نقشی دوگانه در تجزیه مواد آلی و مهار آفات ایفا می‌کنند. این موجودات با تغذیه از قارچ‌ها، باکتری‌ها و بقایای آلی، فرآیند معدنی‌سازی عناصر را تسریع کرده و هم‌زمان با کنترل جمعیت میکروبی، تعادل اکولوژیکی خاک را حفظ می‌کنند. افزون بر این، فعالیت ریزبندپایان از طریق بهبود تهویه و افزایش سطح تماس ذرات آلی با میکروب‌ها، به شکل‌گیری مواد آلی پایدار و افزایش حاصل‌خیزی خاک منجر می‌شود. در پژوهشی دیگر، Menta & Remelli (2020) به بررسی اهمیت بندپایان خاک به‌عنوان شاخص‌های سلامت خاک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تنوع و فراوانی حشرات خاکی

می‌تواند بازتابی از وضعیت زیست‌محیطی و کیفیت خاک باشد، زیرا این گروه‌ها به شدت نسبت به تغییرات مدیریتی مانند شخم، آلودگی و کاهش رطوبت حساس هستند. در همین راستا، Mishra & Singh, (2020) با تأکید بر نقش کلیدی جانوران خاک، از جمله حشرات، در عملکردهای اساسی خاک همچون تجزیه، تشکیل ساختار خاک و تنظیم چرخه مواد غذایی، بیان کرد که درک روابط بین اجزای زیستی خاک همانند کنار هم قرار دادن قطعات یک پازل پیچیده است که هر جزء در پایداری کل سیستم نقش دارد.

مطالعات McCary et al. (2021) با رویکرد متاآنالیز، ویژگی‌های عملکردی بی‌مهرگان خاکی را به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده چرخه عناصر غذایی معرفی کردند. این پژوهش نشان داد که صفات زیستی مانند اندازه بدن، نرخ تغذیه، و تحرک، تأثیر مستقیمی بر شدت و جهت جریان مواد مغذی در خاک دارند. یافته‌های آنان به این نتیجه منتهی شد که افزایش تنوع عملکردی حشرات خاکی، به‌ویژه در زیست‌بوم‌های کشاورزی، می‌تواند به بهبود پایداری چرخه مواد آلی کمک کند.

در مطالعه‌ای جدیدتر، Frouz (2018) مدلی مفهومی از تأثیر جانوران خاک بر دو مخزن اصلی ماده آلی خاک، یعنی جزء ذره‌ای و جزء معدنی پایدار، ارائه کردند. آنان سه مکانیسم اصلی را در تعاملات بین حشرات و خاک معرفی کردند:انتقال، تحول و چرای میکروبی. این مدل نشان می‌دهد که حشرات خاکی نه‌تنها از طریق تجزیه، بلکه از طریق انتقال عمودی مواد آلی به عمق خاک و دگرگونی شیمیایی آنها، بر پایداری ماده آلی تأثیرگذارند. از منظر بوم‌کشاورزی، Menta & Remelli (2020) در مرور جامعی درباره اکولوژی حشرات خاک و نقش آن‌ها در سلامت گیاهان، بیان کردند که این موجودات از طریق تعامل با ریزسازگان‌های ریشه و بهبود خصوصیات فیزیک وشیمیایی خاک، به سلامت عمومی گیاهان کمک می‌کنند. همچنین تأکید شد که فعالیت حشرات خاکی در زیست‌بوم‌های زراعی، حلقه واسط میان عملکرد خاک و سلامت محصول است.

در حوزه مدیریت آفات، پژوهش Nawaz & Ahmad (2014) نشان داد که روش‌های حفاظت خاک مانند کاهش شخم، حفظ بقایای گیاهی و استفاده از کشت پوششی، می‌توانند با تقویت زیستگاه‌های حشرات مفید، تعادل طبیعی بین آفات و دشمنان طبیعی را حفظ کرده و نیاز به مصرف آفت‌کش‌ها را کاهش دهند. این نتایج بر اهمیت نقش غیرمستقیم حشرات خاکی در کنترل زیستی آفات تأکید دارد. از سوی دیگر، پژوهش‌های مزرعه‌ای Elmquist et al. (2024) تأثیر تنوع جوامع بندپایان خاکی بر بازخوردهای گیاه خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب و فراوانی گونه‌های حشرات خاک می‌تواند رشد گیاه و جذب مواد غذایی را تغییر دهد و در نهایت بر عملکرد محصول تأثیرگذار باشد. این مطالعه ارتباط مستقیمی میان سلامت جامعه خاکی و بهره‌وری محصولات زراعی برقرار کرد. در زمینه اثرات محیطی، Seidenath et al. (2021) نشان دادند که آلودگی‌های شیمیایی خاک، مانند فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها، می‌تواند رفتار و فعالیت مورچگان و سایر حشرات خاک‌زی را مختل کند و از این طریق عملکردهای زیستی مرتبط با ساختاردهی خاک را تضعیف نماید. این یافته‌ها اهمیت مدیریت پایدار خاک و اجتناب از ورود آلاینده‌ها به زیست‌بوم زیرزمینی را برجسته می‌سازد. به‌علاوه، Nie et al. (2025) در پژوهشی نوآورانه اثرافزودن فضولات حشرات به خاک را بررسی کردند و دریافتند که این مواد می‌توانند به بهبود خواص فیزیکی خاک، افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه نیتروژن و فسفرورشد میکروبی خاک منجر شوند. این مطالعه نشان‌دهنده آن است که فرآورده‌های زیستی حاصل از فعالیت حشرات نیز می‌توانند به عنوان منبعی ارزشمند برای بهبود سلامت خاک مورد استفاده قرار گیرند.

تأثیر روش‌های کشاورزی حفاظتی و احیایی بر تنوع عملکردی حشرات خاک

روش‌های کشاورزی حفاظتی و احیایی، از جمله کاهش یا حذف شخم، نگهداری بقایای گیاهی، کشت پوششی و تنوع کشت، نقش مهمی در حفظ تنوع عملکردی حشرات خاک و بهبود خدمات اکوسیستمی خاک ایفا می‌کنند. کاهش شخم باحفظ ساختار خاک و بقایای سطحی، زیستگاه مناسبی برای گونه‌هایی که به لایه‌های سطحی و پناهگاه‌های آلی وابسته‌اند مانند کلِمبولاها، برخی سوسک‌ها و شکارگران فراهم می‌کند. بررسی‌های مرور نظام‌مند نشان داده‌اند که این اقدام معمولاً فراوانی کلی و تنوع عملکردی جانوران خاک را افزایش می‌دهد، هرچند پاسخ‌ها به ویژگی‌های گونه‌ها و شرایط اقلیمی بستگی دارد (Kumar et al., 2023; Baldivieso-Freitas et al., 2018). نگهداری بقایاواستفاده ازگیاهان پوششی باافزایش ورودی آلی و تنوع گیاهی، منابع غذایی و زیستگاه‌های متنوع‌تری برای گروه‌های عملکردی مختلف فراهم می‌آورد. پژوهش‌ها در سامانه‌های احیایی، مانند تناوب برنج–گندم، نشان می‌دهد که این اقدامات باعث افزایش تنوع بندپایان خاکزی و نسبت گروه‌های تجزیه‌کننده وشکارگر می‌شوند

(Angelioudakis et al., 2025; Garba et al., 2024). علاوه بر آن، تناوب و چندکشت در مقیاس زمانی و مکانی، ناهمگونی زیستگاهی راتقویت کرده ومکمل‌بودن عملکردی واستمرارخدمات اکوسیستمی خاک راافزایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که جمعیت شکارگران و تجزیه‌کنندگان موادآلی درچنین سیستم‌هایی بیشتراست (Garba et al., 2023; Seitz et al., 2023).

مصرف کودهای آلی مانندکود دامی و کمپوست فعالیت جوامع تجزیه‌کننده و میکروبی را تحریک کرده ودامنه صفات عملکردی مرتبط با چرخه مواد غذایی را گسترش می‌دهد، در حالی که استفاده بی‌رویه از سموم و کودهای شیمیایی فراوانی و تنوع عملکردی جانوران غیرهدف را کاهش داده و ترکیب زیستی خاک را ساده می‌کند (Luo et al., 2018; Shu et al., 2022). ازاین‌رو، مدیریت تلفیقی تغذیه وآفات در چارچوب کشاورزی حفاظتی و مدیریت احیایی خاک ضروری است.

تنوع عملکردی حشرات خاک باسازوکارهای مختلفی بر عملکرد و تاب‌آوری خاک اثر می‌گذارد. مکمل‌بودن وتقسیم طاقچه‌های بوم‌شناختی باعث می‌شود تجزیه مواد آلی در عمق‌ها و اندازه‌های مختلف به‌صورت پیوسته انجام گیرد. تعاملات صفات عملکردی با میکروارگانیسم‌ها، از طریق تغییر رفتار تغذیه‌ای و حرکتی حشرات، دسترسی به بستر میکروبی و ساختار ریززیستگاه‌ها را تحت تأثیر قرار داده و مسیرهای تجزیه و تثبیت کربن را بهبود می‌بخشد. افزون بر این، اثر بیمه‌ای (Insurance Effect) ناشی از تنوع صفات زیستی، عملکرد سامانه خاک را در برابر اختلال‌هایی مانند خشکی، نوسان دما و شخم‌های گاه‌به‌گاه حفظ کرده و از کاهش ناگهانی کارایی خاک جلوگیری می‌کند(Fonte et al., 2023; Morales-Salmerón et al., 2025).

مطالعات در ایران و چشم انداز آینده

مطالعات انجام‌شده درایران پیرامون نقش حشرات و بندپایان خاک‌زی در فرآیندهای خاکی هنوز محدود است، اما یافته‌های موجود نشان می‌دهد که این گروه‌ها نقش مهمی در پویایی و سلامت خاک‌های ایران ایفا می‌کنند. در پژوهشی درباره جنگل‌های هیرکانی، تنوع و ترکیب جامعه حشرات خاک‌زی در دو تیپ جنگل طبیعی ودست‌کاشت مقایسه شد. نتایج نشان داد که تنوع حشرات خاک در جنگل‌های طبیعی به‌مراتب بیشتر از جنگل‌های دست‌کاشت است و ساختار پوشش گیاهی و کیفیت لاشبرگ، تأثیر مستقیم بر فراوانی و ترکیب جوامع حشرات دارد. این تحقیق تأکید کرد که حفظ تنوع گیاهی برای پایداری جوامع خاک‌زی و عملکردهای اکولوژیک خاک ضروری است (Saberi-Pirooz & Ahmadzadeh, 2024).

در یک مطالعه دیگردرمراتع خشک رودشور ساوه، اثر فعالیت مورچه‌های برداشت‌گراز جنس Messor بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که لانه‌سازی مورچه‌ها موجب تغییر در بافت و افزایش نفوذپذیری خاک، بهبود تهویه و توزیع یکنواخت‌تر مواد آلی شد. این تغییرات، نقش زیست‌مهندسی مورچه‌ها را در تثبیت خاک‌های مناطق خشک و افزایش حاصل‌خیزی نشان داد.(Ghobadi et al. 2016) بررسی دیگری درجنوب‌غرب ایران به مطالعه تنوع کنه‌های Mesostigmata در خاک‌های تیمار شده با انواع کودهای دامی پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که نوع کود مصرفی، ترکیب و فراوانی کنه‌ها را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهدوکودهای آلی غنی‌تر موجب افزایش تنوع و فعالیت زیستی این گروه می‌شوند. این یافته‌ها اهمیت مدیریت موادآلی ورودی به خاک رادر حفظ تنوع و پایداری جوامع میکروآرتروپودها برجسته می‌کند (Farahi et al., 2022). در پژوهشی دیگر، اثر آلودگی‌های شیمیایی بر جوامع پادمان در خاک‌های صنعتی اصفهان بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت فلزات سنگین مانند سرب و روی، تنوع گونه‌ای و تراکم کِلمبولاها به‌طور چشمگیری کاهش یافت. برخی گونه‌ها نسبت به آلودگی مقاوم‌تر بوده و توانستند در شرایط آلوده نیز بقا یابند، در حالی‌که گونه‌های حساس حذف شدند. این تحقیق، کِلمبولاها رابه‌عنوان شاخص زیستی مناسبی برای ارزیابی سلامت خاک‌های آلوده معرفی کرد (Wang et al., 2024).

پژوهش مشابهی در منطقه مشهد نیز به بررسی ارتباط بین غلظت فلزات سنگین و تنوع پادمان پرداخت. نتایج این تحقیق وجود رابطه منفی معنی‌دار بین تراکم برخی عناصر سنگین (مانند آهن و کروم) و غنای جنس‌های پادامن را تأیید کرد و نشان داد که حتی در غلظت‌های نسبتاً پایین نیز ترکیب جامعه فنرپایان به‌طور محسوسی تغییر می‌کند. این یافته‌ها اهمیت فاکتورهای شیمیایی خاک بر زیست‌پویایی بندپایان را دراکوسیستم‌های شهری و کشاورزی ایران نشان می‌دهد (Saberipour et al., 2023).

بهشتی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به بررسی کلی تحقیقات زیستی خاک در ایران پرداختند. این مرور نشان داد که بیشتر مطالعات متمرکز بر میکروارگانیسم‌ها و شاخص‌های زیستی عمومی خاک بوده وتوجه کمتری به گروه‌های عملکردی حشرات خاک (نظیر تجزیه‌کنندگان و زیست‌مهندسان) صورت گرفته است. با این حال، روند اخیر پژوهش‌ها به سمت شناسایی نقش‌های عملکردی دقیق‌تر این گروه‌ها در خاک‌های کشاورزی و جنگلی درحال گسترش است.(Besharati et al., 2017).

در چشم‌انداز آینده کشاورزی ایران، که با چالش‌هایی چون تغییر اقلیم، کاهش منابع آبی، افت کیفیت خاک و وابستگی بالا به نهاده‌های شیمیایی روبه‌روست، درک و بهره‌گیری از تنوع عملکردی حشرات خاک نقشی اساسی در پایداری تولید و مدیریت منابع طبیعی دارد. با وجود پیشرفت‌های اخیر در زمینه بوم‌سنجی خاک، هنوز خلأهای قابل‌توجهی در دانش و داده‌های مرتبط با اکولوژی عملکردی بندپایان خاک در کشور وجود دارد. یکی از مهم‌ترین نیازها، ایجاد پایگاه‌های داده جامع و بومی درباره صفات عملکردی حشرات و سایر بندپایان خاک است. این پایگاه‌ها باید شامل اطلاعات دقیق درباره گروه‌های تغذیه‌ای، توان پراکنش، چرخه زندگی، و ویژگی‌های زیستی گونه‌های غالب در مناطق مختلف کشور باشند تا بتوان از آن‌ها در مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی، ارزیابی سلامت خاک و برنامه‌ریزی مدیریت کشاورزی بهره گرفت. علاوه بر این، انجام آزمایش‌های میدانی و تجربی در شرایط واقعی مزرعه، که در آن حذف یا افزودن گروه‌های عملکردی مختلف مورد بررسی قرار گیرد، برای درک روابط علّی بین تنوع عملکردی و فرایندهای کلیدی خاک مانند تثبیت مواد آلی، تشکیل ساختار خاک و تنظیم جمعیت آفات ضروری است. چنین پژوهش‌هایی می‌توانند مبنای طراحی سامانه‌های مدیریتی متناسب با اقلیم‌ها و خاک‌های متنوع ایران باشند.

نکته مهم دیگر، ضرورت مطالعه هم‌افزایی میان صفات عملکردی حشرات خاک وجوامع میکروبی است. بررسی هم‌زمان ویژگی‌های عملکردی بندپایان و ژن‌های عملکردی میکروب‌ها می‌تواند مسیرهای تثبیت و چرخه کربن در خاک رابادقت بیشتری آشکار سازدوراهکارهایی برای بهبود حاصل‌خیزی طبیعی خاک وکاهش وابستگی به کودهای شیمیایی فراهم آورد. در مجموع، آینده پژوهش وسیاست‌گذاری کشاورزی ایران نیازمند گذار از نگاه صرفاً تولیدمحور به رویکردی بوم‌پایه است که تنوع عملکردی جانداران خاک را به‌عنوان سرمایه زیستی کشور شناسایی و مدیریت کند. چنین نگرشی نه تنها به احیای خاک و پایداری تولید کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان راهبردی ملی در سازگاری با تغییر اقلیم و حفظ منابع طبیعی ایران در دهه‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با مرور وتحلیل شواهد علمی جدید، براهمیت بنیادی تنوع عملکردی حشرات خاک در پایداری واحیای سامانه‌های کشاورزی تأکید می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که نقش حشرات خاک، فراتر از حضور زیستی آنان، در ساختاردهی و پویایی فرآیندهای بوم‌شناختی خاک نهفته است؛ از تجزیه و چرخه عناصر غذایی گرفته تا بهبود ساختمان خاک، کنترل زیستی آفات و حفظ تاب‌آوری اکوسیستم در برابر تنش‌های اقلیمی. در این چارچوب، کشاورزی حفاظتی ومدیریت احیایی خاک به‌عنوان دو راهبردمکمل، زمینه‌ای فراهم می‌سازندتااین تنوع عملکردی بتواند به‌صورت بالفعل در خدمت پایداری تولید قرار گیرد. حذف یا کاهش شخم، استفاده ازبقایای گیاهی وتناوب متنوع کشت، شرایط زیست‌مناسبی برای گروه‌های تجزیه‌کننده، زیست‌مهندس، ریزبندپا و شکارگر فراهم می‌کندوازاین طریق، زنجیره‌های عملکردی خاک را بازسازی می‌نماید.

در ایران، با توجه به شکنندگی اکوسیستم‌های خاکی، فرسایش شدید و افت مواد آلی، تقویت عملکردهای زیستی خاک از طریق مدیریت بوم‌پایه ضرورت دوچندان دارد. شواهد ملی نشان می‌دهد که استفاده از مواد آلی، کاهش شخم و تقویت تنوع گیاهی، موجب افزایش فراوانی و تنوع عملکردی بندپایان مفید و در نتیجه بهبود سلامت خاک شده است. بااین‌حال، هنوز خلأهای قابل‌توجهی در شناخت اکولوژی عملکردی حشرات خاک در شرایط اقلیمی مختلف کشور وجود دارد. پرکردن این شکاف نیازمندایجاد پایگاه‌های داده بومی، توسعه پژوهش‌های میدانی بلندمدت و به‌کارگیری رویکردهای چندرشته‌ای است که پیوند میان صفات عملکردی حشرات، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، و بازده زراعی را روشن سازد.

از منظر سیاستی، گذار به کشاورزی احیایی مستلزم تغییر در نگرش مدیریتی و تصمیم‌گیری است؛ به‌گونه‌ای که خاک نه صرفاً بستر تولید، بلکه یک سامانه زنده و پویا تلقی شود. حفظ و تقویت تنوع عملکردی حشرات خاک می‌تواند به‌عنوان شاخصی

زیستی برای ارزیابی سلامت خاک و کارایی نظام‌های مدیریتی مورداستفاده قرار گیرد.بدین‌ترتیب، کشاورزی ایران می‌تواند با تکیه بر ظرفیت‌های زیستی درون‌زا، گامی اساسی در جهت کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی، بهبود کارایی زیست‌محیطی و دستیابی به پایداری بلندمدت تولید بردارد. در نهایت، می‌توان گفت که تنوع عملکردی حشرات خاک، پیونددهنده زیست‌پویایی وحاصل‌خیزی است؛ نیرویی خاموش اما بنیادین که احیای آن به معنای احیای خاک، و احیای خاک به معنای احیای حیات در کشاورزی است.

فهرست منابع

Angelioudakis, T., Koliopoulos, G., & Stathakis, T. (2025). Effect of Cover Cropping on the Abundance, Community Composition and Functional Diversity of Ground-Dwelling Arthropods in a Mediterranean Olive Grove. Diversity, 17(9), 621.

Ataei, P., Sadighi, H., Aenis, T., Chizari, M., & Abbasi, E. (2021). Challenges of applying conservation agriculture in Iran: an overview on experts and farmers' perspectives. Air, Soil and Water Research, 14, 1178622120980022.

Auclerc, A., Beaumelle, L., Barantal, S., Chauvat, M., Cortet, J., De Almeida, T., ... & Blight, O. (2022). Fostering the use of soil invertebrate traits to restore ecosystem functioning. Geoderma, 424, 116019.

Baldivieso-Freitas, P., Blanco-Moreno, J. M., Gutiérrez-López, M., Peigné, J., Pérez-Ferrer, A., Trigo-Aza, D., & Sans, F. X. (2018). Earthworm abundance response to conservation agriculture practices in organic arable farming under Mediterranean climate. Pedobiologia, 66, 58-64.

Beaumelle, L., Thouvenot, L., Hines, J., Jochum, M., Eisenhauer, N., & Phillips, H. R. (2021). Soil fauna diversity and chemical stressors: a review of knowledge gaps and roadmap for future research. Ecography, 44(6), 845-859.

Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. (2016). An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in ecology & evolution, 31(6), 440-452.

Besharati, H., Aliasgharzad, N., Khavazi, K., & AsadiRahmani, H. (2017). A review on soil biology and biological properties of soils in Iran. Journal of Sol Biology, 4(2), 89-122.

Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V. H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I. F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Tavira, S. (2022). Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review. Soil Systems, 6(4), 87.

Chen, H., Ma, K., Huang, Y., Fu, Q., Qiu, Y., Lin, J., ... & Chen, H. (2022). Lower functional redundancy in "narrow" than "broad" functions in global soil metagenomics. Soil, 8(1), 297-308.

Elmquist, D. C., Adhikari, S., Popova, I., & Eigenbrode, S. D. (2024). Soil arthropod communities collected from agricultural soils influence wheat growth and modify phytohormone responses to aboveground herbivory in a microcosm experiment. Applied Soil Ecology, 194, 105197.

Farahi, S., Shishehbor, P., Nemati, A., & Perotti, M. A. (2022). Mesostigmata diversity by manure type: a reference study and new datasets from southwestern Iran. Experimental and Applied Acarology, 86(4), 517-534.

Fonte, S. J., Hsieh, M., & Mueller, N. D. (2023). Earthworms contribute significantly to global food production. Nature Communications, 14(1), 5713.

Frouz, J. (2018). Effects of soil macro-and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. Geoderma, 332, 161-172.

Garba, I. I., Bell, L. W., Chapman, S. C., Devoil, P., Kamara, A. Y., & Williams, A. (2023). Modelling the impacts of diverse cover crops on soil water and nitrogen and cash crop yields in a sub-tropical dryland. Field Crops Research, 301, 109019.

Garba, I. I., Bell, L. W., Chauhan, B. S., & Williams, A. (2024). Optimizing ecosystem function multifunctionality with cover crops for improved agronomic and environmental outcomes in dryland cropping systems. Agricultural Systems, 214, 103821.

Ghobadi, M., Mahdavi, M., & Agosti, D. (2016). Changes in soil properties by harvester ant's activity (Messor spp.) in Roodshoor Steppe Rangeland of Saveh, Iran. Journal of Rangeland Science, 6(3), 227–236.

Hathaway, M. D. (2016). Agroecology and permaculture: addressing key ecological problems by rethinking and redesigning agricultural systems. Journal of Environmental Studies and Sciences, 6(2), 239-250.

Kumar, R., Choudhary, J. S., Naik, S. K., Mondal, S., Mishra, J. S., Poonia, S. P., ... & Sherpa, S. R. (2023). Influence of conservation agriculture-based production systems on bacterial diversity and soil quality in rice-wheat-greengram cropping system in eastern Indo-Gangetic Plains of India. Frontiers in Microbiology, 14, 1181317.

Laigle, I., Aubin, I., & Gravel, D. (2018). Species traits and community properties explain species extinction effects on detritus-based food webs. arXiv preprint arXiv:1809.03614.

Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. Journal of soil and water conservation, 75(5), 123A-124A.

Luo, G., Li, L., Friman, V. P., Guo, J., Guo, S., Shen, Q., & Ling, N. (2018). Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: A meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry, 124, 105-115.

Mamabolo, E., Pryke, J. S., & Gaigher, R. (2024). Soil fauna diversity is enhanced by vegetation complexity and no-till planting in regenerative agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 367, 108973.

McCary, M. A., & Schmitz, O. J. (2021). Invertebrate functional traits and terrestrial nutrient cycling: Insights from a global meta-analysis. Journal of Animal Ecology, 90(7), 1714-1726.

Menta, C., & Remelli, S. (2020). Soil health and arthropods: From complex system to worthwhile investigation. Insects, 11(1), 54.

Morales-Fonseca, D., Barantal, S., Buscot, F., Hättenschwiler, S., Milcu, A., Nahmani, J., ... & Prada-Salcedo, L. D. (2025). Functional diversity of soil macrofauna may contribute to microbial community stabilization under drought stress. Frontiers in Microbiology, 16, 1597272.

Morales-Fonseca, D., Barantal, S., Buscot, F., Hättenschwiler, S., Milcu, A., Nahmani, J., ... & Prada-Salcedo, L. D. (2025). Functional diversity of soil macrofauna may contribute to microbial community stabilization under drought stress. Frontiers in Microbiology, 16, 1597272.

Morales-Salmerón, L., Fernández-Boy, E., Herrador, B., León, R., & Domínguez, M. T. (2025). Does an enhanced microbial diversity promote the resistance of soil multifunctionality against drought events in amended soils?. Biology and Fertility of Soils, 1-19.

Nawaz, A., & Ahmad, J. N. (2014). Insect pest management in conservation agriculture. In Conservation agriculture (pp. 133-155). Cham: Springer International Publishing.

Neher, D. A. (1999). Soil community composition and ecosystem processes: comparing agricultural ecosystems with natural ecosystems. Agroforestry systems, 45(1), 159-185.

Nie, J. A., Chen, H., Wang, Y., Zhang, D., Wang, Y., Gao, Z., & Wang, N. (2025). Effects of applying locust frass on the soil properties and microbial community in a peach orchard. Microbiology Spectrum, e02470-24.

Parvizi, Y., Heshmati, M., Gheituri, M., & Toohidi, M. (2024). Effects of conservation agriculture technologies on soil macrofauna community attributes in rainfed agriculture system. Agronomy Journal, 116(5), 2229-2241.

Saberi-Pirooz, R., & Ahmadzadeh, F. (2024). Role of Vegetation in Conservation of Soil Biodiversity (Case study: the Hyrcanian Forests). Ethnobiology and Biodiversity Conservation, 1(3), 65-80.

Seidenath, D., Holzinger, A., Kemnitz, K., Langhof, N., Lücker, D., Opel, T., ... & Feldhaar, H. (2021). Individual vs. combined short-term effects of soil pollutants on colony founding in a common ant species. Frontiers in Insect Science, 1, 761881.

Seitz, V. A., Chaparro, J. M., Schipanski, M. E., Wrighton, K. C., & Prenni, J. E. (2023). Cover crop cultivar, species, and functional diversity is reflected in variable root exudation composition. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 71(30), 11373-11385.

Shu, X., He, J., Zhou, Z., Xia, L., Hu, Y., Zhang, Y., ... & Wang, C. (2022). Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis. Science of the Total Environment, 829, 154627.

Si-moussi, S., Thuiller, W., Galbrun, E., Decaëns, T., Gérard, S., Marchán, D. F., ... & Hedde, M. (2025). Digging deeper: deep joint species distribution modeling reveals environmental drivers of Earthworm Communities. arXiv preprint arXiv:2506.13568.

Wang, Z., Xu, J., Xu, Z., & Liu, X. (2024). Functional diversity and secondary production of macrofaunal assemblages can provide insights of biodiversity-ecosystem function relationships. Environmental Sciences Europe, 36(1), 62.

Zhang, J., Van Der Heijden, M. G., Zhang, F., & Bender, S. F. (2020). Soil biodiversity and crop diversification are vital components of healthy soils and agricultural sustainability. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 7(3), 236.

Zúniga-Gonzalez, C. A., & Caballero-Hernández, A. J. (2024). Diversity of functional edaphic macrofauna in Musa acuminata x Musa balbisiana (AAB) agroecosystems. F1000Research, 11, 1300.

The Role of Functional Diversity of Soil Insects in Advancing Conservation Agriculture and Regenerative Soil Management

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

Abstract

Conservation agriculture and regenerative soil management, through practices such as reduced tillage, permanent soil cover, and crop diversification, enhance soil organic matter, improve soil structure, and restore ecological processes. Soil insects, by contributing to organic matter decomposition, soil aeration, nutrient cycling, and biological pest control, play a pivotal role in maintaining the sustainability and health of agroecosystems, particularly under the arid conditions of Iran. The functional diversity of soil insects, reflecting the variability of their biological traits, is crucial for sustaining ecosystem stability, increasing resilience, and enhancing nutrient cycling. Conservation and regenerative practices, including reduced tillage, residue retention, cover cropping, and crop rotation, provide diverse habitats and food resources, thereby promoting functional diversity and strengthening soil ecosystem services. The application of organic amendments alongside reduced chemical inputs stimulates decomposer and microbial activity, further supporting nutrient cycling and soil fertility. Iranian studies indicate that maintaining plant diversity and adopting appropriate soil management practices increase the abundance, biomass, and activity of beneficial soil fauna, leading to improved soil productivity. The future of Iranian agriculture depends on leveraging soil insect functional diversity as a biological asset, utilizing ecosystem-based and data-driven approaches to restore degraded soils, reduce dependence on chemical inputs, and enhance agricultural sustainability.

Keywords: Conservation agriculture, Regenerative soil management, Functional diversity of insects, Soil ecosystem services