دانشگاه جیرفت

Soil and Sustainable Development

Homepage: https://ssd.ujiroft.ac.ir

خـــاک
و توسعه پایدار

Modern Sciences and Technologies in Soil Management for achieving Sustainable Agriculture

Zohreh Alvyar[1]✉, Masoumeh Mostafaei[2]

1- Department of Soil and Water Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ardebil (Moghan), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ardebil, Iran.

2- Department of Soil and Water Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of West Azerbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, West Azerbaijan, Iran.

Email: zohre_alvyar@yahoo.com

Article Info

Article type: Review Article

Article history:

Received: July 05, 2025

Revised: July 17, 2025

Accepted: July 20, 2025

Published: Summer, 2025

Keywords:

Biofertilizers,

Precision agriculture,

Sustainable agriculture,

Nanofertilizers.

ABSTRACT

Modern agriculture is confronted with escalating challenges in securing food, protection, the safeguarding environment, and responsibly managing natural resources. Sustainable agriculture has become a necessity in balancing the increase in production with environmental conservation. Soil management emerges as a vital aspect of this approach, as soil health and productivity directly impact agricultural sustainability. This paper examines the key aspects of sustainable agriculture with a focus on soil management. Considering the growing global population and the need to increase food production, the use of advanced technologies and efficient management practices in agriculture is essential. Land management methods, precision agriculture, nano-fertilizers, biofertilizers, hydrogels, biochar, organic waste recycling, and genetic modification of plants are among the tools that can contribute to sustainable agriculture. Additionally, modeling techniques play an important role in predicting soil conditions and optimizing resource management. Achieving sustainable agriculture demands the intelligent integration of modern technologies at the farm level and coupled with ongoing research to develop holistic and impactful soil management solutions. Multidisciplinary collaboration, the establishment of efficient regulatory frameworks, and continuous investment in research and development play a key role in achieving these goals. By tackling these challenges and fostering innovative soil management practices, we can secure ensure food security for future generations while conserving the planet's invaluable natural resources.

Cite this article: Alvyar, Z. and Mostafaei, M., (2025), Modern sciences and technologies in soil management for achieving sustainable agriculture, Soil and Sustainable Development, 1 (1), 90-108.

DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532638.1019 **© The Author(s). Publisher: The University of Jiroft Press**

خاک و توسعه پایدار
Homepage: https://ssd.ujiroft.ac.ir
دانشگاه جیرفت
خاک و توسعه پایدار

علوم و فناوری‌های نوین در مدیریت خاک برای دستیابی به کشاورزی پایدار

زهره الویار [1] ✉ و معصومه مصطفائی [2]

۱- کارشناس تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایران، ایمیل: zohre_alvyar@yahoo.com

۲- کارشناس تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مروری

تاریخ دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۲۶ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۹ تیر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:
کشاورزی دقیق،
کشاورزی پایدار،
کودهای زیستی،
نانو کودها.

چکیده

کشاورزی مدرن با چالش‌های فزاینده‌ای در زمینه تأمین امنیت غذایی، حفاظت از محیط زیست و مدیریت منابع طبیعی مواجه است. کشاورزی پایدار در تلاش برای متعادل کردن افزایش تولیدات با حفاظت از محیط زیست، به یک ضرورت تبدیل شده است. مدیریت خاک به عنوان یک جنبه حیاتی در این رویکرد ظاهر می‌شود، زیرا سلامت و بهره‌وری خاک تأثیر مستقیمی بر پایداری کشاورزی دارد. این مقاله به بررسی جنبه‌های کلیدی کشاورزی پایدار با تمرکز بر مدیریت خاک می‌پردازد. با توجه به افزایش جمعیت جهان و نیاز به افزایش تولید غذا، استفاده از فناوری‌های نوین و روش‌های مدیریتی کارآمد در کشاورزی ضروری است. روش‌های مدیریت زمین، کشاورزی دقیق، نانوکودها، کودهای زیستی، هیدروژل‌ها، بیوچار، بازیافت زباله‌های زیستی و اصلاح ژنتیکی گیاهان از جمله ابزارهایی هستند که می‌توانند به کشاورزی پایدار کمک کنند. همچنین، تکنیک‌های مدل‌سازی نقش مهمی در پیش‌بینی وضعیت خاک و مدیریت بهینه منابع دارند. برای دستیابی به کشاورزی پایدار، لازم است که از فناوری‌های نوین به طور هوشمندانه در سطح مزرعه بهره‌برداری شود و تحقیقات بیشتری در زمینه مدیریت خاک انجام شود تا بتوان راهکارهای جامع و مؤثر را توسعه داد. همکاری‌های چندرشته‌ای، ایجاد چارچوب‌های نظارتی کارآمد و سرمایه‌گذاری پیوسته در حوزه تحقیق و توسعه، نقش کلیدی در دستیابی به این اهداف ایفا می‌کنند. با تمرکز بر این چالش‌ها و ترویج رویکردهای نوآورانه در مدیریت خاک، می‌توان به تأمین امنیت غذایی نسل‌های آینده کمک کرده و در عین حال از منابع طبیعی ارزشمند حفاظت به عمل آورد.

ارجاع به مقاله: الویار، زهره و مصطفائی، معصومه، (۱۴۰۴)، علوم و فناوری‌های نوین در مدیریت خاک برای دستیابی به کشاورزی پایدار، خاک و توسعه پایدار، ۱ (۱)، ۹۰-۱۰۸.

© نویسندگان ، ناشر: انتشارات دانشگاه جیرفت

DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.532638.1019

مقدمه

قرن‌هاست که کشاورزی به تأمین نیازهای جمعیت و استفاده از تکنیک‌های کشت موجود اختصاص یافته است. جمعیت هر منطقه و به طور کلی جمعیت کره زمین، میزان تقاضا برای غذا، فیبر و سایر مواد را تعیین می‌کند. افزایش جمعیت انسانی و نیازهای آن، تولیدات کشاورزی را افزایش داده است. سازمان ملل پیش‌بینی کرده است که تا سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان به ۹/۸ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت (FAO, 2022)، بنابراین، برای تأمین نیازهای غذای جهانی، تولید باید تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۷۰ درصد افزایش یابد (Yousef et al., 2023; Farmery et al., 2021). در اینجا دومین عامل کلیدی در توسعه کشاورزی که به عنوان فناوری شناخته می‌شود، مورد بحث قرار می‌گیرد: تکنیک‌ها، کوددهی و تجهیزات و ماشین‌آلات کشت در طول زمان بهبود یافته‌اند و امکان پاسخگویی به این چالش را فراهم کرده‌اند (Meemken and Qaim., 2018). با این حال، "انقلاب سبز" قرن گذشته نه تنها به افزایش عملکرد کمک کرد، بلکه باعث تخریب خاک و منابع آب نیز شد (Rossel and Bouma, 2016).

بنابراین، در سال‌های اخیر، محیط زیست به عنوان عامل سوم که تاکنون نادیده گرفته شده، در توسعه کشاورزی مطرح شده است. استفاده بیش از حد از منابع محیطی و آلودگی می‌تواند عوامل محدودکننده‌ای برای توسعه انسانی باشد (Zhao and Zhou, 2021; Jahanger et al., 2022). نوع کشاورزی که نیازهای جمعیت در حال رشد را تأمین کرده و در عین حال از محیط زیست و منابع آن محافظت می‌کند، می‌تواند کشاورزی پایدار نامیده شود (Muhie., 2022). آگاهی روزافزونی وجود دارد که برخی از منابع زمین محدود هستند. این منابع شامل نفت و همچنین خاک، که پایه و اساس کشاورزی به شمار می‌رود، هستند. نقش منحصر به فرد خاک شناخته شده است و تنها به عنوان محیطی برای نگهداری عناصر غذایی شناخته نمی‌شود (Clunes et al., 2022). اخیراً مشخص شده است که علاوه بر کودهای معدنی، روش‌های دیگری نیز برای بهبود حاصلخیزی خاک وجود دارد، به ویژه از آنجا که کودهای سنتزی عوارض جانبی منفی زیست‌محیطی دارند. بنابراین، اهمیت سلامت خاک، فعالیت میکروبی، محتوای ماده آلی خاک، ظرفیت جذب و نسبت صحیح عناصر به عنوان مواردی مهم شناخته می‌شود (Krol et al., 2020; Paungfoo-Lonhienne et al., 2019; Popovic et al., 2020; Dhaliwal et al., 2019). فقط با پیاده‌سازی مدیریت نوآورانه خاک، که به بهینه‌سازی تمامی این عوامل می‌پردازد، کشاورزی مدرن قادر است به عملکردهای بالا دست یابد و در عین حال از محیط زیست محافظت کرده

و به‌طور پایدار از منابع طبیعی بهره‌برداری کند. به‌طور کلی، سیستم‌های کشاورزی نقش مهمی در کاهش منابع طبیعی، کاهش تنوع زیستی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری زمین، تغییرات اقلیمی و آلودگی اکوسیستم‌های زمینی و آبی ایفا می‌کنند (Springmann et al., 2018).

دست‌یابی به کشاورزی پایدار، به ویژه از دیدگاه جهانی، کاری چالش‌برانگیز است. با این حال، آخرین پیشرفت‌های علم و فناوری مفید هستند، مانند کشاورزی دقیق، نانومواد و افزایش دانش در مورد سلامت خاک (Goyal et al., 2023; Zain et al., 2024; Ndaba et al., 2022)، و همچنین مفاهیم جدیدی مانند کشاورزی ارگانیک (Gamage et al., 2023). این‌ها روش‌های جدیدی برای مدیریت خاک هستند که جایگزینی برای کشاورزی سنتی که اغلب خاک را به عنوان یک منبع تجدیدپذیر در نظر می‌گرفت، ارائه می‌دهند. با این وجود، تهدیدهای قابل توجهی مانند تغییرات اقلیمی، محدودیت‌های اقتصادی و فناوری، یا توسعه کشاورزی کندتر در برخی نقاط جهان وجود دارد (Khan et al., 2021; Takahashi et al., 2020). کشاورزی تا حدودی هم قربانی (خشکسالی، رویدادهای آب و هوایی شدید، دمای بالا) و هم عامل (گازهای گلخانه‌ای بالا، تغییر و تخریب زمین) تغییرات اقلیمی است (Jansson and Hofmockel, 2020; Malhi et al., 2021). برخی از فناوری‌ها و راه‌حل‌ها هنوز نیاز به پیشرفت دارند، به‌ویژه در مورد جایگزین‌های کوددهی و حفاظت از گیاهان. کشورهای در حال توسعه برای اجرای راه‌حل‌های جدید کشاورزی به حمایت فناوری و اقتصادی نیاز دارند (Placidi et al., 2021).

عنصر کلیدی در عوامل مؤثر بر توسعه و موانع کشاورزی پایدار، خاک است. از این رو، هدف این مقاله بررسی جنبه‌های کلیدی کشاورزی پایدار مدرن در زمینه مدیریت خاک است. این مقاله به ابزارهایی می‌پردازد که می‌توانند فرآیند انتقال از کشاورزی سنتی به کشاورزی پایدار را تسهیل نمایند. در این بررسی، جدیدترین روندها در زمینه علوم و فناوری‌های نوین مرتبط با مدیریت خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

مدیریت زمین برای حفاظت از خاک

برای کاهش خطر تخریب خاک، حفظ پتانسیل تولید، کاهش سطح نهاده‌های مورد نیاز و پایداری تولید کشاورزی در بلندمدت، اقداماتی مانند شکل‌دهی زمین، دستکاری‌های زراعی، موانع گیاهی، سیستم‌های جایگزین استفاده از زمین و تکنیک‌های برداشت و بازیافت رواناب توسط محققان پیشنهاد شده است. اقدامات زراعی به‌طور کلی در زمین‌های با

شیب ملایم با هدف حداکثر کردن ذخیره آب باران در محل برای اطمینان از حفاظت در برابر فرسایش و دستیابی به بهره‌وری بالاتر توصیه می‌شوند. این اقدامات شامل کشاورزی روی خطوط تراز، کشت مخلوط، کشت نواری، کشت ترکیبی، مدیریت پوشش خاک، مالچ‌پاشی، شیوه‌های شخم و سیستم‌های کشت متنوع است. اقدامات مکانیکی مانند تسطیح زمین، بندکشی، تراس‌بندی، تراس‌بندی حفاظتی و کانال‌کشی خطوط تراز برای حمایت از اقدامات زراعی در شیب‌های تندتر یا در جایی که رواناب زیاد است، با کاهش طول و یا میزان شیب برای پراکنده کردن انرژی آب جاری، اتخاذ می‌شوند (Sharada, 2011).

کشاورزی دقیق و نقش آن در مدیریت خاک

کشاورزی دقیق یا کشاورزی ماهواره‌ای، مفهومی در مدیریت کشاورزی است که بر پایه مشاهده، اندازه‌گیری و واکنش به تغییرات درون مزرعه‌ای و بین مزرعه‌ای در محصولات زراعی و خاک‌ها بنا شده است. تغییرات خاک و محصول معمولاً دارای مؤلفه‌های مکانی و زمانی هستند که باعث می‌شود روش‌های آماری/محاسباتی بسیار پیچیده شوند (Srinivasarao et al., 2015). کشاورزی دقیق پاسخ به تغییرپذیری مکانی خاک است، این روش پارامترهای کشت را بهینه می‌کند تا حداکثر محصول را به دست آورد و در عین حال تأثیرات منفی بر محیط زیست را به حداقل برساند. کشاورزی سنتی از رویکرد یکنواخت در سطح مزرعه استفاده می‌کند، جایی که کل منطقه به عنوان یک واحد همگن از نظر کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شود. این روش ورودی‌ها را به طور یکنواخت توزیع می‌کند و تغییرپذیری مکانی خاک را نادیده می‌گیرد (Argento et al., 2021; Monteiro et al., 2021; Sishodia et al., 2020). در حالی که این رویکرد ارزان و آسان است، اما به طور مؤثر از منابعی مانند خاک، کود و بذر استفاده نمی‌کند و هزینه‌های پنهان اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را به همراه دارد (Bramley et al., 2019; Thompson et al., 2019).

هدف اصلی تحقیقات کشاورزی دقیق، ایجاد یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای مدیریت جامع مزرعه است که به منظور بهینه‌سازی بازده نهاده‌ها و حفظ منابع طراحی شده است. ظهور فناوری‌های مدرن اطلاعات مکانی مانند سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) امکان بررسی تغییرات درون مزرعه‌ای را با توجه به پارامترهای مختلفی مانند خاک، وضعیت محصول و مرحله رشد محصول و سایر عوامل فراهم کرده و در نتیجه، پذیرش کشاورزی دقیق را تسهیل می‌کند. پیشرفت‌های جدید در قالب انواع حسگرها، مکانیسم‌ها، سیستم‌های کنترل و ابزارهای ارتباطی اطلاعات از طریق

سیستم‌های محاسباتی پیشرفته، به پذیرش سریع‌تر شیوه‌های کشاورزی دقیق کمک می‌کنند. بسیاری از یافته‌های تحقیقاتی در زمینه مدیریت خاک با استفاده از تکنیک‌های کشاورزی دقیق نشان دادند که استفاده از فناوری کشاورزی دقیق، مزایای متوسطی در کاهش ریسک در تولید محصولات زراعی دارد. مزایای این کاهش ریسک منجر به افزایش سود در درازمدت می‌شود (Srinivasarao et al., 2015).

قبل از پذیرش تکنیک‌های کشاورزی دقیق در مدیریت خاک، عوامل متعددی باید مورد توجه قرار گیرند. این عوامل شامل میزان تغییرپذیری خاک و محصول بر اساس نیاز کشاورز و سیستم تولید است. فناوری‌های اطلاعات مکانی شامل سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، فناوری‌های نرخ - متغیر و سنجش از دور می‌باشند. اگر این فناوری‌ها به‌طور مؤثر به کار گرفته شوند، می‌توانند هزینه‌های ورودی را کاهش دهند، کارایی استفاده از مواد مغذی را افزایش دهند و انتشار اکسید نیتروژن را کاهش دهند. همچنین، استفاده از تکنولوژی نرخ - متغیر به بهبود کارایی و بهره‌وری محصول کمک می‌کند. با توجه به سناریوهای تغییرات اقلیمی، استراتژی مدیریت خاک شامل نظارت بر چرخه حیات و بهینه‌سازی استفاده از منابع در هر مرحله از زنجیره تولید محصول است. همچنین، باید روش‌های مناسبی برای کاهش اثرات منفی اتخاذ شود. به کارگیری فناوری کشاورزی دقیق می‌تواند به طور کلی خطر آلودگی ناشی از منابع غیرنقطه‌ای برای عناصر مغذی مختلف را کاهش دهد (Srinivasarao et al., 2015).

اگرچه زیرساخت‌های کشاورزی دقیق در ایران قابل قبول است، اما دانش کشاورزان در مورد کشاورزی دقیق چالش اصلی برای به کارگیری این فناوری است. اکثر مزارع در ایران کوچک هستند، بنابراین مزایای سخت کشاورزی دقیق در این مزارع برای توجیه هزینه‌ها کافی نیست. اکثر کشاورزان تحصیلات کافی ندارند و با کشاورزی دقیق آشنایی ندارند. بنابراین آموزش اولین قدم برای بکارگیری این فناوری است. وسعت زمین‌های کشاورزی، دانش کشاورزان و سرمایه‌گذاری کم در بخش کشاورزی از موانع اصلی پذیرش کشاورزی دقیق در ایران است (Bagherpour and Mohamadi, 2014).

استفاده از نانوکودها در بهبود خاک

نانوتکنولوژی یک رویکرد علمی نوآورانه و بین‌رشته‌ای است که شامل طراحی، توسعه و کاربرد مواد و دستگاه‌ها در سطح مولکولی در مقیاس نانومتری می‌باشد، به عبارت دیگر، حداقل یکی از ابعاد آن در اندازه‌ای بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر قرار

دارد (Fakruddin et al. 2012). دستگاه‌های نانو مقیاس "هوشمند" وجود دارند که می‌توانند برای انتقال کارآمد کودها، علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهان و سایر موارد به کار گرفته شوند. حامل‌های نانو مقیاس به گونه‌ای طراحی شده‌اند که می‌توانند ریشه‌های گیاه را به خاک و مواد آلی اطراف متصل کنند؛ بنابراین، منجر به بهبود پایداری در برابر تخریب در محیط می‌شوند و در نهایت مقدار مورد نیاز برای استفاده را کاهش می‌دهند (Ditta 2012; Johnston 2010).

سه نوع نانومواد بسته به منبع آن‌ها وجود دارد: طبیعی، تصادفی و مهندسی (Ruffini and Cremonini 2009). نانومواد‌های طبیعی از آغاز تاریخ زمین وجود داشته‌اند و هنوز هم در محیط زیست یافت می‌شوند (مانند کلوئیدهای خاکی، بقایای رشته‌های DNA). نانومواد‌های تصادفی به عنوان نتیجه‌ای از فرآیندهای صنعتی یا معدنی به وجود می‌آیند. نانومواد‌های مهندسی شده و نانوذرات مهندسی شده شامل (۱) مواد مبتنی بر کربن، (۲) مواد نیمه‌رسانا، فلز و اکسید فلز و (۳) پلیمرها هستند.

چندین کاربرد نانوفناوری در زمینه تولیدات کشاورزی برای کشورهای در حال توسعه پیش‌بینی شده است. این کاربردها عبارتند از: (۱) زئولیت‌های نانویی برای رهایش آهسته و مقدار مؤثر آب و کود برای گیاهان؛ داروهای دامپزشکی؛ نانوکپسول‌ها و سیستم‌های انتقال علف‌کش، (۲) نانوحسگرها برای پایش کیفیت خاک و سلامت گیاهان؛ نانوحسگرها برای تشخیص آفات، (۳) نانومغناطیس‌ها برای حذف آلاینده‌های خاک و (۴) نانوذرات برای آفت‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و دورکننده‌های حشرات جدید (Salamanca–Buentella et al., 2005).

محصور کردن کودها درون نانوذرات به عنوان نانوکود شناخته می‌شود که از طریق آن می‌توان مواد مغذی را به گیاهان ارائه داد (Rai et al., 2012). زمانی که نیاز و هزینه‌های کودهای شیمیایی با نانوکودها مقایسه می‌شود، نانوکودها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر هستند و به مقدار کمتری نیاز دارند. کشاورزان با تجربه دریافته‌اند که جذب نیتروژن عامل اصلی کم بازدهی محصولات است و این موضوع زمینه مناسبی برای توسعه نانوکودها فراهم کرده است. نانوکودها در حالت امولسیون در تمامی لایه‌های آب در شرایط آب‌گرفته به راحتی در دسترس باقی می‌مانند. برای جلوگیری از خروج گاز آمونیاک به محیط، می‌توان از یک لایه بازدارنده یا نانوکلسترها بر روی سطح خاک (که غرقابی است) استفاده کرد. سیستم‌های جدید انتقال مواد مغذی که از قسمت‌های متخلخل نانومقیاس گیاهان استفاده می‌کنند، می‌توانند با افزایش

جذب گیاه، از دست رفتن نیتروژن را کاهش دهند. کودهای محصور شده در نانوذرات، جذب مواد مغذی را افزایش می‌دهند. در حقیقت، توجه به اهمیت کودهای شیمیایی باعث شده است که دولت هزینه‌های این نوع کودها را تحت پوشش یارانه قرار دهد. این اقدام منجر به استفاده نامتعادل از کودها، به ویژه اوره، شده است. همچنین، این وضعیت به آلودگی آب‌های زیرزمینی و کاهش کارایی مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم منجر شده است. برای تأمین غذا برای جمعیت در حال افزایش، نیاز به فناوری جدیدی است که بازدهی زراعی بیشتری را ارائه دهد. این فناوری می‌تواند به مشکلاتی مانند کارایی پایین استفاده از کود، کوددهی نامتعادل، کمبودهای چندمغذی و کاهش ماده آلی خاک پاسخ دهد (Srinivasarao et al., 2015).

متأسفانه، با وجود کارایی فوق‌العاده و سهولت در استفاده، نانوکودها با محدودیت‌ها و چالش‌هایی نیز مواجه هستند، این چالش‌ها شامل فرآیند تولید پیچیده، دشواری در حمل و نقل و کارایی حساس به میزان مصرف می‌باشند که می‌توانند مشکلاتی را به وجود آورند، این موانع باعث تأخیر در استفاده گسترده از نانوکودها در کشاورزی شده‌اند (Kalwani et al., 2022). ارزیابی کارایی و میزان مصرف نانوکودها برای حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان حائز اهمیت می‌باشد (Tripathi et al., 2017). سمیت نانوکودها عمدتاً به نوع، حلالیت، کارایی اتصال و عوامل دیگر بستگی دارد (Aziz et al., 2016).

کودهای زیستی

کودهای زیستی ممکن است جایگزینی ایمن‌تر برای کودهای شیمیایی باشند، زیرا اثرات منفی کودهای شیمیایی را ندارند و آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌کنند. استفاده طولانی‌مدت از کودهای زیستی می‌تواند به طور قابل توجهی حاصلخیزی خاک را افزایش دهد، زیرا این کودها از نظر هزینه مقرون به صرفه و دوستدار محیط زیست هستند (Mahanty, 2017). اکوسیستم خاک از میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده است که به بهبود فعالیت‌های بیولوژیکی کمک می‌کند و به خاک این امکان را می‌دهد که مواد مغذی را برای حمایت از رشد محصولات جابجا کند و پایداری خاک را فراهم کند. میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی مزایای متعددی را ارائه می‌دهند، از جمله تأمین منبع ارزان قیمت مواد مغذی، ترشح هورمون‌های رشد، تأمین ریزمغذی‌ها و توانایی مقابله با اثرات منفی کودهای شیمیایی (Atieno et al., 2020).

کودهای زیستی برای احیای حاصلخیزی خاک ضروری هستند. استفاده مداوم از کودهای شیمیایی می‌تواند به تخریب خاک و کاهش عملکرد محصولات منجر شود. در مقابل، کودهای زیستی توانایی نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهند. این کودها به عنوان فرم طبیعی کودها شناخته می‌شوند و به همین دلیل به طور گسترده‌ای در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروارگانیسم‌هایی که به عنوان کودهای زیستی به کار می‌روند شامل ریزوبیوم، ازوتوباکتر و آزوسپیریلیوم هستند. این میکروارگانیسم‌ها نیتروژن موجود در جو را جذب کرده و آن را به نیترات و نیتریت تبدیل می‌کنند تا در دسترس گیاهان قرار گیرد. همچنین، آن‌ها می‌توانند فسفات‌های نامحلول را به اشکال قابل استفاده برای گیاهان تبدیل کنند. منابع اصلی کودهای زیستی شامل باکتری‌ها، سیانوباکتری‌ها و قارچ‌ها هستند (Malusà et al., 2016).

با توجه به این که کودهای زیستی می‌توانند به کاهش هزینه‌های کود و آلودگی‌های کشاورزی کمک کنند، همچنین به دلیل مقرون به صرفه بودن و سازگاری آن‌ها با محیط زیست، ضرورت انجام تحقیقات بیشتر برای شناسایی سویه‌های بالقوه احساس می‌شود. کنترل کیفیت نامناسب و تأمین ناپایدار، استفاده از این فناوری را محدود می‌کند (Barman et al., 2017). برای دستیابی به کشاورزی پایدار، توسعه کودهای زیستی که از رشد انواع مختلف محصولات حمایت کنند، از اهمیت بالایی برخوردار است (Mazid and Khan, 2014).

هیدروژل برای حفظ رطوبت خاک

به کارگیری پلیمرهای سوپرجاذب در خاک می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود کارایی مصرف آب در محصولات زراعی باشد. در این راستا، تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی برای بررسی ویژگی‌های نگهداری و آزادسازی آب یک پلیمر متشکل از پلی‌اکریل آمید و پتاسیم آکریلات (PAM) انجام شد و این تحقیقات تأثیرات پلیمر بر عملکرد و بهره‌وری آب در کشت گوجه‌فرنگی و ذرت در خاک‌های شنی لومی را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که کاربرد ۲۵ کیلوگرم پلیمر در هکتار با آبیاری متناوب، منجر به افزایش عملکرد گوجه‌فرنگی و بهره‌وری آب به میزان ۲۹۱ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر و صرفه‌جویی ۱۸۰ میلی‌متر در آب آبیاری شد (Reddy et al., 2015). همچنین، در کشت ذرت دیم، کاربرد ۲۵ کیلوگرم پلیمر در هکتار، پژمردگی را ۵-۶ روز به تأخیر انداخت و ۱۶ درصد عملکرد بیشتری نسبت به شاهد داشت (CRIDA

2013-14). با این حال، تعیین مقدار بهینه پلیمر برای بهترین عملکرد تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله آب و هوا، نوع پلیمر، اندازه دانه پلیمر، نوع خاک، دما، گیاه است (Reddy et al., 2015).

اگرچه هیدروژل‌های سوپر جاذب به دلیل توانایی این پلیمرهای جاذب آب در کمک به تأمین مواد مغذی برای خاک، حفظ رطوبت و تسهیل جوانه‌زنی بذرها در کشاورزی کاربردهای گسترده‌ای دارند، اما چالش‌هایی نیز در ارتباط با آن‌ها وجود دارد. برای پیشرفت بیشتر در این زمینه، باید به این چالش‌ها رسیدگی شود. پلیمرهای هیدروژل طبیعی دارای ویژگی‌های جذابی مانند زیست تخریب‌پذیری و فراهمی زیستی هستند؛ با این حال، آنها فاقد استحکام مکانیکی هستند. پیچیدگی ساختاری پلیمرهای طبیعی باعث می‌شود که معمولاً در آب حل نشوند، که این امر تهیه هیدروژل‌های زیستی سازگار را دشوار می‌سازد. هزینه بالای هیدروژل‌ها نیز مانع قابل توجهی به شمار می‌آید. همچنین نگرانی‌هایی در مورد سمیت استفاده از هیدروژل‌ها وجود دارد. همچنین، هیدروژل‌های مشتق شده از مواد شیمیایی معمولاً فاقد حلالیت در آب هستند و تجزیه‌پذیری زیستی ندارند که می‌تواند به آسیب‌های زیست‌محیطی منجر شود. هیدروژل‌های طبیعی نیز به دلیل حساسیت به تغییرات pH و دما، با محدودیت‌هایی در بسته‌بندی و پزشکی زیستی مواجه هستند (Ali et al., 2024). یافته‌های تحقیقاتی نشان می‌دهند که هیدروژل‌ها در مواجهه با تنش‌های شدید غیرزیستی در دماهای مختلف، نتایج امیدوارکننده‌ای در بهبود ویژگی‌های مختلف خاک از خود نشان می‌دهند. این ممکن است شامل بهبود چگالی ظاهری خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و افزایش تخلخل خاک باشد. این اثرات نشان می‌دهند که استفاده از هیدروژل می‌تواند به طور مثبت بر کیفیت و تاب‌آوری خاک در شرایط دشوار تأثیر بگذارد (Nascimento et al., 2021). تحقیقات آتی در مورد مکانیسم‌های خاص زیربنای این پیشرفت‌ها و اثرات بلندمدت برای استفاده از مزایای فناوری هیدروژل در کشاورزی ضروری است (Guilherme et al., 2015).

بیوچار برای نگهداری آب و مواد مغذی خاک

ایده استفاده از بیوچار به عنوان ابزاری برای مقابله با تغییرات اقلیمی و بهبود سلامت خاک یک توسعه جدید است. بیوچار محصول جامد غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی مواد آلی تحت تأمین محدود اکسیژن یا در محیط بدون اکسیژن و در دماهای نسبتاً پایین (<۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) از طریق فرآیندی به نام پیرولیز تولید می‌شود. بیوچار به

عنوان یک منبع امیدوارکننده از کربن تجدیدپذیر و پایدار به منظور افزایش میزان ذخیره‌سازی کربن در خاک به شمار می‌رود (Lehmann et al., 2006; Kurniawan et al., 2023).

روش‌های مختلف کاربرد بیوچار در خاک، بر اساس آزمایش‌های گسترده میدانی، شامل موارد زیر است: مخلوط کردن بیوچار با کود و بذر، کاربرد در سیستم‌های کشت بدون شخم (یا بدون خاک‌ورزی)، اختلاط یکنواخت با خاک، شیارزنی عمیق با گاوآهن، کودپاشی سطحی (یا سرک)، پخش کردن کمپوست و بیوچار بر روی جوی‌های مرتفع، پخش سطحی و مخلوط کردن با خاک، و مخلوط کردن بیوچار با کودهای مایع و فضولات دامی (Nsamba et al., 2015).

مطالعات متعددی به تأثیرات مفید افزودن بیوچار بر بهبود سلامت خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره کرده‌اند (Jeffery et al., 2016; Bai et al., 2023). بیوچار به طور قابل توجهی سلامت خاک را با افزایش زیست‌توده و تنوع میکروبی افزایش می‌دهد (Ling et al., 2022). بیوچار می‌تواند با افزایش زیست‌توده، تنوع، ترکیب جامعه و فعالیت آنزیمی میکروبی خاک، به بهبود جوامع میکروبی خاک کمک کند و این تغییرات می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر عملکردهای خاک داشته باشند (Pokharel et al., 2020). استفاده از بیوچار می‌تواند باعث کاهش تجزیه کربن آلی خاک و افزایش نگهداری بقایای تازه گیاهی شود (Weng et al., 2017). با کاهش معدنی شدن کربن آلی خاک، بیوچار می‌تواند به کاهش انتشار کربن خاک به اتمسفر کمک کند (Zhang et al., 2023) و در نتیجه پدیده تغییر اقلیم و گرمایش زمین کمک نماید.

مخلوط کردن بیوچار با خاک، خصوصیات فیزیکی خاک مانند چگالی ظاهری، مقاومت نفوذ، ساختار، دانه‌بندی درشت، پایداری خاک، توزیع و چگالی اندازه منافذ را تغییر می‌دهد که پیامدهای منطقی در تهویه خاک، قابلیت خیس‌شوندگی خاک، نفوذ آب، ظرفیت نگهداری آب، رشد گیاه و قابلیت کارایی خاک دارد. از جمله مزایای مثبت در خصوصیات شیمیایی خاک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. نگهداری مواد مغذی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و راندمان استفاده از مواد مغذی، کاهش اسیدیته خاک و افزایش تعداد میکروب‌های مفید خاک. بیوچار پتانسیل مقابله با تغییرات اقلیمی را دارد، زیرا کربن ثابت موجود در زیست‌توده خام که در غیر این صورت به گازهای گلخانه‌ای تجزیه می‌شد، برای سال‌ها در خاک ذخیره می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از مواد آلی مازاد برای تولید بیوچار، نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه ذخیره کربن به همراه داشته است (Srinivasarao et al., 2015).

با توجه به مطالعات محدود در مورد استفاده از بیوچار در انواع مختلف خاک، مناطق اقلیمی و شرایط استفاده از زمین، پیش‌بینی اثرات زراعی آن دشوار است. به دلیل ماهیت ناهمگن بیوچار، هزینه تولید آن برای تحقیق و کاربرد در مزرعه تا زمانی که تأسیسات پیرولیز در مقیاس تجاری ایجاد شوند، احتمالا محدودیت‌زا خواهد بود. برخی از موانع عملی استفاده از بیوچار در سیستم‌های کشاورزی عبارتند از: ماندگاری دائمی آن در خاک پس از کاربرد، عدم دسترسی به بیوچار کافی، افزایش فرسایش بادی در سطح خاک به دلیل خشک بودن بیوچار، پاسخ جامعه محلی به پذیرش سیستم‌های بیوچار، عدم دسترسی به نیروی کار کشاورزی، بالا بودن دستمزد جمع‌آوری و پردازش بقایای گیاهی، کمبود ماشین‌آلات مناسب کشاورزی برای بازیافت درون مزرعه‌ای بقایای گیاهی و حمایت ناکافی سیاستی برای بازیافت بقایای گیاهی (Srinivasarao et al., 2013; Venkatesh et al., 2015).

بازیافت زباله‌های زیستی

تحقیقات در زمینه کمپوست نشان داده است، در حالی که تلقیح میکروبی در مخلوط فضولات گاوی در مقادیر زیاد کافی است، استفاده از تسریع‌کننده‌های کمپوست که حاوی تلقیح‌کننده‌های تجزیه‌کننده سلولز مانند *Trichoderma viride*، *Trichurus spiralis*، *Aspergillus niger* و *Paecilomyces fusisporus* می‌تواند با مزیت همراه باشد. کمپوست‌های غنی‌شده که با منابع معدنی مانند سنگ فسفات، پیریت، میکا اصلاح شده‌اند، و با میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات، تثبیت‌کننده‌های نیتروژن و ریزوباکتری‌ها که به رشد گیاه کمک می‌کنند، مانند Bacillus، Aspergillus، Azotobacter و Azospirillium در مرحله مزوفیلی تلقیح شده‌اند. این کمپوست‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نشان داده‌اند که منجر به صرفه‌جویی در کود، بهبود کارایی استفاده از مواد مغذی و بهبود کیفیت محصول می‌شوند. در این زمینه، تولید زباله‌های جامد شهری به سرعت در حال افزایش است و نیاز به ترویج فناوری‌های موجود برای تولید کمپوست با کیفیت به وضوح احساس می‌شود. افزایش هزینه‌های نیروی کار و تلقیح‌کننده‌های با کیفیت از عوامل کلیدی برای پذیرش این فناوری هستند (Manna et al., 2014).

اصلاح ژنتیکی گیاهان برای افزایش حفاظت از خاک و جذب مواد مغذی

مهندسی ژنتیک یا اصلاح ژنتیکی به عنوان یک روش مؤثر در تقویت تلاش‌های حفاظت از خاک شناخته می‌شود، زیرا می‌تواند به بهبود ساختار خاک، کاهش فرسایش و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی کمک کند. جذب مواد مغذی گیاه نیز به عنوان یک عامل کلیدی در بهره‌وری محصول و کیفیت تغذیه اهمیت دارد (Lebedev et al., 2021;

Banerjee et al., 2023). با این حال، جذب ناکارآمد مواد مغذی خاک می‌تواند به کاهش عملکرد محصول منجر شود و استفاده بیش از حد از کودها نیز می‌تواند به آلودگی محیط زیست منجر شود (Godebo et al., 2021; Govindasamy et al., 2023; Kumar et al., 2023). روش‌های مهندسی ژنتیک که بر بهبود مکانیسم‌های جذب مواد مغذی، از جمله بهینه‌سازی ساختار ریشه و فرآیندهای انتقال مواد مغذی تمرکز دارند، می‌توانند به افزایش کارایی جذب مواد مغذی کمک کنند و در عین حال اثرات منفی زیست‌محیطی کشاورزی را کاهش دهند. همچنین، عوامل ژنتیکی، فیزیولوژیکی و محیطی در فرآیند پیچیده استفاده گیاهان از مواد مغذی نقش دارند. عملکرد محصولات زراعی به دلیل استفاده ناکارآمد از مواد مغذی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که این موضوع می‌تواند منجر به تخریب خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش رواناب مواد مغذی شود (Sadikiel Mmbando and Ngongolo, 2024).

اصلاح ژنتیکی گیاهان، گونه‌هایی را تولید می‌کند که ویژگی‌هایی دارند که به حفظ و بهبود سلامت خاک کمک می‌کند و به طرز قابل توجهی روش‌های حفاظت از خاک را تقویت می‌نماید. به عنوان مثال، گیاهان اصلاح شده ژنتیکی می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که سیستم‌های ریشه‌ای قوی‌تر و عمیق‌تری داشته باشند، که این امر به بهبود نگهداری خاک و کاهش فرسایش آن کمک می‌کند. بنابراین، اصلاح ژنتیکی به عنوان ابزاری مؤثر، از تکنیک‌های سنتی حفاظت از خاک پشتیبانی کرده و راهکارهای نوآورانه‌ای برای حفظ تنوع زیستی گیاهی و تعادل اکولوژیکی ارائه می‌دهد. در نتیجه، حفاظت از خاک برای ترویج کشاورزی پایدار، حفظ مناطق طبیعی و کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی ضروری است. با به کارگیری روش‌های حفاظت از خاک، می‌توانیم از پایداری بلندمدت سیستم‌های کشاورزی اطمینان حاصل کرده و منابع خاک را برای نسل‌های آینده حفظ کنیم. اگرچه تکنیک‌های اصلاح ژنتیکی برای حفظ خاک، جذب و مواد مغذی و بهره‌برداری از آن‌ها در حال محبوبیت و پیشرفت هستند، اما هنوز کمبود بررسی‌های جامع وجود دارد که این سه جنبه مهم را به هم پیوند دهد (Lebede et al., 2021; Rebello et al., 2021; Sathee et al., 2022). تحقیقات بیشتری نیز لازم است تا تعادل‌ها و هم‌افزایی‌های ممکن بین مداخلات ژنتیکی مختلف در سیستم‌های خاک - گیاه را بررسی کند. پر کردن این شکاف می‌تواند راهنمایی برای تلاش‌های تحقیقاتی آینده در این زمینه باشد و درک ما از نقش اصلاح ژنتیکی در کشاورزی پایدار را ارتقا دهد. همچنین توجه به پیامدهای پایداری بلندمدت، چالش‌های نظارتی و مسائل اخلاقی مرتبط با این فناوری‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در آینده، استفاده مسئولانه و اخلاقی کشاورزی

اصلاح‌شده ژنتیکی به همکاری‌های چندرشته‌ای و چارچوب‌های نظارتی قوی وابسته خواهد بود (Sadikiel Mmbando and Ngongolo, 2024).

نقش تکنیک‌های مدل‌سازی در مدیریت خاک

مدل‌سازی به منظور پیش‌بینی وضعیت خاک، عملکرد محصول و ارزیابی تأثیرات مدیریت خاک به کار می‌روند. این ابزارها موجب تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر، کاهش خطاها و بهبود کارایی در مدیریت خاک می‌شوند. تکنیک‌های مدل‌سازی با ارائه چارچوب‌های منظم برای تحلیل و مدیریت منابع، به طور چشمگیری حوزه حفاظت از خاک و آب را دگرگون کرده‌اند. این تکنیک‌ها به ما این امکان را می‌دهند که تأثیر عوامل مختلف را شبیه‌سازی کنیم، سناریوهای آینده را پیش‌بینی کنیم و کارایی استراتژی‌های حفاظتی مختلف را مورد آزمایش قرار دهیم. از طریق مدل‌سازی، می‌توانیم میزان فرسایش را اندازه‌گیری کنیم، تأثیر تغییرات کاربری زمین را بررسی کنیم، تخصیص منابعی مانند آب، کود و آفت‌کش‌ها را بهینه‌سازی کنیم و بدین ترتیب عملکرد محصولات را به حداکثر رسانده و هزینه‌های ورودی را به حداقل برسانند و سیستم‌های هشدار اولیه برای بلایای طبیعی مانند سیل و رانش زمین ایجاد کنیم. همچنین، مدل‌سازی به ما در ارزیابی سلامت خاک و درک تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب و خاک کمک می‌کند. اگرچه تکنیک‌های مدل‌سازی به عنوان ابزارهای مؤثری برای حفاظت از خاک و آب شناخته می‌شوند، اما با چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز مواجه هستند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به دسترسی به داده‌ها، دقت مدل و موانع اجرایی اشاره کرد که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهند شد (Pandey et al., 2024).

۱- دسترسی به داده‌ها

کیفیت داده‌ها: دقت و قابلیت اطمینان نتایج مدل‌سازی به شدت به کیفیت داده‌های ورودی بستگی دارد. در بسیاری از مناطق، داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک، کاربری زمین و آب و هوا محدود یا قدیمی است. داده‌های نادرست می‌توانند به پیش‌بینی‌های ناقص مدل منجر شوند و مانع برنامه‌ریزی مؤثر حفاظت شود.

دسترسی به داده‌ها: حتی در مواقعی که داده‌ها موجود هستند، ممکن است به دلیل حفظ محیط زیست و همچنین به منظور حمایت از محققان، دسترسی به آن‌ها ممکن نباشد. دسترسی به داده‌های مکانی با کیفیت و به‌روز معمولاً محدود است و این موضوع می‌تواند توسعه و اعتبارسنجی مدل‌ها را با چالش‌هایی مواجه کند.

۲- دقت مدل

ساده‌سازی‌ها و فرضیات: بسیاری از تکنیک‌های مدل‌سازی سیستم‌های طبیعی پیچیده را با انجام فرضیات ساده می‌کنند. در حالی که این کار اغلب به دلایل عملی ضروری است، می‌تواند منجر به نادرستی در پیش‌بینی رفتار واقعی شود. به عنوان مثال، فرضیات درباره یکنواختی در ویژگی‌های خاک ممکن است در چشم‌اندازهای متنوع برقرار نباشد.

پارامترگذاری: تعیین پارامترهای مدل می‌تواند کار دشواری باشد، زیرا این مقادیر ممکن است در مناطق و شرایط مختلف متفاوت باشند. نادرست بودن پارامترگذاری می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی در نتایج مدل شود.

عدم قطعیت: مدل‌ها اغلب به دلیل پیچیدگی سیستم‌های طبیعی و محدودیت‌های داده‌های موجود، دارای عدم قطعیت ذاتی هستند. شناسایی و اندازه‌گیری این عدم قطعیت برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه بسیار مهم است.

۳- موانع اجرایی

محدودیت‌های منابع: اجرای اقدامات و تدابیر حفاظتی بر اساس نتایج مدل‌سازی می‌تواند نیازمند منابع زیادی باشد. بسیاری از مالکان زمین و جوامع ممکن است از نظر مالی و فنی توانایی لازم برای پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی را نداشته باشند.

عوامل رفتاری: متقاعد کردن مالکان زمین و جوامع برای پذیرش شیوه‌های حفاظتی بر اساس نتایج مدل‌سازی می‌تواند چالش‌برانگیز باشد. عوامل فرهنگی، اقتصادی و اجتماعی می‌توانند بر تمایل به تغییر شیوه‌های موجود مدیریت زمین تأثیر بگذارند.

موانع سیاست‌گذاری و قانونی: در برخی موارد، سیاست‌ها و مقررات موجود ممکن است مانع اجرای شیوه‌های حفاظت شود. موانع قانونی و مسائل مربوط به مالکیت زمین می‌توانند تلاش‌ها برای اعمال تغییرات را پیچیده کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز به تولید غذای بیشتر، کشاورزی پایدار به عنوان یک ضرورت مطرح شده است. در این میان، مدیریت خاک به عنوان یکی از ارکان اصلی کشاورزی پایدار، نقش حیاتی ایفا می‌کند. این بررسی بر اهمیت مدیریت نوآورانه خاک تأکید کرده است و تکنیک‌ها و فناوری‌های متعددی را برای تسهیل انتقال از

کشاورزی سنتی به کشاورزی پایدار ارائه داده است. کشاورزی دقیق، نانوکودها، کودهای زیستی، هیدروژل‌ها، بیوچار، بازیافت زباله‌های زیستی و اصلاح ژنتیکی گیاهان به عنوان ابزارهای امیدوارکننده‌ای معرفی شده‌اند که می‌توانند حاصلخیزی خاک را افزایش داده، استفاده از منابع را بهینه کرده و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. با این حال، چالش‌های متعددی، از جمله محدودیت‌های اقتصادی و فناوری، موانع نظارتی و نیاز به آموزش و آگاهی، مانع از پذیرش گسترده این روش‌ها می‌شوند. تغییرات اقلیمی نیز به عنوان یک تهدید قابل توجه مطرح شده است که سیستم‌های کشاورزی را تحت فشار قرار داده و نیاز به راه‌حل‌های سازگاری را برجسته می‌کند. برای دستیابی به کشاورزی پایدار، همکاری‌های چندرشته‌ای، چارچوب‌های نظارتی قوی و سرمایه‌گذاری مداوم در تحقیق و توسعه ضروری است. با پرداختن به این چالش‌ها و ترویج شیوه‌های نوآورانه مدیریت خاک، می‌توانیم از امنیت غذایی برای نسل‌های آینده اطمینان حاصل کرده و در عین حال از منابع طبیعی ارزشمند خود محافظت کنیم.

منابع مورد استفاده

Ali, K., Asad, Z., Agbna, G. H., Saud, A., Khan, A., & Zaidi, S. J. (2024). Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture. *Agronomy*, *14*(12), 2815.

Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., & Liebisch, F. (2021). Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. *Precision Agriculture*, *22*, 364-386.

Atieno, M., Herrmann, L., Nguyen, H. T., Phan, H. T., Nguyen, N. K., Srean, P., Than, M. M., Zhiyong, R., Tittabutr, P., Shutsrirung, A., Bräu, L., & Lesueur, D. (2020). Assessment of biofertilizer use for sustainable agriculture in the Great Mekong Region. *Journal of environmental management*, *275*, 111300.

Aziz, N., Pandey, R., Barman, I., & Prasad, R. (2016). Leveraging the attributes of Mucor hiemalis-derived silver nanoparticles for a synergistic broad-spectrum antimicrobial platform. *Frontiers in microbiology*, *7*, 1984.

Bagherpour, H., & Mohamadi, H. (2014). Challenges and prospects of precision agriculture in Iran. *International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends*, *17*(1), 1-8.

Bai, J., Song, J., Chen, D., Zhang, Z., Yu, Q., Ren, G., Han, X., Wang, X., Ren, Ch., Yang, G., Wang, X., & Feng, Y. (2023). Biochar combined with N fertilization and straw return in wheat-maize agroecosystem: Key practices to enhance crop yields and minimize carbon and nitrogen footprints. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *347*, 108366.

Banerjee, S., Roy, P., Nandi, S., & Roy, S. (2023). Advanced biotechnological strategies towards the development of crops with enhanced micronutrient content. *Plant Growth Regulation*, *100*(2), 355-371.

Barman, M., Paul, S., Choudhury, A. G., Roy, P., & Sen, J. (2017). Biofertilizer as prospective input for sustainable agriculture in India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(11), 1177-1186.

Bramley, R. G. V., Ouzman, J., & Gobbett, D. L. (2019). Regional scale application of the precision agriculture thought process to promote improved fertilizer management in the Australian sugar industry. *Precision Agriculture*, *20*, 362-378.

Clunes, J., Valle, S., Dörner, J., Martínez, O., Pinochet, D., Zúñiga, F., & Blum, W. E. (2022). Soil fragility: A concept to ensure a sustainable use of soils. *Ecological Indicators*, *139*, 108969.

CRIDA (2013-14) Annual Report 2013-14, *Central Research Institute for Dryland Agriculture*, Hyderabad, India, pp 197.

Dhaliwal, S. S., Naresh, R. K., Mandal, A., Singh, R., & Dhaliwal, M. K. (2019). Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, *1*, 100007.

Ditta, A. (2012). How helpful is nanotechnology in agriculture? *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, *3*(3), 033002.

Fakruddin, M., Hossain, Z., & Afroz, H. (2012). Prospects and applications of nanobiotechnology: a medical perspective. *Journal of nanobiotechnology*, *10*, 1-8.

FAO. (2022). The Future of Food and Agriculture—Drivers and Triggers for Transformation. *FAO*.

Farmery, A. K., Allison, E. H., Andrew, N. L., Troell, M., Voyer, M., Campbell, B., Eriksson H., Fabinyi M., Song, A. M., & Steenbergen, D. (2021). Blind spots in visions of a "blue economy" could undermine the ocean's contribution to eliminating hunger and malnutrition. *One Earth*, *4*(1), 28-38.

Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., & Merah, O. (2023). Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, *1*(1), 100005.

Godebo, T., Laekemariam, F., & Loha, G. (2021). Nutrient uptake, use efficiency and productivity of bread wheat (Triticum aestivum L.) as affected by nitrogen and potassium fertilizer in Keddida Gamela Woreda, Southern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, *10*(1), 12.

Govindasamy, P., Muthusamy, S. K., Bagavathiannan, M., Mowrer, J., Jagannadham, P. T. K., Maity, A., & Tiwari, G. (2023). Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1121073.

Goyal, V., Rani, D., Ritika, Mehrotra, S., Deng, C., & Wang, Y. (2023). Unlocking the potential of nano-enabled precision agriculture for efficient and sustainable farming. *Plants*, *12*(21), 3744.

Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, *72*, 365-385.

Jahanger, A., Usman, M., Murshed, M., Mahmood, H., & Balsalobre-Lorente, D. (2022). The linkages between natural resources, human capital, globalization, economic growth, financial development, and ecological footprint: The moderating role of technological innovations. *Resources policy*, *76*, 102569.

Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, *18*(1), 35-46.

Jeffery, S., Verheijen, F. G., Kammann, C., & Abalos, D. (2016). Biochar effects on methane emissions from soils: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, *101*, 251-258.

Johnston, C. T. (2010). Probing the nanoscale architecture of clay minerals. *Clay Minerals*, *45*(3), 245-279.

Kalwani, M., Chakdar, H., Srivastava, A., Pabbi, S., & Shukla, P. (2022). Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. *Chemosphere*, *287*, 132107.

Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, *13*(9), 4883.

Krol, D. J., Forrestal, P. J., Wall, D., Lanigan, G. J., Sanz-Gomez, J., & Richards, K. G. (2020). Nitrogen fertilisers with urease inhibitors reduce nitrous oxide and ammonia losses, while retaining yield in temperate grassland. *Science of the Total Environment*, *725*, 138329.

Kumar, S., Sharma, S. K., Dhaka, A. K., Bedwal, S., Sheoran, S., Meena, R. S., Jangir, C. K., Kumar D, Kumar R, Jat R D, Meena, A. K., Gaber, A ... & Hossain, A. (2023). Efficient nutrient management for enhancing crop productivity, quality and nutrient dynamics in lentil (Lens culinaris Medik.) in the semi-arid region of northern India. *PLoS One*, *18*(2), e0280636.

Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Liang, X., Goh, H. H., Gikas, P., Chong, K. K., & Chew, K. W. (2023). Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *Journal of environmental management*, *332*, 117429.

Lebedev, V. G., Popova, A. A., & Shestibratov, K. A. (2021). Genetic engineering and genome editing for improving nitrogen use efficiency in plants. *Cells*, *10*(12), 3303.

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 11(2), 395-419.

Ling, L., Luo, Y., Jiang, B., Lv, J., Meng, C., Liao, Y., & Xu, J. (2022). Biochar induces mineralization of soil recalcitrant components by activation of biochar responsive bacteria groups. *Soil Biology and Biochemistry*, *172*, 108778.

Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 3315-3335.

Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, *13*(3), 1318.

Malusà, E., Pinzari, F., & Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: challenges to improve crop production. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 2: Functional Applications*, 17-40.

Manna, M. C., Sahu, A., Singh, D. A., & Rao, A. S. (2014). *Quality Compost Production from Solid Urban Waste: For Enhancing Crop Productivity*. Indian Institute of Soil Science.

Mazid, M., & Khan, T. A. (2014). Future of bio-fertilizers in Indian agriculture: an overview. *International Journal of Agricultural and Food Research*, *3*(3), 10-23.

Meemken, E. M., & Qaim, M. (2018). Organic agriculture, food security, and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, *10*(1), 39-63.

Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review. *Animals*, *11*(8), 2345.

Muhie, S. H. (2022). Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, *10*, 100446.

Nascimento, C. D. V., Mota, J. C. A., Nascimento, Í. V., da Silva Albuquerque, G. H., Simmons, R. W., dos Santos Dias, C. T., & Costa, M. C. G. (2021). Temperature limitations in the use of hydrogels on leptosols in a semi-arid region of Brazil. *Geoderma Regional*, *26*, e00407.

Ndaba, B., Roopnarain, A., & MAAZA, M. (2022). Biosynthesized metallic nanoparticles as fertilizers: An emerging precision agriculture strategy. *Journal of Integrative Agriculture*, *21*(5), 1225-1242.

Nsamba, H. K., Hale, S. E., Cornelissen, G., & Bachmann, R. T. (2015). Sustainable technologies for small-scale biochar production—a review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, *5*(1), 10-31.

Pandey, y., Dadhich, S., Faisal, S. h., Ali, M. (2024). Modeling Techniques used in Soil and Water Conservation. In book: Advanced Innovative Technologies in Agricultural Engineering for Sustainable Agriculture, Publisher: *AkiNik Publications* pp 63-86.

Paungfoo-Lonhienne, C., Redding, M., Pratt, C., & Wang, W. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria increase the efficiency of fertilisers while reducing nitrogen loss. *Journal of environmental management*, *233*, 337-341.

Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F., & Scorzoni, A. (2021). Monitoring soil and ambient parameters in the iot precision agriculture scenario: An original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. *Sensors*, *21*(15), 5110.

Pokharel, P., Ma, Z., & Chang, S. X. (2020). Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra-and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. *Biochar*, *2*, 65-79.

Popovic, T., Mijovic, S., Pajovic., Š´cepanovic, R., Rai˘cevic, D. (2020) Analysis of Possibilities of Reducing the Quantity of Mineral Fertilizer Application Using Different Types of Organic Fertilizers in Cardinal Grape Variety. *Agriculture and Forestry,* 66(1), 261-268.

Rai, V., Acharya, S., & Dey, N. (2012). Implications of nanobiosensors in agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology,* 3, 315-324.

Rebello, S., Nathan, V. K., Sindhu, R., Binod, P., Awasthi, M. K., & Pandey, A. (2021). Bioengineered microbes for soil health restoration: present status and future. *Bioengineered*, *12*(2), 12839-12853.

Reddy, K. S., Srinivas, K., Reddy, A. G. K., Sharma, K. L., Indoria, A. K., Reddy, K. S., Grover, M., Srinivas, B., & Venkateswarlu, B. (2015). Water absorption and release characteristics of a polymer and its effect on available water content, tomato (Lycopersicon esculentum) productivity and water use efficiency in a semi-arid sandy loam soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, *63*(4), 384-393.

Rossel, R.A.V., & Bouma, J. (2016). Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agricultural systems*, *148*, 71-74.

Ruffini, C.M. & Cremonini, R. (2009) Nanoparticles and higher plants. *Caryologia* 62,161-165.

Sadikiel Mmbando, G., & Ngongolo, K. (2024). The recent genetic modification techniques for improve soil conservation, nutrient uptake and utilization. *GM Crops & Food*, *15*(1), 233-247.

Salamanca-Buentello, F., Persad, D. L., Court, E. B., Martin, D. K., Daar, A. S., & Singer, P. A. (2005). Nanotechnology and the developing world. *PLoS Medicine*, *2*(5), e97.

Sathee, L., Jagadhesan, B., Pandesha, P. H., Barman, D., Adavi B, S., Nagar, S., Krishna, G. K., Tripathi , S., Jha, Sh. K., & Chinnusamy, V. (2022). Genome editing targets for improving nutrient use efficiency and nutrient stress adaptation. *Frontiers in Genetics*, *13*, 900897.

Sharada, V.N. (2011). Soil and water conservation measures for checking land degradation in India. In (Mishra PK, Osman M, Satendra and Venkateswarlu B Eds). Techniques of water conservation and rainwater harvesting for drought management, SAARC Training Program, 18-29 July, 2011, Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad, India, p 714.

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote sensing*, *12*(19), 3136.

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Rockström, J., & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, *562*(7728), 519-525.

Srinivasarao, C. H., Lal, R., Rao, D. L. N., Sahrawat, K. L., Gupta, R. K., Balloli, S. S., & Srinivas, K. (2015). Technology frontiers for soil management. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 294-309.

Srinivasarao, C., Gopinath, K. A., Venkatesh, G., Dubey, A. K., Wakudkar, H., Purakayastha, T. J., Pathak, H., Pramod, J., Lakaria, B. L., Rajkhowa, D. J., Sandip, M., Jeyaraman, S., Venkateswarlu, B. & Sikka, A. K. (2013). Use of biochar for soil health management and greenhouse gas mitigation in India: Potential and constraints. *Central Research Institute for Dryland Agriculture. Hyderabad, Andhra Pradesh*.

Takahashi, K., Muraoka, R., & Otsuka, K. (2020). Technology adoption, impact, and extension in developing countries' agriculture: A review of the recent literature. *Agricultural Economics*, *51*(1), 31-45.

Thompson, N. M., Bir, C., Widmar, D. A., & Mintert, J. R. (2019). Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, *51*(1), 142-163.

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Srivastava, P. K., Singh, V. P., Singh, S., & Chauhan, D. K. (2017). Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNps)-induced phytotoxicity in Pisum sativum seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, *110*, 167-177.

Venkatesh, G., Ch, S. R., Gopinath, K. A., & Sammi Reddy, K. (2015). Low-cost portable kiln for biochar production from on-farm crop residue. *Indian farming*, *64*(12), 9-12.

Weng, H., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Tavakkoli, E., Joseph, S. D., Macdonald, L. M., Rose, T. J., Rose, M. T., Kimber, S., Morris, S., Cozzolino, D., Araujo, J., Archanjo, B. S., & Cowie, A. L. (2017). Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nature Climate Change*, *7*(5), 371-376.

Yousef, H. A., Fahmy, H. M., Arafa, F. N., Abd Allah, M. Y., Tawfik, Y. M., El Halwany, K. K., El-Ashmanty, B. A., Al-Anany, F. Sh., Mohamed, M. A., & Bassily, M. E. (2023). Nanotechnology in pest management: advantages, applications, and challenges. *International Journal of Tropical Insect Science*, *43*(5), 1387-1399.

Zain, M., Ma, H., Rahman, S. U., Nuruzzaman, M., Chaudhary, S., Azeem, I., Mehmood F, Duan A, & Sun, C. (2024). Nanotechnology in precision agriculture: Advancing towards sustainable crop production. *Plant Physiology and Biochemistry*, *206*, 108244.

Zhang, S., Fang, Y., Kawasaki, A., Tavakkoli, E., Cai, Y., Wang, H., & Li, Y. (2023). Biochar significantly reduced nutrient-induced positive priming in a subtropical forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, *59*(6), 589-607.

Zhao, J., & Zhou, N. (2021). Impact of human health on economic growth under the constraint of environment pollution. *Technological Forecasting and Social Change*, *169*, 120828.