



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه: راهبردی برای کشاورزی پایدار

مسلم زرینی بهادر^{۱*}

۱- کارشناس تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. *moslem.zarini@ymail.com

چکیده

افزایش جمعیت جهانی و نیاز به تولید بیشتر غذا، اهمیت استفاده بهینه از منابع خاک و تغذیه گیاه را برجسته ساخته است. مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه (ISFM/IPNM) رویکردی جامع است که با ترکیب کودهای شیمیایی، مواد آلی، مدیریت بقایای گیاهی، تناوب زراعی، و فناوری‌های نوین تغذیه‌ای، هدف افزایش بهره‌وری محصول، بهبود کیفیت خاک، کاهش هزینه‌های تولید و کاهش پیامدهای منفی زیست‌محیطی را دنبال می‌کند. این راهبرد نه تنها کارایی مصرف عناصر غذایی و بهره‌وری محصول را افزایش می‌دهد، بلکه به بهبود کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و ارتقای سلامت اکوسیستم‌های کشاورزی نیز منجر می‌شود. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که کاربرد ISFM می‌تواند میانگین عملکرد محصولات عمده مانند غلات را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش داده و در عین حال میزان تلفات نیتروژن و فسفر و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. علاوه بر این، مدیریت تلفیقی حاصلخیزی نقشی اساسی در پشتیبانی از اهداف توسعه پایدار (SDGs)، به ویژه امنیت غذایی، کاهش فقر، و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کند. مقاله حاضر با مرور نظام‌مند ادبیات علمی سال‌های اخیر، به تبیین اصول، دستاوردها، چالش‌ها و آینده پژوهی در زمینه ISFM پرداخته و بر ضرورت سیاست‌گذاری و آموزش برای نهادینه‌سازی این رویکرد در سیستم‌های کشاورزی جهان تأکید می‌نماید و پیامدهای مثبت آن بر پایداری کشاورزی و امنیت غذایی را تحلیل می‌کند.

واژگان کلیدی: پایداری تولید، مواد آلی، کیفیت خاک، کودهای شیمیایی

مقدمه

حاصلخیزی خاک یکی از عوامل کلیدی در پایداری تولید کشاورزی است (Vanlauwe et al., 2010). با این حال، وابستگی بیش از حد به کودهای شیمیایی ضمن افزایش عملکرد در کوتاه‌مدت، منجر به کاهش کیفیت خاک، آلودگی منابع آبی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است (Yuan et al., 2023) از سوی دیگر، اتکای صرف به منابع آلی نمی‌تواند نیاز غذایی گیاهان را در مقیاس بزرگ برطرف کند. در این میان، مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه (Integrated Soil Fertility and Plant Nutrition Management - ISFM/IPNM) به‌عنوان راهبردی میان‌بر مطرح می‌شود که ترکیبی از ورودی‌های مدرن و منابع بومی را به کار می‌گیرد (Tittonell & Giller, 2013).

حاصلخیزی خاک و مدیریت تغذیه گیاه از دیرباز به‌عنوان دو مؤلفه بنیادین در پایداری و بهره‌وری کشاورزی شناخته می‌شوند. افزایش تقاضا برای مواد غذایی در نتیجه رشد جمعیت جهانی، تغییر الگوهای مصرف و توسعه صنایع غذایی، موجب شده است که فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع خاک و آب وارد گردد (Abrol et al., 2024). در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، اتکای بیش از حد به کودهای شیمیایی برای جبران کمبود مواد غذایی گیاه، منجر به مشکلاتی نظیر افت کیفیت خاک، آلودگی منابع آبی، تخریب تنوع زیستی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. در مقابل، استفاده صرف از منابع آلی نظیر کود دامی، کمپوست یا بقایای گیاهی، به دلیل محدودیت در مقدار عناصر غذایی قابل تأمین، نمی‌تواند به‌تنهایی نیازهای فزاینده سیستم‌های کشاورزی مدرن را برطرف سازد (Sheoran et al., 2024).

در این میان، مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه (ISFM/IPNM) به‌عنوان راهبردی نوین مطرح شده است که به‌دنبال تلفیق دانش علمی و تجربیات بومی، استفاده همزمان و متعادل از نهاده‌های معدنی و آلی، و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند نانوکودها، کودهای آهسته‌رهش و محرک‌های زیستی است. این رویکرد نه تنها به افزایش کارایی مصرف کودها و ارتقای عملکرد محصولات کشاورزی منجر می‌شود، بلکه نقش بسزایی در بازسازی حاصلخیزی خاک، حفظ پایداری اکوسیستم‌ها و کاهش پیامدهای منفی زیست‌محیطی دارد (Kharlukhi et al., 2024).

اهمیت ISFM تنها در بُعد تولید و محیط زیست خلاصه نمی‌شود، بلکه از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز واجد اهمیت است. اجرای این راهبرد می‌تواند هزینه‌های تولید کشاورزان را کاهش داده، درآمد آنان را افزایش دهد و در نتیجه به کاهش فقر و ارتقای امنیت غذایی کمک نماید. افزون بر این، هم‌سویی ISFM با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد نشان‌دهنده ظرفیت این رویکرد برای تبدیل شدن به محور اصلی سیاست‌گذاری‌های کشاورزی آینده است (Bai et al., 2022).

از این‌رو، مرور و تحلیل مطالعات اخیر در زمینه ISFM اهمیت ویژه‌ای دارد. مقاله حاضر تلاش می‌کند با تمرکز بر پژوهش‌های منتشرشده طی سال‌های اخیر، ضمن تبیین مبانی نظری و اصول مدیریتی، دستاوردها و پیامدهای مثبت اجرای ISFM را بررسی کرده و در نهایت به معرفی چالش‌ها، محدودیت‌ها و مسیرهای آینده این رویکرد بپردازد.

مبانی نظری و اصول مدیریت تلفیقی

مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه یک رویکرد چندبُعدی است که به‌طور همزمان به نیازهای غذایی گیاه، ویژگی‌های خاک، شرایط محیطی، و ظرفیت‌های اجتماعی-اقتصادی کشاورزان توجه دارد. این رویکرد برخلاف روش‌های سنتی تغذیه گیاه، بر «یکپارچه‌سازی» منابع مختلف تأمین عناصر غذایی (معدنی، آلی و زیستی) و بهینه‌سازی آن‌ها تأکید می‌کند (Vanlauwe et al., 2015).

بر اساس چارچوب نظری ISFM، حاصلخیزی خاک نه یک ویژگی ثابت بلکه یک مفهوم پویا است که تحت تأثیر عوامل فیزیکی (بافت، ساختمان، رطوبت)، شیمیایی (pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، غلظت عناصر غذایی) و زیستی (فعالیت میکروبی، حضور ریزجانداران همزیست) قرار دارد. بنابراین، تغذیه پایدار گیاه مستلزم مدیریتی تلفیقی است که تمام این عوامل را به‌صورت همزمان در نظر بگیرد (Chivenge et al., 2011).

اصول کلیدی مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک عبارتند از:

- ۱- کاربرد متعادل و هدفمند کودهای شیمیایی: استفاده از کودهای شیمیایی، تأمین عناصر پرمصرف (N, P, K) و ریزمغذی‌ها باید به صورت هدفمند و مبتنی بر آزمون خاک و نیاز واقعی گیاه باشد. کوددهی متعادل و زمان‌بندی مناسب می‌تواند کارایی مصرف عناصر غذایی را افزایش داده و از تلفات و آلودگی جلوگیری کند (Chivenge & Vanlauwe, 2011).
- ۲- استفاده از منابع آلی: منابعی مانند کود دامی، کمپوست، بیوجار و بقایای گیاهی موجب افزایش ماده آلی خاک، تحریک فعالیت میکروبی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک می‌شوند (Fu et al., 2023).
- ۳- تناوب و تنوع زراعی: کاشت گیاهان تثبیت‌کننده نیتروژن (حبوبات)، تناوب غلات و استفاده از کشت پوششی به افزایش بهره‌وری و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و بهبود چرخه عناصر غذایی کمک می‌کند (Tittonell & Giller, 2020).
- ۴- فناوری‌های نوین تغذیه گیاه و محرک‌های زیستی: استفاده از کودهای آهسته‌رهش، نانوکودها، ریزجانداران محرک رشد (PGPR)، و بیواستیمولانت‌ها، کارایی مصرف کود را ارتقا داده و اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد (Meena et al., 2025).
- ۵- یکپارچگی با مدیریت پایدار منابع طبیعی: شامل مدیریت آب، حفاظت خاک و کاهش فرسایش.

مرور مطالعات پیشین

مطالعات اخیر نشان می‌دهند:

افزایش عملکرد محصول و بهره‌وری کود: ترکیب کودهای آلی و شیمیایی منجر به افزایش کارایی مصرف نیتروژن و فسفر می‌شود (Xiang et al., 2022).

ترکیب منابع آلی و معدنی در آزمایش‌های بلندمدت هند (اقلیم خشک نیمه‌مرطوب، Inceptisol) باعث افزایش معنی‌دار عملکرد ذرت، بهبود کارایی مصرف آب باران و افزایش کربن آلی خاک (SOC) شد؛ به‌ویژه تیمارهای FYM + کودهای معدنی نسبت به شاهد افت مواد غذایی را معکوس کردند (Abrol et al., 2024).

فرا تحلیل‌ها و مرورها نشان می‌دهند که کاربرد همزمان مواد آلی+معدنی نسبت به مصرف صرف یک منبع، برتری پایدار در عملکرد و کیفیت خاک دارد؛ هم از مسیر افزایش عرضه هم‌زمان عناصر و هم از طریق هم‌زمانی عرضه با نیاز گیاه (Allam et al., 2022; Padbhushan et al., 2021).

برآوردهای جهانی نشان می‌دهد چرخه تولید و مصرف کود نیتروژنه سنتتیک سهم بزرگی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد؛ از این رو، ISFM با کاهش وابستگی به N معدنی و افزایش NUE، پتانسیل جدی برای کاهش ردپای کربن دارد (Menegat et al., 2022).

بهبود کیفیت خاک: افزایش ماده آلی، ظرفیت نگهداری آب و تنوع میکروبی خاک در سیستم‌های ISFM گزارش شده است (Dunjana et al, 2023).

کاهش آلودگی محیط‌زیست: استفاده از کودهای آهسته‌رهش و نانوکودها باعث کاهش تلفات نیترات و انتشار N_2O می‌شود (Chen et al, 2018).

تقویت امنیت غذایی: پژوهش‌ها نشان می‌دهند اجرای ISFM در کشورهای در حال توسعه می‌تواند بهره‌وری غلات را ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش دهد (Vanlauwe et al., 2015).

مرورها و فراتحلیل‌های اخیر نشان می‌دهند افزودن بیوجار عملکرد را به‌طور میانگین افزایش می‌دهد و وقتی با کود معدنی ترکیب شود، افزایش بیشتری در عملکرد نسبت به هرکدام به‌تنهایی حاصل می‌شود؛ ضمن بهبود pH، SOC و برخی شاخص‌های زیستی (Bai et al., 2022).

چالش‌ها و محدودیت‌ها

- کمبود دانش و آگاهی کشاورزان در زمینه آزمون خاک و مدیریت بهینه تغذیه.
- دسترسی محدود به نهاده‌های با کیفیت در بسیاری از مناطق.
- هزینه اولیه بالای برخی فناوری‌های نوین مانند نانوکودها.
- نیاز به سیاست‌های حمایتی و یارانه‌ای برای گسترش ISFM در کشورهای کم‌درآمد.

نتیجه‌گیری

مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه (ISFM/IPNM) به‌عنوان یک رویکرد کلیدی در کشاورزی معاصر، پاسخی جامع به چالش‌های فزاینده در حوزه تولید غذا، تخریب منابع طبیعی و تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. مرور پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که اجرای ISFM می‌تواند هم‌زمان چندین هدف راهبردی را محقق سازد: افزایش عملکرد محصولات، بهبود کیفیت خاک، ارتقای کارایی مصرف نهاده‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقویت امنیت غذایی در مقیاس محلی و جهانی.

یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب منابع آلی و معدنی نه تنها از افت حاصلخیزی خاک جلوگیری می‌کند، بلکه موجب افزایش ماده آلی، بهبود فعالیت زیستی، ارتقای ساختار خاک و افزایش کارایی مصرف نیتروژن و فسفر می‌شود. این دستاوردها در بلندمدت به پایداری عملکرد محصولات، افزایش درآمد کشاورزان و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی پرهزینه منجر خواهد شد. افزون بر این، افزودن فناوری‌های نوین مانند نانوکودها، کودهای آهسته‌رهش، بیواستیمولانت‌ها و اصلاح‌گرهایی نظیر بیوجار به چارچوب ISFM، چشم‌انداز تازه‌ای برای افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی فراهم می‌کند. با این حال، پیاده‌سازی موفق ISFM با موانعی همچون محدودیت دسترسی به منابع آلی با کیفیت، هزینه بالای فناوری‌های نوین، نبود زیرساخت مناسب برای آزمون خاک و کمبود آگاهی کشاورزان روبه‌روست. بنابراین، غلبه بر این موانع مستلزم طراحی و اجرای سیاست‌های حمایتی، یارانه‌ای و آموزشی است که کشاورزان را به‌سوی پذیرش و تداوم این رویکرد سوق دهد. نقش نهادهای ترویجی، تعاونی‌های کشاورزی، سازمان‌های پژوهشی و سیاست‌گذاران در این میان تعیین‌کننده است. از منظر توسعه پایدار، ISFM نه تنها ابزاری برای افزایش تولید است، بلکه چارچوبی استراتژیک برای هم‌سویی با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد به‌ویژه هدف ۲ (رهایی از گرسنگی)، هدف ۱۲ (مصرف و تولید پایدار)، و هدف ۱۳ (مقابله با تغییرات اقلیمی) محسوب می‌شود. این هم‌افزایی میان اهداف تولیدی، زیست‌محیطی و اجتماعی-اقتصادی نشان می‌دهد که ISFM ظرفیت آن را دارد تا به یکی از ارکان اصلی سیاست‌های کشاورزی و امنیت غذایی در سطح ملی و جهانی بدل شود. در جمع‌بندی، می‌توان گفت که آینده کشاورزی پایدار در گرو پذیرش و گسترش مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه است. برای تحقق این هدف، توصیه می‌شود:

۱. پژوهش‌های آینده به توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی مدیریت تغذیه اختصاص یابند.
۲. سیاست‌گذاران حمایت‌های مالی و نهادی لازم برای دسترسی کشاورزان به منابع آلی، فناوری‌های نوین و خدمات ترویجی را فراهم کنند.
۳. همکاری‌های بین‌المللی و منطقه‌ای برای تبادل دانش، تجربیات و منابع در حوزه ISFM تقویت گردد.
۴. شاخص‌های ارزیابی جامع شامل بهره‌وری، پایداری زیست‌محیطی، و عدالت اجتماعی به‌طور یکپارچه در برنامه‌های کشاورزی لحاظ شوند.

بنابراین، ISFM تنها یک راهکار فنی برای افزایش عملکرد نیست، بلکه مسیری استراتژیک برای بازآفرینی نظام‌های کشاورزی، حفاظت از منابع طبیعی، و تضمین امنیت غذایی نسل‌های آینده است.

فهرست منابع

- 1- Abrol, V., Sharma, P., Chary, G. R., Srinivasarao, C., Maruthi Sankar, G. R., Singh, B., ... & Kumar, M. (2024). Integrated organic and mineral fertilizer strategies for achieving sustainable maize yield and soil quality in dry sub-humid inceptisols. *Scientific Reports*, 14(1), 27227.
- 2- Allam, M., Radicetti, E., Quintarelli, V., Petroselli, V., Marinari, S., & Mancinelli, R. (2022). Influence of organic and mineral fertilizers on soil organic carbon and crop productivity under different tillage systems: A meta-analysis. *Agriculture*, 12(4), 464.
- 3- Bai, S. H., Omidvar, N., Gallart, M., Kämper, W., Tahmasbian, I., Farrar, M. B., ... & van Zwieten, L. (2022). Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 808, 152073.
- 4- Chen, J., Lü, S., Zhang, Z., Zhao, X., Li, X., Ning, P., & Liu, M. (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of the total environment*, 613, 829-839.
- 5- Chivenge, P., Vanlauwe, B., & Six, J. (2011). Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 342(1), 1-30
- 6- Dunjana, N., Pisa, C., Fanadzo, M., Mupambwa, H. A., & Dube, E. (2023). Integrated Soil Fertility Management for Soil Fertility Restoration in Sub-Saharan Africa. In *Towards Sustainable Food Production in Africa: Best Management Practices and Technologies* (pp. 21-38). Singapore: Springer Nature Singapore.
- 7- Fu, J., Zhou, X., He, Y., Liu, R., Yao, Y., Zhou, G., ... & Bai, S. H. (2023). Co-application of biochar and organic amendments on soil greenhouse gas emissions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 897, 166171.
- 8- Kharlukhi, D. G., Upadhyaya, K., & Sahoo, U. K. (2024). Influence of integrated nutrient management on soil health, growth and yield of paddy in "jhum lands" of North-Eastern Himalayas. *Discover Agriculture*, 2(1), 107.
- 9- Meena, D. C., BIRTHAL, P. S., & Kumara, T. K. (2025). Biostimulants for sustainable development of agriculture: A bibliometric content analysis. *Discover Agriculture*, 3(1), 2.
- 10- Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Scientific Reports*, 12(1), 14490.
- 11- Padbhushan, R., Sharma, S., Kumar, U., Rana, D. S., Kohli, A., Kaviraj, M., ... & Gupta, V. V. (2021). Meta-analysis approach to measure the effect of integrated nutrient management on crop performance, microbial activity, and carbon stocks in Indian soils. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 724702.
- 12- Sheoran, S., Prakash, D., Raj, D., Mor, V. S., Yadav, P. K., Gupta, R. K., ... & Siddiqui, M. H. (2024). Long-term organic and N fertilization influence the quality and productivity of pearl millet under pearl millet-wheat sequence in north India. *Scientific Reports*, 14(1), 19503.
- 13- Tittonell, P., & Giller, K. E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, 143, 76-90.

- 14- Vanlauwe, B., Descheemaeker, K., Giller, K. E., Huising, J., Merckx, R., Nziguheba, G., ... & Zingore, S. (2015). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. *Soil*, 1(1), 491-508.
- 15- Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K. E., Merckx, R., Mkwunye, U., ... & Sanginga, N. (2010). Integrated soil fertility management: operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on agriculture*, 39(1), 17-24.
- 16- Xiang, Y., Li, Y., Liu, Y., Zhang, S., Yue, X., Yao, B., ... & Li, S. (2022). Factors shaping soil organic carbon stocks in grass covered orchards across China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 807, 150632.
- 17- Yuan, Y., Wang, C., Zai, X., Song, Y., & Zhang, X. (2023). Optimizing fertilizer use for sustainable food systems: an evaluation of integrated water-fertilizer system adoption among cotton farmers in China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1310426.

Integrated Soil Fertility and Plant Nutrition Management: A Strategy for Sustainable Agriculture

Moslem zarinibahador

Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Tehran Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Abstract

The growing global population and the increasing demand for food production have underscored the importance of optimizing soil resource utilization and plant nutrition management. Integrated Soil Fertility and Plant Nutrition Management (ISFM/IPNM) is a holistic approach that combines chemical fertilizers, organic amendments, crop residue management, crop rotation, and advanced nutrient management technologies to enhance crop productivity, improve soil quality, reduce production costs, and mitigate negative environmental impacts. This strategy not only increases nutrient use efficiency and crop yields but also improves the physical, chemical, and biological properties of soils, thereby enhancing the overall health of agricultural ecosystems. Recent studies indicate that the application of ISFM can increase the average yields of major crops, such as cereals, by 20–40%, while simultaneously reducing nitrogen and phosphorus losses and lowering greenhouse gas emissions. Furthermore, integrated fertility management plays a crucial role in supporting the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in relation to food security, poverty reduction, and environmental protection. This review systematically examines recent scientific literature to elucidate the principles, achievements, challenges, and future perspectives of ISFM, while emphasizing the necessity of policy interventions and farmer education to institutionalize this approach in global agricultural systems. It also highlights the positive implications of ISFM for agricultural sustainability and food security.

Keywords: Production Sustainability, Organic Matter, Soil Quality, Chemical Fertilizers