Journal of Economics and Food Security,Vol. 2, No 1, 2026 ……...p: 86-93

Research Paper

An Introduction to Adapting MODAM: A Bio-Economic Decision-Support Tool for Evaluating Subsoil Agroecological Practices in Farming Systems

Samaneh Nikan[1,2], Peter Zander [1], María Rosa Mosquera-Losada[2], and Seyed-Ali Hosseini-Yekani[1,2]

1- Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), 15374, Müncheberg, Germany
2- University of Santiago de Compostela, 27002 Lugo, Spain
(Corresponding author: Seyed_Ali.Hosseini_Yekani@zalf.de)

Received: 15 September 2025 Revised: 25 November 2025 Accepted: 07 December 2025

Extended Abstract

Background: Subsoil degradation caused by factors such as soil compaction, reduction in organic matter, nutrient depletion, and soil contamination is considered one of the major challenges in maintaining agricultural productivity and the sustainability of agroecosystems. Recent studies have shown that deep channels created by roots can act as persistent ecological hotspots in the subsoil and maintain soil biodiversity and functions even after root decomposition. These findings have highlighted the necessity of considering subsoil processes in agroecological assessment tools. In this context, Agroecological Subsoil Management (ASM) practices, including the use of deep-rooted cover crops, the application of organic amendments (such as manure), and the integration of trees through agroforestry systems, can improve water retention capacity, nutrient cycling, biodiversity, and soil quality. However, the adoption of these practices faces several barriers due to initial establishment costs, liquidity constraints, increased labor requirements, management complexity, uncertainty regarding economic returns, and the existence of environmental externalities. Therefore, developing decision-support tools that can evaluate the private profitability of these practices alongside their environmental benefits is essential for designing sustainable agricultural policies.

This study aims to develop the bioeconomic model MODAM to integrate ASM interventions and evaluate their effects on farm economic performance and key sustainability indicators. This research addresses three main questions. I. Which subsoil management options are economically optimal and profitable for farmers within realistic farm constraints? II. What are the main trade-offs among profitability, water consumption, greenhouse gas emissions, and labor requirements under different ASM options? III. Regarding outcomes that generate public and external benefits, under what conditions are policy incentives and support measures necessary for the adoption of these practices?

Methods: This study was conducted within the framework of the European SUS-SOIL project and is based on the development of the bioeconomic model MODAM, which is a dynamic, farm-level, linear programming-based model that enables the simultaneous analysis of economic and environmental indicators. In this study, the model structure was developed in a way that it explicitly incorporates the three components of ASM, including cover crops, manure application, and agroforestry. Furthermore, two proxy indicators were defined to represent long-term subsoil effects, including soil organic carbon improvement and soil compaction reduction, and direct nitrous oxide emissions resulting from mineral and manure fertilizer use were also calculated within the model framework. Decision variables included cover crop area, manure application rates, land allocation to trees, and other inputs used. The model was formulated as a Mixed-Integer Programming (MIP) framework and calibrated using Positive Mathematical Programming (PMP) to reproduce baseline farm conditions. Eight indicators, including gross margin, water consumption, greenhouse gas emissions, labor requirements, nitrate leaching, crop diversity, soil organic carbon improvement, and soil compaction reduction, were used to evaluate scenario performance.

Finally, five management scenarios, including conventional systems, cover crops, manure application, agroforestry, and the simultaneous implementation of all ASM components, were defined and compared using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA).

Copyright © 2026. Nikan et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

Results: The results obtained from the development of the MODAM model showed that integrating ASM interventions into the farm decision-making framework enables the simultaneous analysis of economic, environmental, and soil quality dimensions. The findings indicate that each ASM component has different effects on sustainability indicators, and no single intervention is capable of achieving a complete balance between economic and environmental objectives. Some practices improve profitability or reduce resource consumption, while others increase labor requirements or management costs. In addition, structural trade-offs exist among different sustainability objectives, including economic profitability, water consumption, greenhouse gas emissions, labor requirements, and subsoil quality. Among the evaluated scenarios, the simultaneous implementation of all ASM components showed the most balanced performance in terms of economic and environmental indicators and created the greatest improvement in subsoil proxy indicators, particularly soil organic carbon improvement and soil compaction reduction. In addition, the findings showed that a significant proportion of the benefits resulting from these practices, including soil organic carbon improvement and biodiversity enhancement, appear as public and external benefits and are not fully reflected in farmers' economic decisions.

Conclusion: The results of this study show that the development of the MODAM bioeconomic model and the integration of subsoil-related processes provide an appropriate framework for the simultaneous evaluation of economic and environmental performance of agricultural systems. The findings indicate that achieving sustainability in subsoil management cannot be achieved through a single intervention, and the combined application of cover crops, organic amendments, and agroforestry can create a better balance among economic objectives, environmental outcomes, and soil quality. Furthermore, considering that a significant part of the benefits of these practices appears in the form of external benefits, the use of supportive policies and economic incentives is necessary to increase their adoption. Overall, the developed framework can be used as a tool for decision support at the farm level and for designing policies for sustainable subsoil management.

Keywords: Bio-economic modeling, Agroecological Subsoil Management, Decision-support, Multi-criteria optimization, Sustainability indicators

How to Cite This Article: Nikan, S., Zander, P., Mosquera-Losada, M. R., & Hosseini-Yekani, S. A. (2026). An Introduction to the Adapting MODAM: A Bio-Economic Decision-Support Tool for Evaluating Subsoil Agroecological Practices in Farming Systems. *J Economics Food Sec,* 2(1), 86-93. DOI: 10.66224/efs.2026.89

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

OPEN ACCESS

مقاله پژوهشی

معرفی الگوی بومی‌سازی و تطبیق مدل MODAM: ابزاری زیست‌اقتصادی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در ارزیابی شیوه‌های اکولوژیکی خاک زیرین در نظام‌های کشاورزی

سمانه نیکان[۱و۲]، پیتر زندر[۱]، ماریا روزا موسکرا-لوسادا[۲] و سیدعلی حسینی‌یکانی[۱و۲]

۱- مرکز تحقیقات چشم‌اندازهای کشاورزی لایبنیتس (ZALF)، ۱۵۳۷۴ مونشبرگ، آلمان
۲- دانشگاه سانتیاگو دِ کامپوستلا، ۲۷۰۰۲ لوگو، اسپانیا، (نویسنده مسوول: Seyed_Ali.Hosseini_Yekani@zalf.de)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶
صفحه: ۸۶ تا ۹۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: تخریب خاک زیرین، ناشی از عواملی مانند تراکم خاک، کاهش ماده آلی، کاهش مواد غذایی و آلودگی خاک، یکی از چالش‌های اساسی در حفظ بهره‌وری کشاورزی و پایداری اکوسیستم‌های زراعی به‌شمار می‌رود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کانال‌های عمیق ایجاد شده توسط ریشه‌ها می‌توانند به‌عنوان کانون‌های اکولوژیکی پایدار در خاک زیرین عمل کرده، حتی پس از تجزیه ریشه‌ها، تنوع زیستی و کارکردهای خاک را حفظ کنند. این یافته‌ها ضرورت توجه به فرآیندهای خاک زیرین را در ابزارهای ارزیابی کشاورزی-اکولوژیکی برجسته کرده‌اند. در این راستا، شیوه‌های مدیریت کشاورزی-اکولوژیکی خاک زیرین (ASM) از جمله استفاده از گیاهان پوششی با ریشه‌های عمیق، کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی، مانند کود دامی و تلفیق درختان در قالب جنگل‌داری کشاورزی، می‌توانند ظرفیت نگهداری آب، چرخه مواد غذایی، تنوع زیستی و کیفیت خاک را بهبود بخشند. با این‌حال، پذیرش این شیوه‌ها به‌دلیل هزینه‌های اولیه استقرار، محدودیت‌های نقدینگی، نیاز به نیروی کار بیشتر، پیچیدگی‌های مدیریتی، نامشخص بودن بازده اقتصادی و وجود منافع بیرونی زیست‌محیطی با موانع متعددی روبرو است. ازاین رو، توسعه ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری که بتوانند سودآوری خصوصی این اقدامات را در کنار منافع زیست‌محیطی آن‌ها ارزیابی کنند، برای طراحی سیاست‌های کشاورزی پایدار ضروری است. توسعه مدل زیست‌اقتصادی MODAM به‌منظور ادغام مداخلات مدیریت کشاورزی-اکولوژیکی خاک زیرین و ارزیابی اثرات آن‌ها بر عملکرد اقتصادی مزرعه و شاخص‌های کلیدی پایداری است. این پژوهش به بررسی سه پرسش اصلی می‌پردازد: نخست، کدام گزینه‌های مدیریت خاک زیرین در چارچوب محدودیت‌های واقعی مزرعه از نظر اقتصادی برای کشاورزان بهینه و سودآور هستند؟ دوم، مهم‌ترین مبادلات میان سودآوری، مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به نیروی کار در گزینه‌های مختلف ASM چیست؟ و سوم، در مورد پیامدهایی که منافع عمومی و بیرونی ایجاد می‌کنند، چه شرایطی استفاده از مشوق‌ها و حمایت‌های سیاستی را برای پذیرش این اقدامات ضروری می‌سازد؟

مواد و روش‌ها: این پژوهش در چارچوب پروژه اروپایی SUS-SOIL انجام شد و بر توسعه مدل زیست‌اقتصادی MODAM استوار است. این مدل، یک مدل پویا و مبتنی‌بر برنامه‌ریزی خطی در سطح مزرعه است که امکان تحلیل هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کند. در این مطالعه، ساختار مدل به‌گونه‌ای توسعه یافت که سه مؤلفه مدیریت کشاورزی-اکولوژیکی خاک زیرین شامل گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی و جنگل‌داری کشاورزی را به‌صورت صریح در مدل وارد کند. همچنین، دو شاخص جانشین برای بازنمایی اثرات بلندمدت خاک زیرین، شامل افزایش کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک، تعریف شدند و انتشار مستقیم اکسید نیتروژن ناشی از مصرف کودهای معدنی و دامی نیز در چارچوب مدل محاسبه گردید. متغیرهای تصمیم شامل سطح گیاهان پوششی، نرخ مصرف کود دامی، تخصیص سطح به درختان و سایر نهاده‌های مورد استفاده بودند. مدل در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) تدوین و با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) کالیبره شد تا شرایط پایه مزرعه را بازتولید کند. هشت شاخص، شامل حاشیه سود ناخالص، مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به نیروی کار، آب‌شویی نیترات، تنوع محصولات زراعی، بهبود کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک، برای ارزیابی عملکرد سناریوها استفاده شدند. در نهایت، پنج سناریوی مدیریتی، شامل سیستم متعارف، استفاده از گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی، جنگل‌داری کشاورزی و اجرای هم‌زمان تمام مؤلفه‌های ASM، تعریف و با استفاده از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) مقایسه شدند.

یافته‌ها: نتایج حاصل از توسعه مدل MODAM نشان می‌دهند که ادغام مداخلات مدیریت کشاورزی-اکولوژیکی خاک زیرین در چارچوب تصمیم‌گیری مزرعه، امکان تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و کیفیت خاک را فراهم می‌کند. بر اساس یافته‌ها، هر یک از مؤلفه‌های ASM اثرات متفاوتی بر شاخص‌های پایداری دارند و هیچ مداخله منفردی قادر به ایجاد تعادل کامل میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی نیست. برخی اقدامات موجب بهبود سودآوری یا کاهش مصرف منابع می‌شوند، در حالی‌که برخی دیگر نیاز به نیروی کار یا هزینه‌های مدیریتی را افزایش می‌دهند. افزون بر این، میان اهداف مختلف پایداری، از جمله سودآوری اقتصادی، مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به نیروی کار و کیفیت خاک زیرین، مبادلات ساختاری وجود دارند. در میان سناریوهای بررسی‌شده، اجرای هم‌زمان تمام مؤلفه‌های ASM متعادل‌ترین عملکرد را از نظر شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی نشان داد و بیشترین بهبود را در شاخص‌های جانشین خاک زیرین، به‌ویژه افزایش کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک، ایجاد کرد. علاوه بر این، بخش قابل توجهی از منافع حاصل از این اقدامات، از جمله بهبود کربن آلی خاک و تنوع زیستی، به‌صورت منافع عمومی و بیرونی ظاهر می‌شود و در تصمیم‌های اقتصادی کشاورزان به‌طور کامل منعکس نمی‌شود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که توسعه مدل زیست‌اقتصادی MODAM و ادغام فرآیندهای مرتبط با خاک زیرین، چارچوبی مناسب را برای ارزیابی هم‌زمان عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی نظام‌های کشاورزی فراهم می‌کند. یافته‌ها بیانگر آن هستند که دستیابی به پایداری در مدیریت خاک زیرین از طریق یک اقدام منفرد امکان‌پذیر نیست و به‌کارگیری ترکیبی از گیاهان پوششی، اصلاح‌کننده‌های آلی و جنگل‌داری کشاورزی می‌تواند تعادل مناسب‌تری را میان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و کیفیت خاک ایجاد کند. همچنین، با توجه به این که بخش مهمی از منافع این اقدامات در قالب منافع بیرونی ظاهر می‌شود، استفاده از سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های اقتصادی برای افزایش پذیرش آن‌ها ضروری است. در مجموع، چارچوب توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی تصمیم‌گیری در سطح مزرعه و طراحی سیاست‌های مدیریت پایدار خاک زیرین مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندمعیاره، پشتیبانی از تصمیم‌گیری، خاک زیرین، شاخص‌های پایداری، مدل‌سازی زیست‌اقتصادی، مدیریت اگرواکولوژیک

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

مقدمه

استراتژی‌های مدیریت خاک، از جمله کوددهی و خاک‌ورزی، می‌توانند تأثیر قابل توجهیی بر کیفیت خاک و بهره‌وری محصولات کشاورزی داشته باشند (Liang *et al*., 2025). شواهد اخیر نشان می‌دهند که کانال‌های عمیق ایجادشده توسط ریشه‌ها به‌عنوان کانون‌های اکولوژیکی پایدار در خاک‌های زیرین عمل می‌کنند و حتی مدت‌ها پس از مرگ و تجزیه ریشه‌ها، تنوع زیستی و کارکردهای خاک را حفظ می‌کنند. این یافته‌ها ضرورت توجه صریح به فرایندهای مرتبط با خاک‌زیرین را در ابزارهای ارزیابی کشاورزی–اکولوژیکی برجسته می‌سازند (Bock & Fleishman, 2025).

تخریب خاک زیرین که در اثر عواملی هم‌چون تراکم خاک، کاهش مواد غذایی، آلودگی خاک و کاهش ماده آلی رخ می‌دهد، یکی از چالش‌های اساسی در حفظ بهره‌وری کشاورزی و تاب‌آوری خاک به‌شمار می‌رود (Batey, 2009).

شیوه‌های مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین (Agroecological Subsoil Management; ASM)، از جمله استفاده از گیاهان پوششی با ریشه‌های عمیق، کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کود دامی، و تلفیق درختان در سامانه‌های زراعی از طریق جنگل‌داری کشاورزی (Agroforestry)، می‌توانند ظرفیت نگهداری آب، چرخه مواد غذایی و تنوع زیستی را بهبود بخشد (Liang *et al*., 2025; Thorup-Kristensen *et al*., 2020). با این حال، پذیرش این شیوه‌ها اغلب نه‌تنها به‌دلیل عدم اطمینان نسبت به سودآوری آن‌ها، بلکه به‌علت هزینه‌های اولیه استقرار، نامشخص بودن بازده اقتصادی، محدودیت‌های نقدینگی، نیاز به نیروی کار بیشتر، پیچیدگی‌های مدیریتی، محدودیت‌های قانونی (مانند سقف مجاز مصرف مواد مغذی) و هزینه‌های مبادله با موانع متعددی مواجه است. از این رو، ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری باید قادر باشند تا سودآوری خصوصی این اقدامات را در چارچوب محدودیت‌های واقعی واحدهای کشاورزی به‌درستی منعکس کنند و همچنین روشن سازند که در چه شرایطی دستیابی به منافع زیست محیطی مستلزم اعمال مشوق‌های سیاستی است تا این اقدامات از دیدگاه اقتصادی نیز به گزینه‌ای بهینه برای کشاورزان تبدیل شوند.

برای مواجهه با این چالش‌ها، مطالعات متعددی رویکردهای مدل‌سازی و ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری را برای ارزیابی اقدامات کشاورزی–اکولوژیکی از منظرهای زیست‌محیطی و اقتصادی پیشنهاد کرده‌اند. با این حال، بسیاری از مطالعات مبتنی‌بر بهینه‌سازی، صرفاً مرزهای مبادله (Trade-off Frontiers) میان اهداف زیست‌فیزیکی را ارائه می‌کنند و محدودیت‌های مربوط به امکان‌پذیری در سطح مزرعه، هزینه‌های گذار، دسترسی به کود دامی و الزامات انطباق با سیاست‌ها را که نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش این اقدامات دارند، به‌طور کامل لحاظ نمی‌کنند.

چرکای دکاکی و همکاران (Cherkaoui-Dekkaki *et al.*, 2025)، یک مدل پویای زیست‌اقتصادی مبتنی بر چارچوب کنترل بهینه چند هدفه توسعه داده‌اند که مبادلات میان تولید انرژی و حاصل‌خیزی خاک را در چارچوب محدودیت‌های اکولوژیکی تحلیل می‌کند. این مدل با ارائه بینش‌های کاربردی برای تصمیم‌گیری، به پشتیبانی از توسعه سامانه‌های پایدار انرژی–کشاورزی کمک می‌کند.

گیسلر و همکاران (Geissler *et al.*, 2025) نیز یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی اراضی زراعی ارائه کرده‌اند که عملکرد اقتصادی، تنوع زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای وکیفیت آب را به صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرد. این مدل با لحاظ کردن تغییرات مکانی در میزان کود دهی، استقرار محصولات زراعی و اثرات حاشیه‌ای بر تنوع زیستی، و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با قیود درجه دوم، نشان می‌دهد که چگونه می‌توان مبادلات میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را در برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار به‌صورت نظام‌مند بررسی کرد.

هیلدمان و همکاران (Hildemann *et al.*, 2023) از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص اقدامات حفاظت خاک و آب در مناطق روستایی اتیوپی استفاده کردند. این مطالعه ضمن ایجاد تعادل میان کاهش فرسایش خاک و نیاز به نیروی کار، عدم قطعیت موجود در داده‌های مکانی، از جمله ویژگی‌های خاک و میزان بارش، را نیز به‌طور صریح در نظر می‌گیرد. نتایج این پژوهش که بر پایه توابع هدف تصادفی و در چارچوب الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده‌اند، اهمیت لحاظ کردن عدم قطعیت در شناسایی راهبردهای بهینه حفاظت و برنامه‌ریزی مراحل اجرا را نشان می‌دهند.

به‌همین ترتیب، ریس و همکاران (Reith *et al.*, 2022) از بهینه‌سازی چند هدفه مقاوم به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای تلفیق اهداف اکولوژیکی و اجتماعی–اقتصادی در شرایط عدم قطعیت و در برنامه‌ریزی کاربری اراضی کشاورزی بهره گرفتند. این رویکرد امکان بررسی مبادلات میان خدمات مختلف اکوسیستمی و دیدگاه‌های ذی‌نفعان را فراهم می‌کند و از این نظر، مرجع روش‌شناختی ارزشمندی برای توسعه ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری زیست‌اقتصادی به‌شمار می‌رود.

در نهایت، شولر و ساتلر (Schuler & Sattler, 2010) با ترکیب مدل‌سازی زیست‌اقتصادی و ابزارهای ارزیابی چندمعیاره فازی، آثار سیاست‌های کشاورزی را بر مخاطرات زیست‌محیطی مرتبط با خاک، از جمله فرسایش خاک، تحت سناریوهای مختلف سیاستی در شمال‌شرقی آلمان ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که تلفیق رویکردهای زیست‌اقتصادی و چندمعیاره می‌تواند در تحلیل پیامدهای سیاست‌های کشاورزی و حمایت از تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت پایدار منابع خاک مؤثر باشد.

مدل‌سازی زیست‌اقتصادی، که در این مطالعه با چارچوب MODA (Multi-Objective Decision Support Tool for Agro-Ecosystem Management) نمایندگی می‌شود، برای تحلیل چنین تعاملاتی به‌کار می‌رود. مدل‌های زیست‌اقتصادی موجود، از جمله MODAM، عمدتاً بر شیوه‌های مدیریتی در سطح خاک سطحی تمرکز دارند و توجه محدودی به پویایی‌های خاک زیرین معطوف کرده‌اند.

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

توسعه مدل‌های زیست‌اقتصادی در سطح مزرعه به‌منظور بازنمایی فرآیندهای خاک‌زیرین، برای کمی‌سازی مبادله‌ها ضروری است؛ با این‌حال، به‌همان اندازه اهمیت دارد که مشخص شود کدام یک از اثرات خاک‌زیرین توسط کشاورزان درونی‌سازی می‌شوند (از طریق عملکرد، هزینه‌ها یا ریسک) و کدام یک به‌صورت منافع بیرونی (مانند کربن آلی خاک و تنوع زیستی) بروز می‌یابند، زیرا این تمایز تعیین می‌کند که پذیرش این اقدامات مبتنی‌بر انگیزه‌های بازار خواهد بود یا نیازمند مداخله‌های سیاستی است.

این پژوهش با توسعه مدل زیست‌اقتصادی MODAM، مداخلات ASM را در مدل وارد و آثار آن‌ها را بر عملکرد اقتصادی مزرعه و شاخص‌های کلیدی پایداری شامل مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به نیروی کار و تنوع محصولات زراعی ارزیابی می‌کند. در این راستا، پژوهش حاضر به سه پرسش اصلی زیر پاسخ می‌دهد:

۱- در چارچوب محدودیت‌های واقعی مزرعه، کدام گزینه‌های مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین از نظر اقتصادی برای کشاورزان بهینه و سودآور هستند؟

۲- مهم‌ترین مبادلات میان سودآوری، مصرف آب، نیاز به نیروی کار و انتشار گازهای گلخانه‌ای در گزینه‌های مختلف مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین چیست؟

۳- در مورد پیامدهایی که منافع عمومی و بیرونی ایجاد می‌کنند (برای مثال بهبود کربن آلی خاک)، چه نوع محدودیت‌ها یا مفروضاتی موجب می‌شوند که استفاده از مشوق‌ها و حمایت‌های سیاستی برای پذیرش این اقدامات ضروری باشد؟

مواد و روش‌ها

ساختار مدل و رویکرد حل مسئله

این پژوهش مدل زیست‌اقتصادی MODAM را برای ارزیابی ASMها در نظام‌های کشاورزی تطبیق می‌دهد. مدل‌های زیست‌اقتصادی مزرعه به‌طور گسترده به‌عنوان ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری برای بازنمایی انتخاب‌های مدیریتی کشاورزان مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی‌که رفتار اقتصادی و محدودیت‌های زیست‌فیزیکی را به‌صورت صریح در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها به‌ویژه برای تحلیل مبادلات میان عملکرد اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی در سطح مزرعه مناسب هستند (Flichman & Allen, 2014).

این مطالعه در چارچوب پروژه SUS-SOIL، یک ابتکار پژوهشی اروپایی با تمرکز بر مدیریت پایدار خاک‌های زیرین، انجام می‌شود. مدل MODAM در ابتدا به‌عنوان یک مدل بهینه‌سازی زیست‌اقتصادی مزرعه برای سامانه‌های یکپارچه زراعت–دامداری توسعه یافت و به‌منظور ارزیابی شیوه‌های مدیریتی و اقدامات حفاظت خاک طراحی شد (Schuler & Kächele, 2003).

MODAM یک مدل زیست‌اقتصادی پویا و مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است که الگوهای بهینه فعالیت‌های زراعی و شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی متناظر را در سطح مزرعه تعیین می‌کند. ساختار ماژولار مدل امکان توسعه و فعال‌سازی اجزای مختلف را متناسب با اهداف پژوهش، ویژگی‌های مزرعه و شرایط منطقه‌ای فراهم می‌سازد و بدین ترتیب انعطاف‌پذیری را بالایی برای تحلیل سناریوهای مدیریتی گوناگون ایجاد می‌کند. همچنین، این چارچوب قابلیت لحاظ‌کردن همزمان اهداف اقتصادی و شاخص‌های زیست‌محیطی را در فرآیند تصمیم‌گیری دارد و از این رو برای ارزیابی پیامدهای اقدامات کشاورزی–اکولوژیکی مناسب است (Hosseini-Yekani *et al*, 2025).

کاربردهای پیشین این مدل عمدتاً بر مبادلات اقتصادی مرتبط با اقدامات حفاظت خاک و کنترل فرسایش متمرکز بوده‌اند (Meyer-Aurich *et al*., 2001). در این راستا، چارچوب مدل‌سازی حاضر با افزودن شاخص‌های مرتبط با فرآیندهای خاک زیرین و مداخلات مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی توسعه داده شده است.

با تکیه بر این چارچوب، مطالعه حاضر مدل را به‌گونه‌ای توسعه می‌دهد که سه مؤلفه مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین، شامل گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی (اصلاح‌کننده آلی) و تلفیق درختان در قالب جنگلداری کشاورزی، و همچنین اثرات مرتبط با خاک‌زیرین آن‌ها را از طریق شاخص‌های جانشین (Proxy Indicators) به‌طور صریح بازنمایی کند.

متغیرهای تصمیم، که همگی به‌صورت مقادیر مطلق در نظر گرفته شده‌اند، شامل سطح گیاهان پوششی، نرخ مصرف کود دامی، تخصیص سطح به درختان و سایر نهاده‌های مورد استفاده هستند. یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (Mixed-Integer Programming, MIP) برای تصمیمات مزرعه تدوین می‌شود و نتایج بر اساس هشت شاخص فوق ارزیابی می‌شوند: حاشیه سود ناخالص، مصرف آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تقاضای نیروی کار، آبشویی نیترات، تنوع محصولات زراعی و دو شاخص جانشین خاک‌زیرین ازجمله بهبود کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک.

سپس از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) برای تجمیع مقادیر نرمال‌شده شاخص‌ها در قالب یک امتیاز ترکیبی، بر اساس یک نظام وزن‌دهی مشخص، استفاده می‌شود. مدل از طریق برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (Positive Mathematical Programming, PMP) کالیبره می‌شود تا سطوح فعالیت پایه را بازتولید کند. سناریوهای مختلف، سه مؤلفه مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین را به‌صورت منفرد و ترکیبی با مدیریت متعارف مقایسه می‌کنند.

به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد پایداری سیستم، از یک چارچوب MIP استفاده شد که قابلیت به‌کارگیری هم‌زمان متغیرهای تصمیم‌گیری پیوسته و گسسته را فراهم می‌کند. این ویژگی امکان ادغام محدودیت‌های مربوط به منابع، سیاست‌ها و مدیریت را در قالب یک مدل بهینه‌سازی واحد فراهم می‌سازد.

برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط این امکان را می‌دهد که تصمیماتی نظیر تخصیص سطح زیرکشت و پذیرش مداخلات مدیریتی در شرایط وجود اهداف متعارض، به‌صورت رسمی و ساختاریافته مدل‌سازی شوند، رویکردی که به‌طور گسترده در مطالعات بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است (Bayá *et al.*, 2022).

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

به‌منظور ارزیابی و ایجاد تعادل میان اهداف متعدد پایداری، از تحلیل MCDA استفاده شد. این روش با تجمیع نظام‌مند شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در قالب یک معیار تصمیم‌گیری ترکیبی، امکان تحلیل مبادلات میان اهداف مختلف و تعیین اولویت‌ها را فراهم می‌کند (Taherdoost & Madanchian, 2023).

به‌منظور اطمینان از این‌که راه‌حل پایه مدل بتواند تخصیص مشاهده‌شده زمین و میزان استفاده از نهاده‌ها را بازتولید کند، تابع سود با استفاده از PMP کالیبره می‌شود. به این‌منظور، برای هر فعالیت هزینه‌های غیرخطی اختصاصی تعریف می‌شود تا با توجه به قیمت‌های مشاهده‌شده و ضرایب فنی موجود، تخصیص پایه به‌طور دقیق بازتولید شود.

در این پژوهش، عملکرد اقتصادی مزرعه بر اساس حاشیه سود ناخالص (Gross Margin) ارزیابی می‌شود که از کسر هزینه‌های متغیر از درآمدهای حاصل به‌دست می‌آید. آثار چند ساله اقدامات مدیریت پایدار کشاورزی (ASM)، مانند استقرار سامانه‌های اگروفارستری و منافع با تأخیر زمانی، از طریق تبدیل جریان‌های سرمایه‌گذاری و منافع در طول یک افق زمانی ۳۰ ساله به معادل‌های سالانه محاسبه می‌شوند. نتایج گزارش‌شده، میانگین‌های سالانه در دوره ۳۰ ساله (معادل‌های سالانه) هستند که امکان مقایسه مستقیم میان اقدامات سالانه، مانند کشت گیاهان پوششی و مصرف کود دامی، و سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت، مانند کاشت و استقرار درختان، را فراهم می‌کنند.

فرمول‌بندی مدل

مدل شامل متغیرهای تصمیم‌گیری و متغیرهای پیامد برای پذیرش گیاهان پوششی، انتشار آلاینده‌های خاک و شاخص‌های مرتبط با خاک‌زیرین است. پذیرش گیاهان پوششی به‌صورت یک متغیر دودویی (Binary variable) تعریف می‌شود، در حالی که مساحت مؤثر و کل گیاهان پوششی در هر قطعه زمین، آثار مرتبط با صرفه‌جویی در مصرف آب، انتشار N_2O از خاک، و شاخص‌های جانشین خاک زیرین برای بهبود کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک، به‌عنوان متغیرهای پیوسته و مثبت در نظر گرفته می‌شوند.

این متغیرها از طریق مجموعه‌ای از معادلات به یکدیگر مرتبط می‌شوند و مساحت گیاهان پوششی نیز با استفاده از یک رویکرد خطی‌سازی استاندارد بر مبنای متغیر دودویی پذیرش، مدل‌سازی می‌شود.

پذیرش گیاهان پوششی از طریق یک روش خطی‌سازی بازنمایی می‌شود که متغیر دودویی انتخاب را به سطح زیرکشت محصول مرتبط می‌سازد (رابطه ۴– ۱):

$$ {}^{\mathrm{Plant}}_{\mathrm{y.f.c'.c}}\mathrm{V} \quad \Sigma_{\prime c} \geq {}^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{y.f.c'.c}}\mathrm{V} \qquad (۱)$$

$$ {}^{\mathrm{CoverSel}}_{\mathrm{y.f}}\mathrm{V},\ {}^{\mathrm{Land}}_{\mathrm{f}}\mathrm{P} \geq {}^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{y.f.c}}\mathrm{V} \qquad (۲)$$

$$ {}^{\mathrm{CoverSel}}_{\mathrm{y.f}}\mathrm{V},\ {}^{\mathrm{Land}}_{\mathrm{f}}\mathrm{P} \geq {}^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{y.f.c}}\mathrm{V} \qquad (۳)$$

$$ \mathrm{P}^{\mathrm{Land}}_{\mathrm{f}}\left(1-\mathrm{V}^{\mathrm{CoverSel}}_{\mathrm{y.f}}\right) - {}^{\mathrm{Plant}}_{\mathrm{y.f.c'.c}}\mathrm{V}\ \Sigma_{\prime c} \geq {}^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{y.f.c'.c}}\mathrm{V} \qquad (۴)$$

در اینجا، y نشان‌دهنده سال، f نشان‌دهنده مزرعه (قطعه زمین) و c نشان‌دهنده محصول هستند. $V^{Cover\ Sel}_{y.f}$ یک متغیر دودویی است که پذیرش گیاهان پوششی را نشان می‌دهند. $V^{CC}_{y,f,c}$ بیانگر سطح زیرکشت محصول بهره‌مند از گیاهان پوششی (هکتار) است، در حالی‌که $V^{Plant}_{y,f,c',c}$ سطح زیرکشت محصولات زراعی را نشان می‌دهد و P^{Land}_{f} بیانگر اراضی در دسترس در هر مزرعه است.

یک مجموعه از قیود کران بالا و کران پایین تضمین می‌کند که در صورت پذیرش گیاهان پوششی، سطح مؤثر گیاهان پوششی برابر با سطح بهینه زیرکشت محصول خواهد بود و در غیر این صورت، این مقدار به صفر محدود می‌شود.

اثرات صرفه‌جویی در مصرف آب ناشی از گیاهان پوششی

بر اساس سطح مؤثر گیاهان پوششی که در بالا تعریف شد، اثر صرفه‌جویی در مصرف آب به‌صورت رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$ {}^{\mathrm{CC}}_{\mathrm{y,f,c}}\mathrm{V}\ .\ {}^{\mathrm{WSF}}_{\mathrm{c}}\mathrm{k}\ \Sigma_{\mathrm{f,c}}\ \mathrm{W} = {}^{\mathrm{WaterSave}}_{\mathrm{y}}\mathrm{V} \qquad (۵)$$

در اینجا، ${}^{\mathrm{WSF}}_{\mathrm{c}}\mathrm{k}$ نشان‌دهنده ضریب نسبی صرفه‌جویی در مصرف آب مرتبط با بهبود خاک زیرین است. بر اساس سطح مؤثر گیاهان پوششی، اثر صرفه‌جویی در مصرف آب به‌عنوان تابعی از نیاز آبی اختصاصی هر محصول محاسبه و در قید مربوط به مصرف آب در مدل لحاظ می‌شود.

انتشار مستقیم اکسید نیتروژن (N_2O) از خاک

انتشار مستقیم گاز اکسیدنیتروژن (N_2O) از خاک بر اساس ورودی‌های نیتروژن حاصل از کودهای معدنی و کود دامی محاسبه می‌شود. برای تبدیل N_2O-N به جرم کل N_2O، از یک ضریب تبدیل استفاده می‌گردد که مطابق با رویه‌های استاندارد حسابداری انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Muthu, 2015). در این محاسبه، تنها جزء نیتروژنی کودها در نظر گرفته می‌شود. به‌صورت ریاضی، انتشار N_2O از خاک به‌صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$ \left(\left({}^{\mathrm{Manure}}_{\mathrm{f}}\mathrm{N} + {}^{\mathrm{Mineral}}_{\mathrm{f}}\mathrm{N}\right)\right).\mathrm{GWP}_{\mathrm{N2O}}.\lambda_{\mathrm{N2O}}.\mathrm{EF}_{\mathrm{N2O}} = {}^{\mathrm{GHG}}_{\mathrm{SoilN2O}}\mathrm{V} \qquad (۶)$$

در اینجا، EF_{N2O} نشان‌دهنده ضریب انتشار مستقیم، λ_{N2O} ضریب تبدیل از نیتروژن (N) به اکسید نیتروژن (N_2O) و GWP_{N2O} پتانسیل گرمایش جهانی در افق ۱۰۰ ساله است. همچنین، $N^{Mineral}_{f}$ نشان‌دهنده نیتروژن حاصل از کودهای معدنی در مزرعه f و N^{Manure}_{f} نشان‌دهنده نیتروژن حاصل از کود دامی آلی اعمال‌شده در همان مزرعه هستند. این فرمول‌بندی یک نمایش خطی را از انتشار N_2O از خاک ارائه می‌دهد که برای ادغام در چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (mixed-integer linear programming, MILP) مناسب است.

شاخص‌های جانشین برای بهبود خاک زیرین

برای بازنمایی بهبودهای بلندمدت خاک زیرین که به طور مستقیم در عملکردهای کوتاه‌مدت محصولات منعکس نمی‌شوند، دو شاخص جانشین، شامل افزایش کربن آلی خاک (Soil Organic Carbon, SOC) و کاهش تراکم خاک زیرین (Compaction Relief)، معرفی می‌شوند.

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

این شاخص‌ها به‌صورت شاخص‌های تجمعی و مبتنی‌بر گستره اجرای شیوه‌های ASM ساخته می‌شوند، و به‌ترتیب در معادلات ۷ و ۸ آورده شده‌اند:

$$\sum_{y,f,s,t}^{AreaAF} k_{Cover}^{SOC} \sum_f V_{y,f}^{CoverArea} + k_{Manure}^{SOC} \sum_f (V_{y,f}^{UseManure}) + k_{Trees}^{SOC} \sum_{f,s,t} V = {}^{SOC}_{y}V \quad (۷)$$

$$\sum_{y,f,s,t}^{AreaAF} k_{Cover}^{Comp} \sum_f V_{y,f}^{CoverArea} + k_{Manure}^{Comp} \sum_f (V_{y,f}^{UseManure}) + k_{Trees}^{Comp} \sum_{f,s,t} V = {}^{Comp}_{y}V \quad (۸)$$

در اینجا، ${}^{SOC}_{y}V$ و ${}^{Comp}_{y}V$ به‌ترتیب شاخص‌های جانشین برای افزایش SOC خاک و کاهش تراکم خاک زیرین در سال y را نشان می‌دهند و ضرایب k مربوط به هر یک از شیوه‌های مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین ASM هستند.

این ضرایب، سهم کالیبره‌شده هر اقدام به‌عنوان یک شاخص جانشین را نشان می‌دهند و به هیچ‌وجه بیانگر اندازه‌گیری مستقیم موجودی واقعی کربن آلی خاک نیستند. این ضرایب در واقع سهم نسبی گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی و جنگل‌داری کشاورزی را در افزایش کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک‌زیرین بازنمایی می‌کنند.

طراحی سناریو

برای ارزیابی اثرات ASMهای خاک‌زیرین مورد بررسی در این پژوهش، پنج سناریو تعریف و با استفاده از مدل یکپارچه زیست‌اقتصادی مزرعه شبیه‌سازی شدند:

۱- CONVENTIONAL: سیستم پایه بدون هیچ‌یک از مؤلفه‌های ASM؛ در این سناریو گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی و درختان جنگل‌داری کشاورزی غیرفعال هستند.

۲- ASM_Cover: استفاده از گیاهان پوششی در تمام اراضی واجد شرایط الزامی است؛ سایر مؤلفه‌های ASM غیر فعال باقی می‌مانند.

۳- ASM_Manure:کاربرد کود دامی بدون محدودیت بالایی مجاز است؛ سایر مؤلفه‌های ASM غیر فعال هستند.

۴- ASM_Tree: سطح درختان در سیستم جنگل‌داری کشاورزی فعال می‌شود (با شروع از پیکربندی پایه در سال اول)؛ سایر مؤلفه‌های ASM غیر فعال هستند.

۵- ASM_All: تمامی مؤلفه‌های ASM شامل گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی و درختان جنگل‌داری کشاورزی به‌طور هم‌زمان فعال می‌شوند.

تفکیک سناریوها از طریق اعمال قیود ویژه هر سناریو بر متغیرهای تصمیم‌گیری مربوطه انجام می‌شود، در حالی‌که سایر مؤلفه‌های ASM در هر سناریو غیر فعال باقی می‌مانند. مدل به‌صورت مستقل برای هر سناریو حل می‌شوند و نتایج در چارچوب MCDA ارزیابی می‌شوند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از توسعه مدل زیست‌اقتصادی MODAM نشان می‌دهند که ادغام ASMهای خاک‌زیرین در چارچوب تصمیم‌گیری مزرعه، امکان تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و خاکی را فراهم می‌سازد. در این چارچوب، مداخلات شامل گیاهان پوششی، کاربرد کود دامی و تلفیق درختان، از طریق جنگلداری کشاورزی به‌صورت مستقل و ترکیبی در مدل بازنمایی شده‌اند.

هر یک از مؤلفه‌های ASM دارای اثرات متفاوت و ناهمگن بر شاخص‌های پایداری هستند و هیچ مداخله منفردی قادر به ایجاد تعادل کامل میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی نیست. در مقابل، رویکردهای ترکیبی که شامل ادغام چندین مؤلفه به‌طور هم‌زمان هستند، الگوی متعادل‌تری از عملکرد پایداری را ایجاد و امکان بهبود هم‌زمان چندین بعد عملکردی را فراهم می‌کنند.

از منظر تحلیلی، نتایج نشان می‌دهند که میان اهداف مختلف پایداری، از جمله سودآوری اقتصادی، مصرف منابع، فشارهای زیست‌محیطی و شاخص‌های کیفیت خاک زیرین، trade-offs ساختاری وجود دارند. برخی مداخلات می‌توانند به بهبود هم‌زمان چند شاخص منجر شوند، در حالی‌که برخی دیگر موجب افزایش فشار بر منابع یا هزینه‌های مدیریتی می‌گردند. همچنین، مشخص شد که اثرات مرتبط با بهبود خاک زیرین، به‌ویژه در حوزه کربن آلی خاک و کاهش تراکم خاک، عمدتاً در سناریوهای ترکیبی و بلندمدت برجسته‌تر می‌شوند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت نگاه سیستمی و یکپارچه در ارزیابی شیوه‌های مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی است. از منظر مفهومی، نتایج بیانگر آن هستند که بخشی از منافع ناشی از شیوه‌های ASM ماهیت بیرونی دارند و در تصمیم‌گیری اقتصادی کشاورزان به‌طور کامل منعکس نمی‌شوند. بنا بر این، در غیاب سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های هدفمند، پذیرش این شیوه‌ها ممکن است به سطح بهینه اجتماعی نرسد. در نهایت، چارچوب مدل توسعه‌یافته نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی زیست‌اقتصادی با شاخص‌های جانشین خاک زیرین می‌تواند ابزار مناسبی برای تحلیل هم‌زمان پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در نظام‌های کشاورزی پیچیده باشد.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه با توسعه یک چارچوب زیست‌اقتصادی برای ادغام شیوه‌های مدیریت کشاورزی–اکولوژیکی خاک زیرین نشان می‌دهد که درک پایداری نظام‌های کشاورزی نیازمند تحلیل هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و خاکی است. بر اساس یافته‌های تحقیق، مداخلات مرتبط با خاک زیرین اثرات ناهمگن بر شاخص‌های پایداری دارند و هیچ مداخله منفردی قادر به ایجاد تعادل کامل میان اهداف چندگانه نیست. در مقابل، رویکردهای ترکیبی نقش مؤثرتری در بهبود عملکرد کلی سیستم ایفا می‌کنند. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که بخشی از اثرات این مداخلات در قالب منافع بیرونی ظاهر می‌شود که در تصمیم‌گیری اقتصادی کشاورزان به‌طور کامل منعکس نمی‌شود؛ بنا بر این، نقش سیاست‌های حمایتی در تسهیل پذیرش آن‌ها کلیدی است. در مجموع، چارچوب ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی تصمیم‌گیری و طراحی سیاست‌های کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/efs.2026.89]

References

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335–345. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x

Bayá, G., Canale, E., Nesmachnow, S., Robledo, F., & Sartor, P. (2022). Production Optimization in a Grain Facility through Mixed-Integer Linear Programming. *Applied Sciences*, 12(16), 8212. https://doi.org/10.3390/app12168212

Bock, H. W., & Fleishman, S. M. (2025). Apple root channels continue to shape subsoil microarthropod communities more than a decade after orchard removal. *Pedobiologia*, 113, 151098. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2025.151098

Cherkaoui-Dekkaki, O., Bouhmady, A., & Benamara, I. (2025). Multi-objective optimal control of a bioenergy–soil system under fertility constraints. *Nonlinear Science*, 5, 100072. https://doi.org/10.1016/j.nls.2025.100072

Flichman, G., & Allen, T. (2014). Bio-economic modeling: State-of-the-art and key priorities. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI). https://hdl.handle.net/10568/151113

Geissler, C. H., Haan, N. L., Basso, B., Fowler, A., Landis, D. A., Lark, T. J., & Maravelias, C. T. (2025). A multi-objective optimization model for cropland design considering profit, biodiversity, and ecosystem services. *Ecological Modelling*, 500, 110954. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110954

Hildemann, M., Pebesma, E., & Verstegen, J. A. (2023). Multi-objective Allocation Optimization of Soil Conservation Measures Under Data Uncertainty. *Environmental Management*, *72*(5), 959–977. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01837-6

Hosseini-Yekani, S.-A., Tomaczewski, S., & Zander, P. (2024). Model-Based Valuation of Ecosystem Services Using Bio-Economic Farm Models: Insights for Designing Green Tax Policies and Payment for Ecosystem Services. *Agriculture*, *15*(1), 60. https://doi.org/10.3390/agriculture15010060

Liang, X., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y., & Yin, D. (2025). Integrated Management Practices Foster Soil Health, Productivity, and Agroecosystem Resilience. *Agronomy*, *15*(8), 1816. https://doi.org/10.3390/agronomy15081816

Meyer-Aurich, A., Schuler, J., Auerswald, K., Zander, P., & Kächele, H. (2001). Trade off of soil protection–assessing the economic consequences of erosion control. Multidisciplinary Approaches to Soil Conservation Strategies. *ZALF-Bericht,* 47, 161-166.

Muthu, S. S. (Ed.). (2015). Methodology for Carbon Footprint Calculation in Crop and Livestock Production. In *The Carbon Footprint Handbook* (0 ed., pp. 80–103). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18929-7

Reith, E., Gosling, E., Knoke, T., & Paul, C. (2022). Exploring trade-offs in agro-ecological landscapes: Using a multi-objective land-use allocation model to support agroforestry research. *Basic and Applied Ecology*, 64, 103–119. https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.08.002

Schuler, J., & Kächele, H. (2003). Modelling on-farm costs of soil conservation policies with MODAM. *Environmental Science & Policy*, 6(1), 51–55. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00124-7

Schuler, J., & Sattler, C. (2010). The estimation of agricultural policy effects on soil erosion—An application for the bio-economic model MODAM. *Land Use Policy*, 27(1), 61–69. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.05.001

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006

Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Olesen, J. E., Crews, T. E., Hinsinger, P., Kirkegaard, J., Pierret, A., & Dresbøll, D. B. (2020). Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. *Trends in Plant Science*, *25*(4), 406–417. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.007

[Downloaded from efs.sanru.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/efs.2026.89]