Sustainable Urban & Regional Development Studies Quarterly

Volume 7, Issue 2 - Serial Number 24, Summer 2026 **Online ISSN: 2783- 0764**
Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_223374.html?lang=en

The role of biofuels in the sustainable development of the agricultural supply chain: using artificial computational intelligence methods

Lotfollah Maleki[1*], Sina Ardabili [2],Fatemeh Hashemi [3]
[1.] Assistant Professor, Department of Geography and Urban and Rural Planning, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[2.] Assistant Professor, Renewable Energy, Department of Advanced Engineering, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[3.] MSc, Renewable Energy, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received Date: 15 April 2025 **Accepted Date:** 20 June 2025

Abstract

Background and Objective: With increasing environmental pressures and the growing need for clean energy, the use of biofuels has been considered as a solution to improve the sustainability of the agricultural supply chain. This study aimed to analyze the role of biofuels in the sustainable development of the agricultural supply chain using a systematic, focus group, and computational intelligence-based modeling approach.

Methodology: In the first stage, a systematic review method based on the PRISMA guideline was used to identify key variables. With the participation of 20 experts in the focus group format, the most important influential parameters, including biofuel production technology, support policies, energy infrastructure, and economic and environmental indicators, were identified. Subsequently, random forest algorithms and Relief feature selection were used to analyze the data.

Results and Findings: The modeling showed that the random forest algorithm was able to effectively cluster supply chains with different levels of sustainability with an accuracy of 85% (AUC=0.98). Clustering indicated that indicators such as direct employment generation in rural areas, pollution reduction, energy cost reduction, and distance to processing centers had the greatest impact on promoting sustainability, while the type and amount of biofuel consumed had a lesser impact. The findings indicate that sustainable development of the agricultural supply chain requires a focus on improving production technologies, biofuel infrastructure, targeted support policies, and educational programs for farmers.While providing a new framework for integrating renewable energies into the agricultural supply chain, it can provide a basis for policy decisions and optimization strategies to achieve sustainable development in the agricultural sector of Iran and other developing countries.

Keywords: Biofuel, Sustainable development, Agricultural supply chain, Computational intelligence, Random forest.

[*] **Correspong Author Email:** l.maleki@uma.ac.ir
Cite this article: Maleki Masoomabad,L. , Ardabili,S. and Hashemi,F. (2026). The role of biofuels in the sustainable development of the agricultural supply chain: using artificial computational intelligence methods. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, *7*(2), 390-409.

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

دوره ۷، شماره ۲، شماره پیاپی ۲۴، تابستان ۱۴۰۵ شاپا:۰۷۶۴-۲۷۸۳

Journal Hompage https://www.srds.ir/
https://www.srds.ir/article_223374.html?lang=fa

نقش زیست سوخت‌ها در توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی: با بهره‌گیری از روش هوش محاسباتی مصنوعی

لطف اله ملکی [۱*]، سینا اردبیلی [۲]، فاطمه هاشمی [۳]

۱ .استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری و روستایی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲ .استادیار، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی نوین، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳. کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم و فناوری‌های کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: با افزایش فشارهای زیست‌محیطی و نیاز روزافزون به انرژی‌های پاک، استفاده از زیست‌سوخت‌ها به‌عنوان راهکاری در بهبود پایداری زنجیره تأمین کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است هدف تحلیل نقش زیست‌سوخت‌ها در توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی، با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی سیستماتیک، گروه کانونی، و مدل‌سازی مبتنی بر هوش محاسباتی انجام گرفت.

روش‌شناسی: در مرحله اول، از روش مرور سیستماتیک بر پایه دستورالعمل PRISMA برای شناسایی متغیرهای کلیدی استفاده شد. با مشارکت ۲۰ خبره در قالب گروه کانونی، مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار از جمله فناوری تولید زیست‌سوخت، سیاست‌های حمایتی، زیرساخت‌های انرژی، و شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی شناسایی شد. در ادامه، برای تحلیل داده‌ها از الگوریتم‌های جنگل تصادفی و انتخاب ویژگی Relief بهره گرفته شد.

نتایج و یافته‌ها: مدل‌سازی نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با دقت ۸۵٪ (AUC=0.98) توانسته است به‌طور مؤثر زنجیره‌های تأمین با سطوح مختلف پایداری را خوشه‌بندی کند. خوشه‌بندی حاکی از آن بود که شاخص‌هایی نظیر اشتغال‌زایی مستقیم در روستا، کاهش آلایندگی، کاهش هزینه انرژی و فاصله تا مراکز فرآوری بیشترین تأثیر را در ارتقاء پایداری ایفا می‌کنند، در حالی که نوع و مقدار زیست‌سوخت مصرفی تأثیر کمتری داشته‌اند. یافته‌ها بیانگر آن است که توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی نیاز به تمرکز بر بهبود فناوری‌های تولید، زیرساخت‌های زیست‌سوختی، سیاست‌های حمایتی هدفمند و برنامه‌های آموزشی برای کشاورزان است. یافته های این مطالعه، ضمن ارائه چارچوبی نوین برای ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در زنجیره تأمین کشاورزی، می‌توانند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های سیاستی و راهبردهای بهینه‌سازی در راستای تحقق توسعه پایدار در بخش کشاورزی ایران و سایر کشورهای در حال توسعه باشند.

کلید واژه‌ها: زیست‌سوخت، توسعه پایدار، زنجیره تأمین کشاورزی، هوش محاسباتی، جنگل تصادفی.

*نویسنده مسئول: l.maleki@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: ملکی معصوم آباد,لطف اله , اردبیلی,سینا و هاشمی,فاطمه . (۱۴۰۵). نقش زیست سوخت ها در توسعه پایدار زنجیره تامین کشاورزی: با بهره گیری از روش هوش محاسباتی مصنوعی. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای, ۷(۲), ۳۹۰-۴۰۹.

مقدمه و بیان مسأله

با افزایش جمعیت جهانی و روند صعودی تقاضا برای منابع غذایی، چالش‌های متعدد در برابر کشاورزی مدرن پدیدار شده است (کامبل و همکاران، ۲۰۲۰، کندوال و همکاران،۲۰۲۱).

یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی مانند خاک و آب است که منجر به کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی و تشدید بحران‌های زیست‌محیطی می‌شود (موخرچی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه‌براین، آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، مانند استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و سموم، به سلامت اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی آسیب می‌زند. این وضعیت در کنار افزایش وابستگی به انرژی‌های فسیلی که باعث تشدید تغییرات اقلیمی می‌شود، ضرورت اتخاذ رویکردهای جدید و پایدار در بخش کشاورزی را بیش از پیش نمایان می‌سازد (نرولا و ریج، ۲۰۲۳). در این راستا، تحول در زنجیره تأمین کشاورزی و حرکت به‌سوی الگوهای پایدار به یکی از اولویت‌های اصلی برای کاهش آثار منفی زیست‌محیطی و افزایش کارایی منابع تبدیل شده است. یکی از راهکارهای نوآورانه در این زمینه، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به‌ویژه زیست‌سوخت‌ها است. زیست‌سوخت‌ها که از منابع تجدیدپذیر نظیر گیاهان و ضایعات کشاورزی تولید می‌شوند، علاوه‌بر اینکه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند، می‌توانند به‌عنوان منابع انرژی پاک در فرآیندهای مختلف کشاورزی و صنایع وابسته مورد استفاده قرار گیرند. این امر نه تنها وابستگی به منابع انرژی فسیلی را کاهش می‌دهد بلکه پتانسیل ایجاد انرژی در مقیاس محلی را نیز فراهم می‌آورد (بنابی و همکاران، ۲۰۱۷).

زیست‌سوخت‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی و پایداری زنجیره تأمین کشاورزی نقش مهمی ایفا کنند. استفاده از این منابع انرژی می‌تواند به‌طور مؤثری بهره‌وری انرژی را در مراحل مختلف زنجیره تأمین افزایش دهد (اوودو و ژانگ، ۲۰۱۲). از کاشت و برداشت محصولات کشاورزی گرفته تا فرآوری و حمل و نقل، زیست‌سوخت‌ها قادرند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند و در نتیجه هزینه‌های تولید را کاهش داده و اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. در این مقاله، به بررسی نقش حیاتی زیست‌سوخت‌ها در بهینه‌سازی زنجیره تأمین کشاورزی و تأثیر آن‌ها بر پایداری سیستم‌های کشاورزی پرداخته خواهد شد (اوماکاند و همکاران، ۲۰۲۲، دیس پودی و همکاران، ۲۰۲۲).

زنجیره تأمین کشاورزی، که از مراحل تولید و برداشت محصول آغاز شده و تا فرآوری، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و توزیع ادامه دارد، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و بهره‌وری منابع ایفا می‌کند. این زنجیره به‌عنوان یک شبکه پیچیده از فعالیت‌ها و فرآیندها، تضمین‌کننده جریان مداوم محصولات کشاورزی از مزرعه به مصرف‌کننده است. در این مسیر، هرگونه اختلال در هر یک از مراحل مختلف می‌تواند تأثیرات منفی بر کل سیستم داشته باشد. به‌ویژه، در شرایط فعلی که فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضا برای منابع غذایی در حال افزایش است، بهبود کارایی و عملکرد زنجیره تأمین کشاورزی از اهمیت دوچندان برخوردار است (دیسپودی و همکاران، ۲۰۲۱).

این زنجیره به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به منابع انرژی وابسته است، زیرا انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات مختلف کشاورزی از جمله کاشت، برداشت، آبیاری، فرآوری و حمل‌ونقل محصولات ضروری است (نگوتو، ۲۰۱۸). به‌ویژه در فرآیندهایی مانند آبیاری، که مصرف بالای انرژی در آنها مشاهده می‌شود، یا فرآوری محصولات که نیاز به ماشین‌آلات پیچیده و مصرف انرژی بالا دارد، بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد داشته باشد. همچنین، حمل‌ونقل محصولات کشاورزی، که به‌ویژه در مناطق دورافتاده و با دسترسی محدود به منابع انرژی صورت می‌گیرد، نیز می‌تواند یکی از منابع عمده هدررفت انرژی و منابع باشد (برو و بولت، ۲۰۲۱).

اصلاح و بهینه‌سازی زنجیره تأمین کشاورزی از منظر منابع انرژی نه تنها به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند بلکه می‌تواند در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نیز مؤثر باشد. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک، مانند زیست‌سوخت‌ها و انرژی‌های خورشیدی، می‌تواند به‌طور چشمگیری وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط‌زیست را محدود کند. بهبود فرآیندها و کاهش مصرف انرژی در این

زنجیره به‌ویژه در بخش‌های حیاتی مانند حمل‌ونقل و فرآوری، می‌تواند به تقویت پایداری اقتصادی و اجتماعی بخش کشاورزی و در نتیجه امنیت غذایی پایدار کمک کند (اوتسوکو و فان، ۲۰۲۱).

زیست‌سوخت‌ها به سوخت‌هایی اطلاق می‌شوند که از منابع زیستی و تجدیدپذیر تولید می‌شوند، از جمله پسماندهای کشاورزی، چوب، محصولات دامی، و گیاهان انرژی‌زا. این سوخت‌ها در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، علاوه‌بر مزایای زیست‌محیطی، از لحاظ اقتصادی نیز مزایای قابل‌توجهی دارند. زیست‌سوخت‌ها به‌طور عمده در سه نوع بیوگاز، بیواتانول، و بیودیزل تولید می‌شوند. این سوخت‌ها هرکدام به‌طور مستقل یا ترکیبی قادرند تا سوخت‌های فسیلی را در بسیاری از کاربردها جایگزین کنند، از جمله در حمل‌ونقل، تولید برق، و گرمایش (باسو، ۲۰۲۱).

در بخش کشاورزی، زیست‌سوخت‌ها کاربردهای گسترده‌ای دارند که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در این بخش کمک کند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها تأمین انرژی برای ماشین‌آلات کشاورزی است، به‌ویژه برای دستگاه‌هایی که در فرآیندهای کاشت، برداشت، و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می‌شوند. علاوه‌براین، زیست‌سوخت‌ها در تأمین انرژی برای پمپ‌های آبیاری و سیستم‌های گرمایش گلخانه‌ها کاربرد دارند، که می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی شود (بلاگت و استیفان، ۲۰۱۰).

استفاده از زیست‌سوخت‌ها در کشاورزی علاوه‌بر بهبود بهره‌وری اقتصادی، مزایای زیست‌محیطی قابل‌توجهی نیز دارد. این سوخت‌ها به کاهش وابستگی به انرژی وارداتی کمک می‌کنند و در عین حال باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند، که نقش مهمی در مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. همچنین، با استفاده از منابع تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی، می‌توان به حفظ منابع طبیعی و پایداری اکولوژیکی کمک کرد، که در نهایت موجب پایداری بلندمدت بخش کشاورزی و امنیت غذایی خواهد شد (بانده و مالا، ۲۰۲۲).

توسعه پایدار در کشاورزی به معنای استفاده از منابع طبیعی به‌گونه‌ای است که ضمن تأمین نیازهای فعلی، ظرفیت آن‌ها برای نسل‌های آینده نیز حفظ شود. این نوع توسعه بر سه پایه اصلی استوار است: حفظ منابع طبیعی، افزایش بهره‌وری و عدالت اجتماعی. استفاده از زیست‌سوخت‌ها به‌عنوان بخشی از راهبردهای انرژی پایدار، می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی کشاورزی، کاهش هزینه‌های انرژی، و تقویت اقتصاد محلی ایفا کند. همچنین، بهره‌گیری از پسماندهای کشاورزی و دامی برای تولید سوخت، به مدیریت بهتر ضایعات، تولید کود آلی و افزایش چرخه بهره‌وری کمک می‌کند که همگی در راستای توسعه‌ای پایدار و فراگیر در کشاورزی قرار دارند (لال و استیفاند، ۲۰۰۹ ،اسچانبف، ۲۰۱۰). در اینجا سوالی که به وجود می آید این است که با توجه به اهمیت حرکت به سمت به کارگیری از زیست سوخت ها، نقش آن ها در پایداری زنجیره تامین کشاورزی چه خواهد بود؟

اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، بررسی و تحلیل نقش زیست‌سوخت‌ها در ارتقاء پایداری زنجیره تأمین کشاورزی است. این پژوهش در تلاش است تا با شناسایی کاربردهای مختلف زیست‌سوخت‌ها در مراحل تولید، فرآوری، حمل‌ونقل و مصرف محصولات کشاورزی، تأثیر آن‌ها را بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، و افزایش بهره‌وری انرژی مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین، پژوهش حاضر در پی آن است تا میزان آگاهی، ظرفیت استفاده، و چالش‌های اجرایی مربوط به به‌کارگیری زیست‌سوخت‌ها در نظام‌های کشاورزی ایران را بررسی کرده و راهکارهایی کاربردی برای تقویت جایگاه این نوع انرژی‌ها در چارچوب توسعه پایدار ارائه دهد. نوآوری پژوهش حاضر در تمرکز هم‌زمان بر سه محور کلیدی یعنی زنجیره تأمین کشاورزی، زیست‌سوخت‌ها و استفاده از قابلیت هوش محاسباتی مصنوعی نهفته است؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین یا به‌صورت جداگانه بررسی شده یا از منظر پایداری نادیده گرفته شده است. این پژوهش با رویکردی سیستم‌محور، تلاش می‌کند تا نقش زیست‌سوخت‌ها را به‌عنوان عاملی پیونددهنده میان تولید انرژی و پایداری زیست‌محیطی در کل زنجیره کشاورزی تحلیل کند. علاوه‌براین، با تأکید بر امکان بهره‌گیری

از پسماندهای کشاورزی به‌عنوان منبع تولید انرژی، این تحقیق می‌تواند الگویی برای بازچرخانی منابع و استفاده بهینه از ضایعات ارائه دهد که هم‌راستا با مفاهیم نوین اقتصاد چرخشی و کشاورزی هوشمند است.

مبانی نظری پژوهش

زیست سوخت ها

زیست‌سوخت‌ها به عنوان یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر، از مواد آلی زیستی مانند گیاهان، پسماندهای کشاورزی، جنگلی، و حتی زباله‌های آلی تولید می‌شوند. این نوع سوخت‌ها به دلیل تجدیدپذیر بودن، تولید گازهای گلخانه‌ای کمتر نسبت به سوخت‌های فسیلی، و قابلیت تولید در مقیاس محلی، به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی در جهت کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. زیست‌سوخت‌ها معمولاً به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: زیست‌سوخت جامد (مانند چوب و زغال زیستی)، زیست‌سوخت مایع (مانند بیواتانول و بیودیزل) و زیست‌سوخت گازی (مانند بیوگاز و گاز سنتزی) (بلایسیو، ۲۰۱۹).

بیواتانول معمولاً از تخمیر قندها و نشاسته موجود در محصولات کشاورزی مانند ذرت و نیشکر تولید می‌شود و می‌تواند به‌عنوان جایگزین یا افزودنی برای بنزین استفاده گردد. بیودیزل نیز از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی از طریق فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون تولید شده و به عنوان جایگزین مناسبی برای گازوئیل در موتورهای دیزلی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بیوگاز که از تجزیه بی‌هوازی مواد آلی حاصل می‌شود، قابلیت استفاده در تولید برق، گرمایش و حتی به‌عنوان سوخت خودروها را دارد (باسوو، ۲۰۲۱)

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و روند رو به رشد تقاضا برای انرژی، موجب شده تا توسعه فناوری‌های مرتبط با تولید، تصفیه و استفاده از زیست‌سوخت‌ها، در صدر اولویت‌های پژوهشی بسیاری از کشورها قرار گیرد. در این میان، بررسی کارایی انرژی، اثرات زیست‌محیطی، صرفه اقتصادی و یکپارچگی زیست‌سوخت‌ها با سیستم‌های موجود انرژی، از جمله جنبه‌های کلیدی در تحلیل و ارزیابی پتانسیل آن‌ها به‌شمار می‌رود (استری واستاوا و همکاران، ۲۰۲۰).

توسعه پایدار

توسعه پایدار مفهومی کلان و بین‌رشته‌ای است که به تعادل میان رشد اقتصادی، حفاظت زیست‌محیطی و عدالت اجتماعی می‌پردازد. در چارچوب این رویکرد، هدف آن است که نیازهای حال حاضر جوامع تأمین شود، بدون آنکه توان نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خود به خطر افتد. دستیابی به توسعه پایدار مستلزم اتخاذ سیاست‌ها و راهبردهایی است که مصرف منابع طبیعی، تولید آلودگی، و نابرابری‌های اجتماعی را کاهش داده و بهره‌وری، تاب‌آوری و عدالت را افزایش دهد (دلدا و باس، ۲۰۱۲). در این میان، زنجیره تأمین کشاورزی به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی نظام غذایی، نقش مهمی در تحقق توسعه پایدار ایفا می‌کند. توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی به معنای مدیریت مؤثر و پایدار تمام مراحل از تولید، پردازش و توزیع تا مصرف و بازیافت است، به‌گونه‌ای که هم نیازهای تغذیه‌ای جامعه برآورده شود و هم منابع طبیعی از قبیل آب، خاک و انرژی به‌طور منطقی و کارآمد مورد استفاده قرار گیرند. این نوع توسعه نیازمند رویکردهایی است که پایداری محیط‌زیستی، سودآوری اقتصادی و بهبود شرایط معیشتی کشاورزان و جوامع روستایی را به‌صورت همزمان دنبال کنند.

اجرای اصول توسعه پایدار در زنجیره تأمین کشاورزی، مستلزم به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند کشاورزی هوشمند، انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت پایدار منابع، و مدل‌های مشارکتی است که بتوانند در برابر تغییرات اقلیمی، نوسانات بازار و چالش‌های زیست‌محیطی تاب‌آوری ایجاد کنند. همچنین، شفافیت، ردیابی محصول، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و مشارکت ذی‌نفعان (از کشاورزان گرفته تا مصرف‌کنندگان نهایی) از ارکان اساسی در تحقق این هدف محسوب می‌شود (کاتیلا و همکان، ۲۰۱۹).

هوش محاسبات مصنوعی

هوش محاسباتی (Computational Intelligence) شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که شامل مجموعه‌ای از روش‌ها و الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های تکاملی، سیستم‌های فازی و الگوریتم‌های ازدحام ذرات است. این ابزارها به‌ویژه در حل مسائل پیچیده، چندهدفه، غیرخطی و همراه با عدم قطعیت، عملکرد بسیار مناسبی دارند. توانایی یادگیری از داده‌ها، سازگاری با شرایط پویا و ارائه پاسخ‌های تقریباً بهینه، این روش‌ها را به ابزارهایی کارآمد در تحلیل، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری در سامانه‌های پیچیده تبدیل کرده است (بورکو، ۲۰۱۹) .

در زمینه کشاورزی هوشمند، هوش محاسباتی نقش مهمی در بهینه‌سازی عملیات زراعی، مدیریت منابع، پیش‌بینی عملکرد محصول، پایش سلامت گیاهان و تحلیل داده‌های سنجش از دور ایفا می‌کند. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی تولید، سیستم‌های فازی برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای مدیریت نهاده‌ها، تنها بخشی از کاربردهای عملی هوش محاسباتی در کشاورزی هوشمند هستند. این فناوری‌ها به کشاورزان و مدیران کمک می‌کنند تا تصمیماتی مبتنی بر داده بگیرند و بهره‌وری را در کنار حفظ منابع طبیعی افزایش دهند(بورونل، ۲۰۲۲، آدین و بانسل، ۲۰۲۲).

هوش محاسباتی همچنین می‌تواند در مدیریت زنجیره تأمین کشاورزی نقش کلیدی داشته باشد. زنجیره تأمین کشاورزی، فرآیند پیچیده‌ای از مزرعه تا سفره است که شامل تولید، نگهداری، حمل‌ونقل، پردازش، بسته‌بندی، توزیع و فروش محصولات کشاورزی می‌شود. با بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند، می‌توان بر چالش‌هایی چون نوسانات قیمت، فسادپذیری محصولات، مدیریت موجودی و زمان‌بندی توزیع غلبه کرد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بهینه‌سازی می‌توانند مسیرهای حمل‌ونقل را بهینه، تقاضا را پیش‌بینی و اتلاف را کاهش دهند (هاشمی و کاسکر، ۲۰۲۳). یکپارچه‌سازی هوش محاسباتی با سامانه‌های کشاورزی هوشمند و زنجیره تأمین کشاورزی، نه‌تنها منجر به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری می‌شود، بلکه می‌تواند تاب‌آوری این زنجیره را در برابر چالش‌های محیطی و اقتصادی افزایش دهد. این رویکرد، زمینه‌ساز توسعه پایدار در کشاورزی و امنیت غذایی در مقیاس محلی و جهانی است و می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های کلان و برنامه‌ریزی استراتژیک بخش کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کند (لیاکوس و همکاران ،۲۰۱۸). هوش محاسباتی مصنوعی در علوم جغرافیا مزایای قاب توجهی را در زمینه شبیه سازی‌های واقع‌گرایانه از محیط‌های طبیعی و انسانی به وجود می‌آورد .

پیشینه پژوهش

توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی به‌عنوان یکی از مسائل کلیدی در تأمین امنیت غذایی و حفظ منابع طبیعی در دنیای امروز مطرح است. این موضوع از آنجا اهمیت پیدا می‌کند که کشاورزی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی است و افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی، در کنار چالش‌های محیط‌زیستی، فشار زیادی بر این بخش وارد کرده است. یکی از راهکارهای نوین و مؤثر در دستیابی به توسعه پایدار در کشاورزی، استفاده از زیست‌سوخت‌ها به‌عنوان منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر است. زیست‌سوخت‌ها به سوخت‌هایی اطلاق می‌شوند که از منابع زیستی و تجدیدپذیر مانند پسماندهای کشاورزی، گیاهان انرژی‌زا، چوب و محصولات دامی تولید می‌شوند و می‌توانند در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و بهبود بهره‌وری منابع کشاورزی نقش مؤثری ایفا کنند در پژوهش‌های مختلف، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، توجه زیادی به استفاده از زیست‌سوخت‌ها در بخش کشاورزی معطوف شده است.

مطالعه زیمس و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که رویکردهای متداول در طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی، به دلیل استفاده گذشته‌نگر از اصول ارزیابی چرخه عمر، صرفاً منجر به بهبودهای تدریجی زیست‌محیطی می‌شوند و در شناسایی مسیرهای بهینه با حداقل اثرات چرخه عمر ناتوان‌اند. این مطالعه بر لزوم طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار با در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد اقتصادی، محیطی و اجتماعی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تأکید دارد. به دلیل ناتوانی

ارزیابی چرخه عمر سنتی در تلفیق معیارهای اقتصادی، نیاز به پارادایمی نوین برای طراحی و بهینه‌سازی این زنجیره‌ها مطرح شده است.

در همین راستا، احمد و همکاران (۲۰۱۸) مدلی فازی برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی نسل دوم ارائه دادند که شامل منابع کشاورزی، حمل‌ونقل، پالایشگاه‌ها و مراکز بازار است. پارامترهای نامعین نظیر هزینه منابع، بازده زیست‌توده و تقاضا به‌صورت اعداد فازی مدل‌سازی شدند. نتایج حاصل از دو مثال عددی نشان داد که پالایشگاه‌ها با سهم ۵۲.۱۶٪ از کل هزینه، بیشترین تأثیر را در هزینه نهایی دارند.

مطالعه بلیر و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی ۳۷ مطالعه موردی برتر جهانی، ارتباط زنجیره‌های تأمین زیست‌توده و انرژی زیستی با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs) را تحلیل کرد و نشان داد که پیاده‌سازی یکپارچه این زنجیره‌ها با سیستم‌های موجود می‌تواند تأثیرات مثبتی بر پایداری داشته باشد.

اومکانز و همکاران (۲۰۲۲) نیز با مرور مواد اولیه، فناوری‌های تولید و مدل‌های بهینه‌سازی صنعتی، به قابلیت استفاده از زیست‌توده‌ها برای تولید انواع سوخت‌های جایگزین از جمله بیواتانول، متانول و هیدروژن پرداختند.

جمع‌بندی پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که ادغام زیست‌سوخت‌ها در زنجیره تأمین کشاورزی می‌تواند علاوه بر کاهش وابستگی به انرژی‌های وارداتی، موجب بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقاء تاب‌آوری در برابر چالش‌های اقلیمی شود.

با این حال، استفاده گسترده از زیست‌سوخت‌ها در کشاورزی هنوز با چالش‌هایی همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به محدودیت‌های فناوری، هزینه‌های بالای تولید، و مشکلات مربوط به زیرساخت‌ها اشاره کرد. در این راستا، برخی از پژوهش‌ها بر لزوم تحقیق و توسعه در زمینه بهبود فرآیندهای تولید زیست‌سوخت‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشاورزی تأکید دارند. علاوه‌براین، مطالعات به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، نشان داده‌اند که ترویج استفاده از زیست‌سوخت‌ها می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در افزایش تاب‌آوری کشاورزان در برابر تغییرات اقلیمی و بحران‌های انرژی عمل کند.

تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که زیست‌سوخت‌ها با قابلیت‌های متنوع خود می‌توانند در جهت توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی نقش مهمی ایفا کنند. با این حال، نیاز به تحقیق بیشتر در زمینه تکنولوژی‌های جدید، بهبود فرآیندها و کاهش هزینه‌های تولید زیست‌سوخت‌ها احساس می‌شود تا بتوان به‌طور گسترده‌تری از این منابع انرژی در کشاورزی استفاده کرد.

روش پژوهش

در این بخش، فرایند جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های اولیه طبق دستورالعمل‌های PRISMA توضیح داده شده است (شکل ۱). این روش مرور با هدف دستیابی به متغیرهای مستقل و وابسته در این پژوهش انجام گرفت. دستورالعمل PRISMAاز چهار مرحله کلیدی تشکیل شده است. اولین مرحله به شناسایی مطالعات آینده‌نگر اختصاص دارد. در این مرحله، با استفاده از پایگاه‌های داده Web of Science ، Scopusو Elsevier ، کلمات کلیدی مربوطه برای بازیابی مقالات مرتبط جستجو شدند. در نتیجه، ۶۶۶ رکورد پژوهشی بالقوه شناسایی گردید. مرحله بعدی، غربالگری سوابق شناسایی‌شده است. در این مرحله، ۱۲۳ رکورد به دلیل تکراری بودن یا فقدان اطلاعات مربوط به زیست سوخت ها حذف شدند. همچنین، ۱۰۵ رکورد پس از بررسی سرفصل‌ها و چکیده‌ها حذف گردید. در نهایت، ۵۳۸ مقاله برای ادامه غربالگری انتخاب شدند. مرحله سوم به ارزیابی واجد شرایط بودن اختصاص دارد که در آن ۲۱۲ رکورد برای بررسی بیشتر انتخاب گردید.

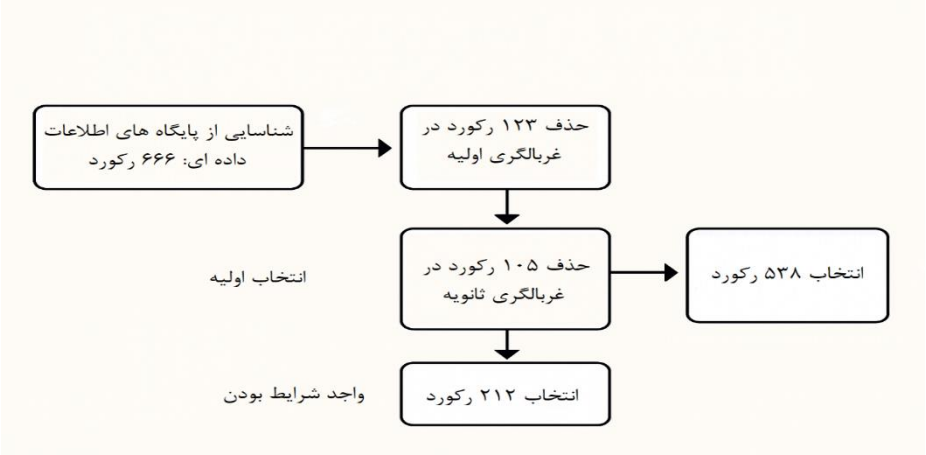

Figure 1- Steps for conducting a systematic review using the PRISMA method
شکل ۱- مراحل انجام مرور سیستماتیک به روش PRISMA

گروه کانونی

جهت تحلیل تعاملی متغیرها، یک گروه کانونی متشکل از ۲۰ متخصص تشکیل شد. ترکیب گروه شامل اساتید دانشگاه، پژوهشگران ارشد حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، زنجیره تأمین کشاورزی، و متخصصان هوش مصنوعی بود. جلسات به‌صورت حضوری و در دو نوبت برگزار شد. هر جلسه با تسهیل‌گری یک ناظر علمی و با استفاده از تکنیک‌های طوفان ذهنی ساختاریافته (Structured Brainstorming) و تحلیل دلفی اصلاح‌شده (Modified Delphi) انجام گرفت. پس از پیاده‌سازی جلسات، داده‌های حاصل از بحث‌های گروه کانونی به روش تحلیل مضمون (Thematic Analysis) بررسی شدند. متغیرهایی که با اجماع نسبی (بیش از ٪۷۵ توافق) همراه بودند، به عنوان متغیرهای نهایی انتخاب شدند. همچنین، برای تعیین روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته، از تکنیک تحلیل مسیر پیشنهادی متخصصان استفاده شد. متغیرهای منتخب به‌عنوان ورودی مدل‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ارزیابی تأثیرات متغیرها و پیش‌بینی رفتار سیستم، الگوریتم‌های ترکیبی شامل انفیس (شبکه تلفیقی عصبی-فازی) و روش انتخاب ویژگی Relief مورد استفاده قرار گرفت. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی صورت پذیرفت.

روش انتخاب ویژگی Relief

در این پژوهش، یکی از گام‌های کلیدی در فرآیند تحلیل داده‌ها، انتخاب ویژگی‌های مؤثر از میان حجم بالای اطلاعات خام می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، از الگوریتم Reliefبه‌عنوان یک روش آماری و مبتنی بر یادگیری استفاده شده است. این الگوریتم قادر است بدون وابستگی به مدل، نقش هر ویژگی را در تمایزگذاری بین نمونه‌های مختلف بررسی کرده و بر اساس آن، تنها اطلاعات مفید و معنادار را در اختیار مدل‌سازی نهایی قرار دهد.

الگوریتم Relief برای ارزیابی اهمیت هر ویژگی، از مقایسه میان نمونه‌های دارای برچسب مشابه و متفاوت بهره می‌برد. به‌بیان ساده، این الگوریتم ابتدا به‌صورت تصادفی یک نمونه از مجموعه داده‌ها را انتخاب کرده و سپس، دو همسایه نزدیک برای آن پیدا می‌کند؛ یکی از همان کلاس (نمونه هم‌کلاس) و دیگری از کلاس متفاوت (نمونه ناهم‌کلاس) . Reliefبررسی می‌کند که هر ویژگی تا چه حد در تمایز این دو نوع نمونه مؤثر است. اگر یک ویژگی در ایجاد تفاوت بین این دو نمونه نقش مؤثری داشته باشد، امتیاز بالاتری می‌گیرد. این فرآیند برای تعداد زیادی از نمونه‌ها تکرار می‌شود تا ارزیابی دقیقی از ارزش هر ویژگی به‌دست آید.

در مطالعه حاضر، ابتدا داده‌های مربوط به شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی زنجیره تأمین کشاورزی جمع‌آوری شدند که شامل اطلاعاتی در مورد استفاده از زیست‌سوخت‌ها، بهره‌وری منابع، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، وضعیت تولید محصولات کشاورزی، و سیاست‌های پایداری بودند. با توجه به تنوع و حجم بالای این داده‌ها، برای جلوگیری از ورود اطلاعات زائد به مدل شبکه عصبی مصنوعی و بهبود دقت پیش‌بینی، از Relief استفاده شد تا ویژگی‌هایی که بیشترین اثرگذاری را بر پایداری زنجیره تأمین دارند، شناسایی شود.

خروجی الگوریتم Relief به‌صورت یک رتبه‌بندی از ویژگی‌ها به‌دست آمد که در آن هر ویژگی امتیازی عددی بر اساس میزان مشارکت آن در تمایز بین نتایج مختلف داشت. آستانه‌ای برای حذف ویژگی‌های با امتیاز پایین تعیین شد و تنها ویژگی‌هایی که از اهمیت بالایی برخوردار بودند، به عنوان ورودی مدل هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند. این انتخاب هوشمندانه ویژگی‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی عملکرد شبکه عصبی داشت و موجب کاهش پیچیدگی محاسباتی، زمان آموزش مدل، و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری آن در تحلیل‌های آینده گردید.

روش جنگل تصادفی تلفیق یافته با Relief

در این مطالعه، از یک روش ترکیبی و نوآورانه شامل الگوریتم انتخاب ویژگی Relief و مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Random Forest) بهره‌گیری شده است. این رویکرد ترکیبی به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی، کاهش پیچیدگی مدل، و شناسایی ویژگی‌های کلیدی در تأثیر زیست‌سوخت‌ها بر پایداری زنجیره تأمین کشاورزی طراحی شده است. تلفیق این دو روش باعث می‌شود تا تنها مهم‌ترین ویژگی‌های داده وارد مدل یادگیری شوند، و سپس مدل قدرتمند و مقاوم جنگل تصادفی آن‌ها را تحلیل و طبقه‌بندی کند.

در گام نخست، الگوریتم Relief با هدف غربال‌گری ویژگی‌های مؤثر اجرا شد. این الگوریتم با بررسی تفاوت ویژگی‌ها میان نمونه‌های مشابه و غیرمشابه در طبقه‌بندی، به هر ویژگی یک وزن اختصاص می‌دهد که میزان اهمیت آن را در تشخیص تفاوت‌ها بیان می‌کند. پس از اجرایRelief ، ویژگی‌هایی که دارای امتیاز بالاتری بودند، به‌عنوان ورودی به مدل جنگل تصادفی داده شدند. این مرحله باعث حذف داده‌های زائد، کاهش نویز و بهبود کارایی الگوریتم یادگیری شد.

در مرحله بعد، مدل جنگل تصادفی (Random Forest) برای تحلیل داده‌های فیلترشده به کار گرفته شد. جنگل تصادفی یک الگوریتم یادگیری گروهی (ensemble learning) بر پایه مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری است. این مدل با ایجاد چندین درخت تصمیم‌گیری به‌صورت تصادفی و ترکیب نتایج آن‌ها، عملکردی پایدار و قابل اعتماد در مسائل پیچیده طبقه‌بندی و پیش‌بینی ارائه می‌دهد. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به توانایی مدیریت داده‌های دارای ابعاد بالا، مقابله با بیش‌برازش (overfitting) و تفسیرپذیری نسبی اشاره کرد.

تنظیم پارامترهای مدل جنگل تصادفی نقش مهمی در بهبود عملکرد آن دارد. در این تحقیق، پارامترهایی نظیر تعداد درخت‌ها(n_estimators) ، تعداد ویژگی‌هایی که در هر درخت بررسی می‌شود(max_features) ، عمق هر درخت (max_depth)و حداقل تعداد نمونه برای تقسیم گره‌ها (min_samples_split) به‌صورت تجربی و با استفاده از روش جست‌وجوی شبکه‌ای (Grid Search) بهینه شدند. تعداد درخت‌ها طوری انتخاب شد که تعادلی میان دقت مدل و زمان محاسباتی برقرار شود (۱۵۰ درخت). پارامتر max_features نیز برای ایجاد تنوع در بین درخت‌ها، معمولاً به‌صورت 'sqrt' تنظیم شد.

اجرای این روش نوآورانه به‌صورت گام‌به‌گام انجام شد: ابتدا داده‌ها از منابع مختلف گردآوری و پیش‌پردازش شدند، سپس ویژگی‌های کلیدی با Relief انتخاب شدند، و در نهایت این ویژگی‌ها به مدل جنگل تصادفی آموزش‌داده‌شده منتقل شدند. عملکرد نهایی مدل با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که ترکیب Relief و Random Forest می‌تواند با دقت بالا و توانایی تفسیر مؤلفه‌های مؤثر، به‌خوبی پتانسیل

زیست‌سوخت‌ها را در بهبود پایداری زنجیره تأمین کشاورزی تحلیل کند. این روش ضمن نوآوری در مدل‌سازی، می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌سازی‌های هوشمند در سیاست‌گذاری‌های انرژی-محور در بخش کشاورزی باشد.

تجزیه و تحلیل داده ها

نتایج مرور سیستماتیک

این بخش از مطالعه به ارائه نتایج مربوط به مرور سیستماتیک می پردازد. شکل ۲ نمودار مربوط به آمار مقالات انتشار یافته در این حوزه را نشان می دهد. مطابق با شکل ۲، مرور سیستماتیک انجام شده در این مطالعه نشان داد که توجه به نقش زیست‌سوخت‌ها در توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی طی دو دهه گذشته روندی افزایشی داشته است. بررسی مقالات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که تعداد مطالعات مرتبط از تنها ۱ مورد در سال ۲۰۰۴ به ۹۵ مورد در سال ۲۰۲۵ رسیده است.

روند انتشار طی سال‌های اولیه (۲۰۰۴-۲۰۱۰) با شیب ملایمی افزایش داشته و در این دوره، تعداد مقالات عمدتاً کمتر از ۱۰ مورد در سال بوده است. با این حال، از سال ۲۰۱۱ به بعد رشد آهسته‌ای آغاز شد که از سال ۲۰۱۶ شتاب بیشتری به خود گرفت. سال ۲۰۲۰ نقطه عطفی در این روند محسوب می‌شود، به طوری که تعداد مقالات از ۵۸ مورد در این سال به ۹۵ مورد در سال ۲۰۲۵ افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به دلیل رشد جهانی توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر، سیاست‌های کاهش کربن، و اهمیت یافتن امنیت غذایی و انرژی در زنجیره‌های تأمین کشاورزی باشد.

نمودار زمانی مقالات نشان می‌دهد که دهه سوم قرن بیست و یکم، دوره‌ای بحرانی در شکل‌گیری گفتمان جدید پیرامون نقش زیست‌سوخت‌ها در پایداری زنجیره‌های کشاورزی بوده است. افزایش قابل ملاحظه در تعداد مطالعات در سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ (از ۶۲ به ۹۵ مقاله) بیانگر شتاب‌گیری تحقیقات در این حوزه و تمرکز پژوهشگران بر بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، از جمله هوش مصنوعی، برای بهینه‌سازی مصرف زیست‌سوخت‌ها در بخش کشاورزی است.

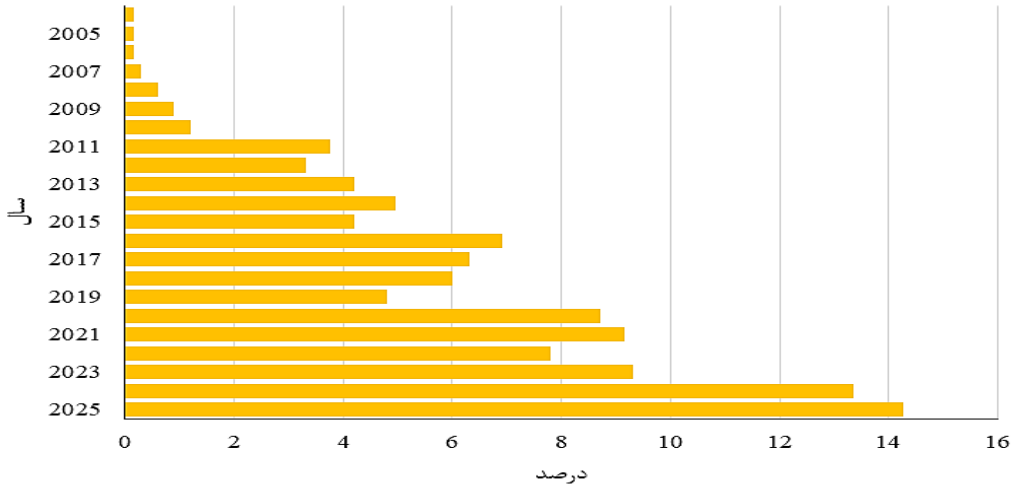

Figure 2 - Timeline of publications in this field (Scopus, 2025)

شکل ۲- تغییرات زمانی مربوط به انتشارات انجام شده در این زمینه (اسکوپوس، ۲۰۲۵)

شکل ۳ آمار نوع انتشارات انجام شده در این زمینه را نشان می دهد. مطابق با شکل ۳، مرور سیستماتیک انجام شده در این مطالعه نشان داد که توجه به نقش زیست‌سوخت‌ها در توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی طی دو دهه گذشته روندی افزایشی داشته است. بررسی مقالات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که تعداد مطالعات مرتبط از تنها ۱ مورد در سال ۲۰۰۴ به ۹۵ مورد در سال ۲۰۲۵ رسیده است.

روند انتشار طی سال‌های اولیه (۲۰۰۴-۲۰۱۰) با شیب ملایمی افزایش داشته و در این دوره، تعداد مقالات عمدتاً کمتر از ۱۰ مورد در سال بوده است. با این حال، از سال ۲۰۱۱ به بعد رشد آهسته‌ای آغاز شد که از سال ۲۰۱۶ شتاب بیشتری به خود گرفت. سال ۲۰۲۰ نقطه عطفی در این روند محسوب می‌شود، به طوری که تعداد مقالات از ۵۸ مورد در این سال به ۹۵ مورد در سال ۲۰۲۵ افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند به دلیل رشد جهانی توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر، سیاست‌های کاهش کربن، و اهمیت یافتن امنیت غذایی و انرژی در زنجیره‌های تأمین کشاورزی باشد.

از نظر نوع منابع، یافته‌ها نشان داد که اکثریت غالب مطالعات منتشرشده در قالب مقالات علمی (Journal Articles) بوده‌اند که با تعداد ۴۸۴ مورد، سهم اصلی را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن، مقالات کنفرانسی با ۷۹ مورد، کتاب‌ها با ۶۱ مورد، سری کتاب‌ها با ۳۸ مورد، و مجلات تجاری با تنها ۴ مورد قرار دارند. این توزیع بیانگر آن است که حوزه زیست‌سوخت‌ها و زنجیره تأمین کشاورزی عمدتاً در بسترهای علمی معتبر و داوری‌شده به بحث گذاشته شده و کمتر به فضاهای کاربردی یا تجاری راه یافته است (شکل ۳).

این نتایج اهمیت تمرکز علمی بر این حوزه را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که پژوهشگران بیش از هر چیز بر تولید دانش نظری و مدل‌های تحلیلی برای بهبود پایداری زنجیره‌های کشاورزی متمرکز بوده‌اند.

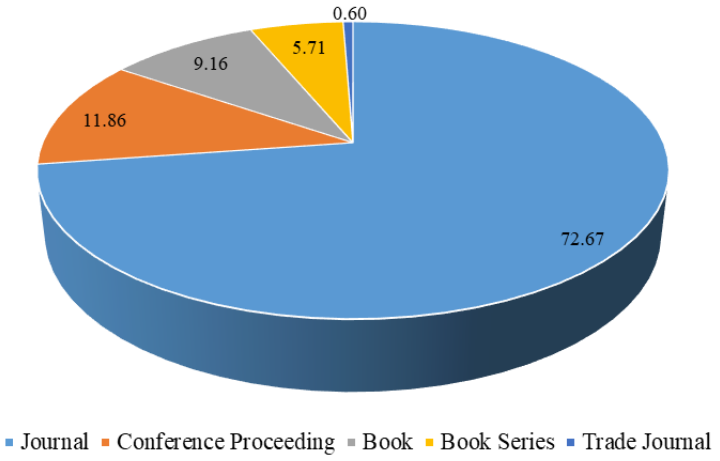

Figure 3 - Statistics on the type of publications made in this field (Scopus, 2025)
شکل ۳- آمار نوع انتشارات انجام شده در این زمینه (اسکوپوس، ۲۰۲۵)

مطابق با انجام مرور سیستماتیک، پارامترهای زیر به عنوان پارامترهای مستقل موثر در توسعه زنجیره تامین کشاورزی شناسایی شدند. شکل ۴، ارتباط میان متغیرهای مستقل و وابسته را نشان می دهد.

نتایج مرور سیستماتیک این پژوهش گویای رشد شتابان توجه علمی به زیست‌سوخت‌ها در زنجیره تأمین کشاورزی طی سال‌های اخیر است. تحلیل کیفی منابع شناسایی‌شده نشان می‌دهد که تحقق توسعه پایدار در این حوزه، مستلزم درک و مدیریت مجموعه‌ای از عوامل چندبعدی است که در پژوهش‌های مختلف به آنها پرداخته شده است. بر اساس داده‌های استخراج شده، منابع تأمین زیست‌سوخت‌ها به عنوان یکی از ارکان اصلی در زنجیره تأمین پایدار معرفی شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، این منابع شامل پسماندهای کشاورزی، محصولات انرژی‌زا و فرآورده‌های دامی هستند که هر یک نقش متمایزی در تولید زیست‌سوخت ایفا می‌کنند. افزون بر این، نوع زیست‌سوخت مصرفی نیز در مطالعات مختلف با توجه به زمینه‌های کاربردی تفکیک شده است؛ به طوری که بیواتانول، بیودیزل، بیوگاز و زیست‌توده هر کدام در بخش‌هایی نظیر ماشین‌آلات کشاورزی، حمل‌ونقل محصولات، فرآوری، بسته‌بندی و بازاررسانی به‌کار گرفته می‌شوند.

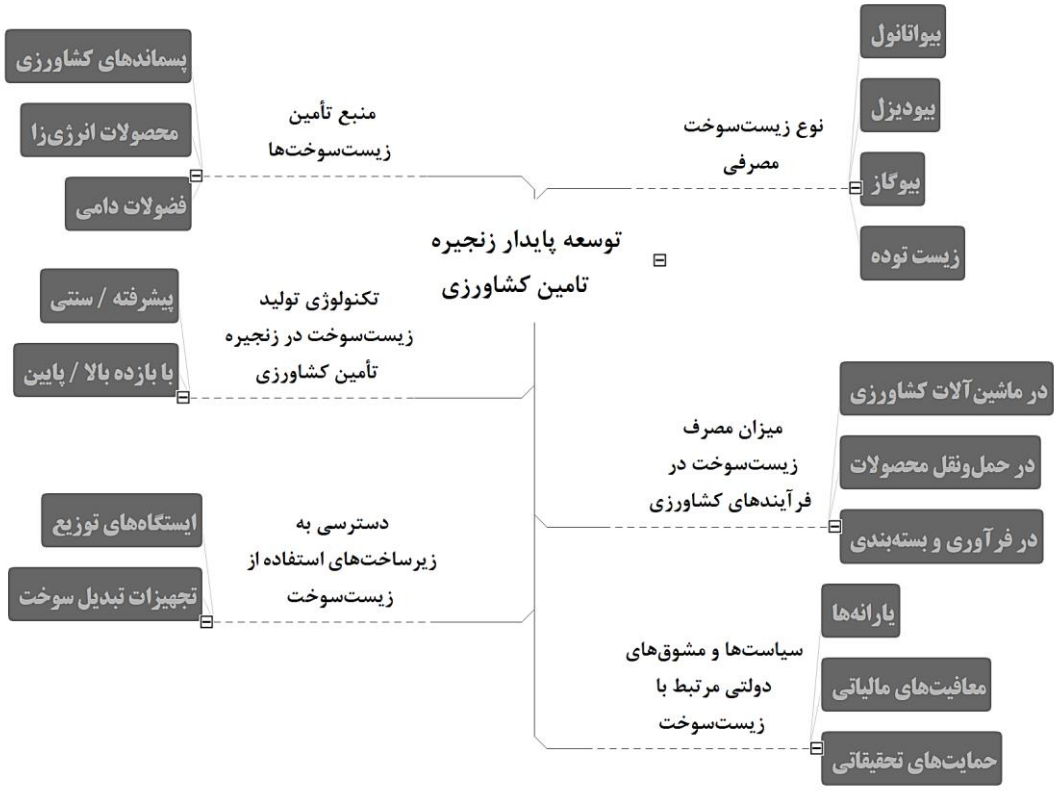

Figure 4 - Relationship between independent and dependent variables
شکل ۴- ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته

عامل کلیدی دیگر، فناوری‌های تولید زیست‌سوخت است که به دو دسته پیشرفته و سنتی تقسیم می‌شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که روند تحقیقات طی سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از سال ۲۰۲۰، به سوی بهره‌گیری از فناوری‌های نوین با بازده بالا متمایل شده است. این فناوری‌ها می‌توانند سهم بسزایی در ارتقای بهره‌وری انرژی و افزایش پذیرش زیست‌سوخت‌ها در میان بهره‌برداران بخش کشاورزی داشته باشند. دسترسی به زیرساخت‌های استفاده از زیست‌سوخت‌ها، شامل ایستگاه‌های توزیع و تجهیزات تبدیل سوخت، از دیگر چالش‌های برجسته‌ای است که در منابع مورد بررسی به آن اشاره شده است. محدودیت زیرساخت‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانعی مهم در مسیر تعمیم و نهادینه‌سازی استفاده از زیست‌سوخت‌ها در زنجیره‌های کشاورزی به شمار می‌رود.

سیاست‌ها و مشوق‌های دولتی، از جمله معافیت‌های مالیاتی و حمایت‌های تحقیقاتی، در ادبیات مورد بررسی به عنوان عامل محرک اصلی در گسترش استفاده از زیست‌سوخت‌ها مطرح شده‌اند. افزایش چشمگیر تولیدات علمی در این حوزه پس از سال ۲۰۲۰، همزمان با افزایش توجه سیاست‌گذاران به مقولات توسعه پایدار انرژی و امنیت غذایی، بیانگر تعامل مثبت میان پژوهش‌های دانشگاهی و سیاست‌های اجرایی در این حوزه است.

نتایج گروه کانونی

برای تعمیق تحلیل و شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی با محوریت زیست‌سوخت‌ها، یک فرایند گروه کانونی با مشارکت ۲۰ نفر از خبرگان برگزار شد. این گروه متشکل از اساتید دانشگاه، کارشناسان انرژی‌های تجدیدپذیر، نمایندگان کشاورزان، و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی بود که طی چندین جلسه تعاملی، به

بررسی ابعاد مختلف موضوع پرداختند. با استفاده از تحلیل واریانس(ANOVA) ، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای شناسایی‌شده بر شاخص توسعه پایدار زنجیره تأمین ارزیابی گردید (جدول ۱).

نتایج حاصل از آزمون ANOVA نشان می‌دهد که تمامی پارامترهای مورد بررسی دارای تأثیر معنادار آماری (Sig. 0.05) >هستند، با این حال شدت این تأثیرگذاری‌ها متفاوت است. به طور خاص، فناوری تولید زیست‌سوخت با مقدار Fبرابر ۱۵.۳۰۳ و سطح معناداری ۰.۰۰۰، به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرها شناسایی شد که نقش محوری در ارتقای توسعه پایدار ایفا می‌کند. این یافته حاکی از آن است که بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌تواند به افزایش کارایی تولید و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند. متغیرهای میزان کاهش هزینه انرژی(F=27.784) ، (Sig.=0.000و اشتغال‌زایی مستقیم در روستا(F=24.424) ، (Sig.=0.000نیز در رتبه‌های بالای تأثیرگذاری قرار دارند. این دو شاخص، از منظر اقتصادی و اجتماعی، اهمیت ویژه‌ای برای کشاورزان و سیاست‌گذاران دارند، چرا که کاهش هزینه‌ها و ایجاد اشتغال، از انگیزه‌های کلیدی برای پذیرش و گسترش فناوری‌های زیست‌سوختی در بخش کشاورزی به شمار می‌روند.

در بُعد زیست‌محیطی، میزان کاهش آلایندگی با F برابر ۱۸.۱۰۳ و سطح معناداری ۰.۰۰۰، به عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده مورد تأکید اعضای گروه قرار گرفت. این نتیجه نشان‌دهنده ظرفیت بالای زیست‌سوخت‌ها در بهبود وضعیت زیست‌محیطی زنجیره‌های کشاورزی است.

از سوی دیگر، عواملی مانند آموزش و آگاهی کشاورزان(F=12.995) ، (Sig.=0.000و دسترسی به زیرساخت زیست‌سوخت(F=8.778) ، (Sig.=0.001نیز به عنوان عوامل تسهیل‌کننده شناسایی شدند که می‌توانند زمینه‌ساز افزایش پذیرش فناوری‌های زیست‌سوختی در میان بهره‌برداران باشند. این یافته بر لزوم توجه سیاست‌گذاران به سرمایه‌گذاری در آموزش‌های ترویجی و بهبود زیرساخت‌ها دلالت دارد.

نکته قابل توجه دیگر، نوع زیست‌سوخت مصرفی بود که گرچه سطح معناداری (Sig.=0.025) نشان داد، اما نسبت به سایر عوامل، تأثیرگذاری کمتری داشت. این امر نشان می‌دهد که موفقیت راهبردهای توسعه زیست‌سوختی، بیش از آنکه به نوع سوخت وابسته باشد، به عواملی همچون فناوری، زیرساخت، سیاست‌های حمایتی و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی بستگی دارد.

Table 1- Results of ANOVA analysis
جدول ۱- نتایج تحلیل ANOVA

پارامترهای موثر بر شاخص توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی		مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
(F1) نوع زیست‌سوخت مصرفی	بین گروه‌ها	.662	4	.166	3.819	.025
	درون گروه‌ها	.650	15	.043		
	مجموع	1.312	19			
(F2) مقدار زیست‌سوخت مصرفی (نسبت به مصرف کل انرژی)	بین گروه‌ها	.484	4	.121	5.370	.007
	درون گروه‌ها	.338	15	.023		
	مجموع	.822	19			
(F3) دسترسی به زیرساخت زیست‌سوخت	بین گروه‌ها	.632	4	.158	8.778	.001
	درون گروه‌ها	.270	15	.018		
	مجموع	.902	19			
(F4) سیاست‌های حمایتی دولتی	بین گروه‌ها	.642	4	.161	8.917	.001
	درون گروه‌ها	.270	15	.018		
	مجموع	.912	19			

(F5) آموزش و آگاهی کشاورزان	بین گروه‌ها	.700	4	.175	12.995	.000
	درون گروه‌ها	.202	15	.013		
	مجموع	.902	19			
(F6) فناوری تولید زیست‌سوخت	بین گروه‌ها	1.110	4	.278	15.303	.000
	درون گروه‌ها	.272	15	.018		
	مجموع	1.382	19			
(F7) فاصله تا مراکز فرآوری	بین گروه‌ها	.984	4	.246	11.604	.000
	درون گروه‌ها	.318	15	.021		
	مجموع	1.302	19			
(F8) میزان کاهش هزینه انرژی	بین گروه‌ها	.978	4	.245	27.784	.000
	درون گروه‌ها	.132	15	.009		
	مجموع	1.110	19			
(F9) میزان کاهش آلایندگی	بین گروه‌ها	1.120	4	.280	18.103	.000
	درون گروه‌ها	.232	15	.015		
	مجموع	1.352	19			
(F10) اشتغال‌زایی مستقیم در روستا	بین گروه‌ها	.990	4	.248	24.424	.000
	درون گروه‌ها	.152	15	.010		
	مجموع	1.142	19			

یافته‌های به‌دست‌آمده از جلسات گروه کانونی، چشم‌انداز جدیدی در تبیین اولویت‌های سیاستی و مدیریتی توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی با محوریت زیست‌سوخت‌ها فراهم می‌سازد. همان‌طور که نتایج آزمون آماری نشان می‌دهد، اجماع میان خبرگان بر این اصل استوار است که ابعاد فناورانه، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به طور توأمان باید مورد توجه قرار گیرند تا استقرار پایدار این فناوری‌ها در بخش کشاورزی تحقق یابد.

برجسته‌ترین یافته این مطالعه، نقش محوری فناوری تولید زیست‌سوخت در ارتقای شاخص‌های پایداری است. این امر با بدنه ادبیات موجود همخوانی دارد که تأکید می‌کند نوآوری‌های فناورانه نه تنها به بهبود بازدهی انرژی می‌انجامد، بلکه میزان آلایندگی و هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد. از این رو، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه فناوری‌های نسل دوم و سوم، می‌تواند مسیر تسریع تحول پایدار زنجیره‌های کشاورزی را هموار سازد.

از منظر اقتصادی، تأثیر چشمگیر کاهش هزینه انرژی و اشتغال‌زایی در مناطق روستایی، اهمیت راهبردی زیست‌سوخت‌ها را در توانمندسازی جوامع کشاورزی برجسته می‌سازد. نتایج این بخش تأیید می‌کند که هرگونه برنامه‌ریزی در این حوزه، می‌بایست همزمان به اهداف اقتصادی کوتاه‌مدت (کاهش هزینه‌ها) و اهداف اجتماعی بلندمدت (ایجاد فرصت‌های شغلی پایدار) پاسخ دهد. این یافته‌ها می‌تواند راهنمایی عملی برای سیاست‌گذاران باشد تا مشوق‌هایی هدفمند در راستای تسهیل بهره‌برداری از زیست‌سوخت‌ها ارائه دهند.

تأکید اعضای گروه بر کاهش آلایندگی زیست‌محیطی، یادآور ضرورت همسوسازی سیاست‌های انرژی با الزامات زیست‌محیطی است. این موضوع به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های تغییر اقلیم و استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است.

نتایج این مطالعه نقش کلیدی آموزش و آگاهی‌بخشی به کشاورزان را به عنوان عامل تسهیل‌کننده معرفی می‌کند. این امر نشان‌دهنده آن است که حتی در صورت فراهم بودن زیرساخت‌ها و سیاست‌های حمایتی، پذیرش فناوری‌های نوین مستلزم ارتقای سطح دانش و آگاهی بهره‌برداران خواهد بود. لذا، طراحی برنامه‌های ترویجی و آموزشی هدفمند، باید به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از راهبرد توسعه زیست‌سوخت‌ها در زنجیره کشاورزی تلقی شود.

یافته‌ها حاکی از آن است که نوع زیست‌سوخت مصرفی گرچه واجد اهمیت است، اما در مقایسه با سایر عوامل، نقش تعیین‌کننده کمتری دارد. این نتیجه ضمن تأکید بر اهمیت انتخاب نوع سوخت مناسب، توجه را به سوی عوامل سیستمی گسترده‌تر جلب می‌کند که شامل فناوری، زیرساخت، سیاست‌های حمایتی، و نتایج اقتصادی و زیست‌محیطی است.

نتایج انتخاب ویژگی با جنگل تصادفی ادغام یافته با Relief

برای شناسایی الگوهای پنهان و خوشه‌های مؤثر در داده‌های مرتبط با توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی، از الگوریتم جنگل تصادفی بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این مدل در جدول ۲ ارائه شده است و شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل، حاکی از دقت قابل قبول و توان پیش‌بینی مناسب الگوریتم در خوشه‌بندی داده‌ها است. شاخص مساحت زیر منحنی (AUC)که معیار توان تفکیک مدل است، مقدار ۰/۹۸ را نشان می‌دهد که بیانگر قدرت بالای مدل در تمایز میان خوشه‌های مثبت و منفی است. این سطح از AUC نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی به‌خوبی توانسته الگوهای معناداری را در داده‌ها شناسایی کند.

میزان دقت کلی (CA) برابر با ۰/۸۵ است که نشان می‌دهد ۸۵ درصد داده‌ها به درستی طبقه‌بندی شده‌اند. این مقدار دقت، در کنار امتیاز F1 معادل ۰/۸۴ که تعادلی میان دقت (Precision) و بازخوانی (Recall) ارائه می‌دهد، دلالت بر عملکرد باثبات مدل در مواجهه با داده‌های نامتوازن دارد.

شاخص دقت (Precision) با مقدار ۰/۸۸و بازخوانی (Recall) با مقدار ۰/۸۵، نشان‌دهنده آن است که مدل نه تنها توانایی بالایی در شناسایی موارد مثبت واقعی دارد، بلکه درصد کمی از موارد مثبت کاذب تولید می‌کند. این امر برای کاربردهای سیاستی در بخش کشاورزی، که تصمیمات بر مبنای طبقه‌بندی صحیح گرفته می‌شوند، اهمیت حیاتی دارد.

ضریب همبستگی ماتیوس (MCC) که شاخصی جامع برای ارزیابی کیفیت طبقه‌بندی در شرایط داده‌های نامتوازن است، مقدار ۰/۷۳ را نشان می‌دهد. این عدد نمایانگر یک ارتباط متوسط مثبت میان پیش‌بینی‌های مدل و نتایج واقعی است که در مطالعات مشابه با داده‌های پیچیده، مقبول ارزیابی می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم جنگل تصادفی در این مطالعه، مؤید آن است که مدل توانسته با دقت مناسب، پارامترهای کلیدی مؤثر بر توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی را خوشه‌بندی و پیش‌بینی کند. این امر می‌تواند به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای سیاست‌گذاران و مدیران زنجیره تأمین مورد استفاده قرار گیرد.

Table 2- Clustering results with random forest
جدول ۲- نتایج خوشه بندی با جنگل تصادفی

مدل	AUC	CA	F1	Prec.	Recall	MCC
جنگل تصادفی	0.98	0.85	0.84	0.88	0.85	0.73

مدل ارائه شده نه تنها از منظر شاخص‌های کمی کارآمد بوده، بلکه بر پایه نتایج کالیبراسیون (شکل ۵) نیز، از اعتبار بالایی در تخمین احتمال‌ها برخوردار است. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی مؤثر برای طبقه‌بندی مزارع، خوشه‌بندی زنجیره‌های تأمین و بهینه‌سازی سیاست‌های توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

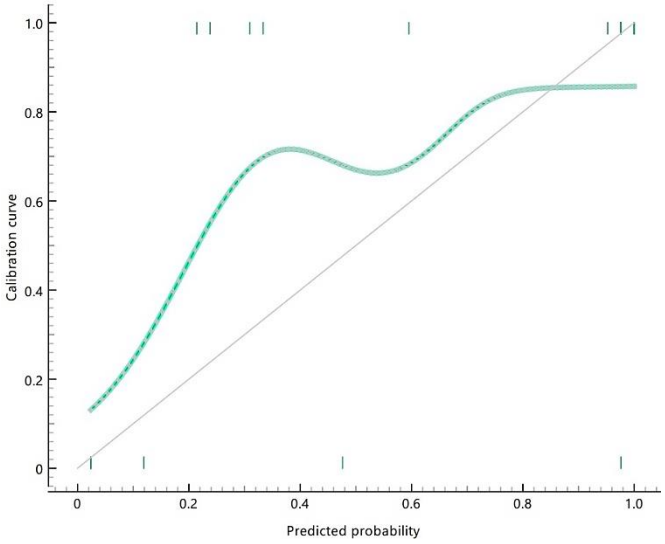

Figure 5 - Calibration curve

شکل ۵- منحنی کالیبراسیون

همچنین نتایج حاصل از شکل ۶، که منحنی Lift مدل جنگل تصادفی را نمایش می‌دهد، بر کارایی طبقه‌بندی مدل در سطوح مختلف آستانه‌های پیش‌بینی تأکید دارد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، مدل در آستانه احتمالات پایین‌تر از ۰.۶۹، مقدار Lift بالاتر از ۱ را حفظ کرده است؛ این بدان معناست که مدل در این بازه، قدرت بالاتری در شناسایی موارد مثبت نسبت به انتخاب تصادفی دارد. به عبارت دیگر، با تنظیم آستانه پیش‌بینی در حدود ۰.۴ تا ۰.۶، می‌توان بیشترین بهره‌وری را از مدل در تفکیک زنجیره‌های تأمین با توسعه پایدار بالاتر به دست آورد.

نقطه آستانه مشخص شده در نمودار برابر با ۰.۶۹ است که نشان‌دهنده مرز بهینه میان حساسیت و دقت مدل می‌باشد. در این نقطه، مدل به طور مؤثری تعادل بین شناسایی صحیح موارد مثبت و جلوگیری از شناسایی‌های نادرست را برقرار می‌کند. علاوه بر این، افت تدریجی منحنی Lift پس از عبور از این آستانه، حاکی از کاهش تدریجی توان تمایزدهی مدل در سطوح احتمال بالاتر است، هرچند که مقدار Lift در بیشتر بازه‌ها همچنان بالاتر از سطح معیار (خط افقی برابر با ۱) باقی می‌ماند.

این یافته‌ها نه تنها اعتبار نتایج جدول ۲ و منحنی کالیبراسیون (شکل ۵) را تقویت می‌کند، بلکه پیشنهاد می‌دهد که در کاربردهای عملی، استفاده از آستانه‌های پیش‌بینی زیر ۰.۷ برای غربالگری زنجیره‌های تأمین کشاورزی با سطح پایداری بالا، نتایج بهتری به همراه خواهد داشت.

نقشه خوشه‌بندی ارائه‌شده در شکل ۷ دو گروه متمایز (کدگذاری‌شده با برچسب‌های ۰ و ۱) را در میان نمونه‌های زنجیره تأمین کشاورزی شناسایی کرده است. این گروه‌بندی حاصل الگوریتم خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بوده و بر پایه الگوهای مشابه بین متغیرهای مورد بررسی صورت گرفته است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌های گروه اول (کد ۰) عمدتاً دارای مقادیر پایین‌تر در اکثر شاخص‌ها (رنگ‌های آبی و سبز تیره) هستند، در حالی که گروه دوم (کد ۱) مقادیر بالاتری (رنگ‌های سبز روشن تا زرد) را نشان می‌دهد.

در بخش فوقانی شکل، دندروگرام متغیرها (شاخص‌ها) نیز دیده می‌شود که نشان‌دهنده همبستگی و نزدیکی برخی از شاخص‌ها به یکدیگر است. به عنوان نمونه، شاخص‌های F2 ، F7، F4 و F10 در یک خوشه نزدیک قرار گرفته‌اند، که می‌تواند نشان‌دهنده رفتار مشابه این متغیرها در تمایز میان زنجیره‌های با پایداری بالا و پایین باشد.

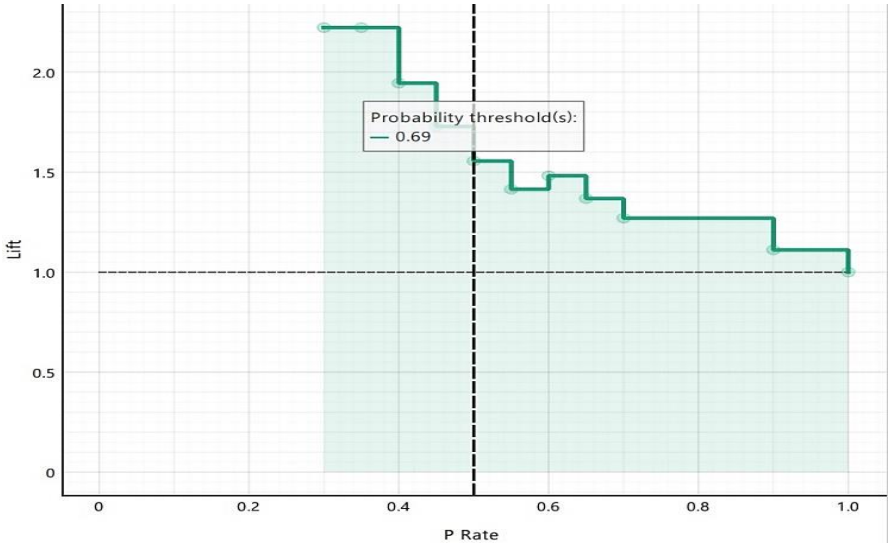

Figure 6- Lift curve
شکل ۶- منحنی Lift

رنگ‌بندی مقادیر نیز گویای این است که گروه دوم (کد ۱) که دارای سطوح بالاتر پایداری است، در شاخص‌های کلیدی مانند F2 و F7 عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این نتایج کاملاً همراستا با نتایج قبلی حاصل از مدل جنگل تصادفی (شکل‌های ۵ و ۶) و تحلیل جدول ۲ می‌باشد که بر نقش شاخص‌های فنی و سیاست‌های حمایتی در ارتقاء توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی تأکید داشتند.

این یافته‌ها دلالت بر این دارد که می‌توان زنجیره‌های تأمین را بر اساس این خوشه‌بندی، به‌عنوان هدف سیاست‌گذاری‌های متمایز و اقدامات بهبوددهنده، شناسایی و گروه‌بندی نمود.

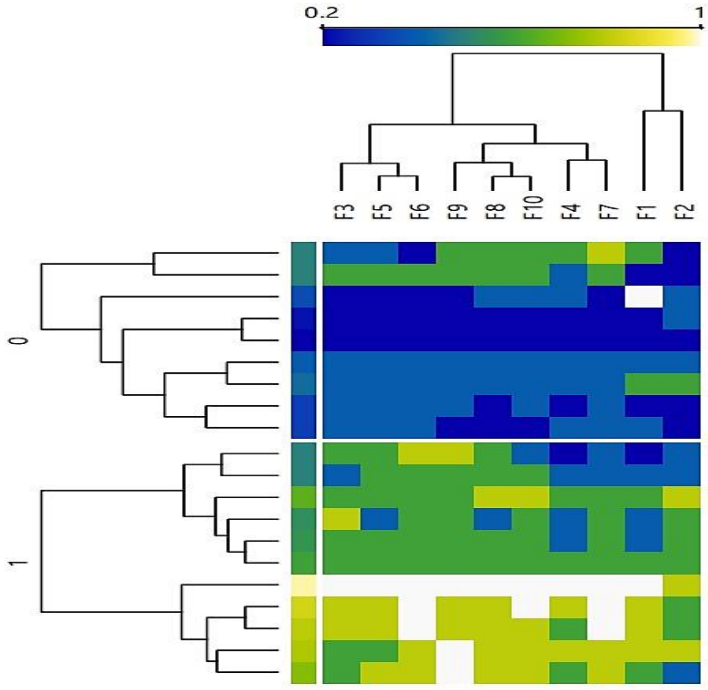

Figure 7 - Clustering map (Heatmap)
شکل ۷- نقشه خوشه‌بندی (Heatmap)

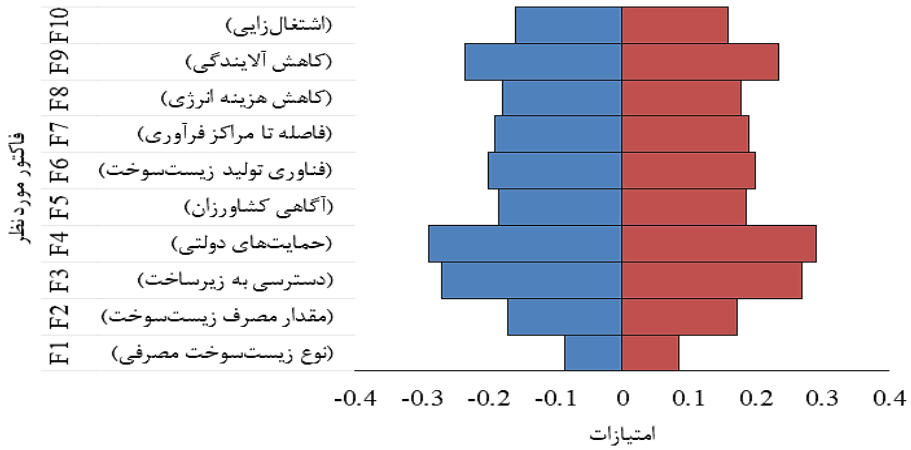

Figure 8 - Feature selection output with the Random Forest method combined with Relief
شکل ۸- خروجی انتخاب ویژگی با روش جنگل تصادفی ادغام یافته با Relief

به منظور شناسایی موثرترین شاخص‌ها، از روش انتخاب ویژگی جنگل تصادفی ادغام یافته با الگوریتم Relief استفاده شد که نتایج آن در شکل ۸ ارائه گردیده است. مطابق این شکل، شاخص‌های اشتغال‌زایی مستقیم در روستا، کاهش آلایندگی، کاهش هزینه انرژی و فاصله تا مراکز فرآوری بالاترین امتیاز را در میان پارامترهای مورد بررسی کسب کرده‌اند. این یافته حاکی از آن است که عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و زیرساختی، نقشی کلیدی در ارتقاء توسعه پایدار زنجیره تأمین کشاورزی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، شاخص‌های نوع زیست‌سوخت مصرفی و مقدار زیست‌سوخت مصرفی امتیاز کمتری کسب کرده‌اند که بیانگر اثرگذاری پایین‌تر آن‌ها در مقایسه با سایر پارامترهاست.

نتایج مدل‌سازی، خوشه‌بندی و انتخاب ویژگی به وضوح نشان می‌دهند که سیاست‌گذاران و مدیران زنجیره‌های کشاورزی برای بهبود پایداری، باید تمرکز خود را بر روی شاخص‌های کلیدی نظیر اشتغال‌زایی، کاهش آلایندگی، کاهش هزینه انرژی، زیرساخت‌های فرآوری و حمایت‌های دولتی معطوف نمایند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان می‌دهد که زیست‌سوخت‌ها می‌توانند به‌عنوان عاملی کلیدی در ارتقای پایداری زنجیره تأمین کشاورزی ایفای نقش کنند؛ مشروط بر آنکه سیاست‌ها و زیرساخت‌های لازم به‌طور همزمان توسعه یابند. تحلیل‌های انجام‌شده بر پایه مدل‌های یادگیری ماشین نشان داد که شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و زیرساختی نظیر اشتغال‌زایی مستقیم در روستا، کاهش آلایندگی، کاهش هزینه انرژی و دسترسی به مراکز فرآوری، بیشترین تأثیر را در ارتقای سطح پایداری زنجیره‌ها دارند. این در حالی است که متغیرهایی همچون نوع زیست‌سوخت مصرفی و مقدار مصرفی آن، نقش کم‌رنگ‌تری نسبت به سایر پارامترها ایفا کرده‌اند.

همچنین یافته‌ها تأکید دارند که موفقیت راهبردهای توسعه زیست‌سوخت‌ها نه تنها به فناوری‌های تولید پیشرفته وابسته است، بلکه به زیرساخت‌های مناسب، سیاست‌های حمایتی هدفمند و افزایش آگاهی و مهارت کشاورزان نیز نیازمند است. خوشه‌بندی زنجیره‌های تأمین نشان داد که گروه‌هایی که از حمایت‌های دولتی بیشتر و فناوری‌های به‌روزتری برخوردار بودند، در شاخص‌های پایداری عملکرد بهتری داشته‌اند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران بخش کشاورزی در راستای ارتقای توسعه پایدار زنجیره‌های تأمین، سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در زیرساخت‌های زیست‌سوختی به‌ویژه در مناطق روستایی انجام دهند. ایجاد مراکز فرآوری محلی و ایستگاه‌های توزیع سوخت‌های زیستی، می‌تواند دسترسی بهره‌برداران را افزایش داده و زمینه‌ساز پذیرش گسترده‌تر این فناوری‌ها شود. افزون بر این، لازم است مشوق‌های دولتی به‌گونه‌ای هدفمند طراحی گردد؛ به‌ویژه از طریق اعطای معافیت‌های مالیاتی، یارانه‌های تولید، و تسهیلات اعتباری کم‌بهره برای زنجیره‌های تأمین کشاورزی که به معیارهای پایداری دست یافته‌اند. این رویکرد می‌تواند انگیزه‌های اقتصادی لازم را برای بهره‌برداران و سرمایه‌گذاران فراهم آورد.

ارتقای آگاهی و مهارت‌های کشاورزان از طریق برگزاری دوره‌های آموزشی و ترویجی، نقش بسزایی در تسریع پذیرش فناوری‌های زیست‌سوختی خواهد داشت. آموزش‌های هدفمند می‌تواند شکاف دانشی موجود را کاهش داده و توانمندی کشاورزان را در بهره‌برداری بهینه از این فناوری‌ها افزایش دهد. تاکید بر توسعه فناوری‌های تولید زیست‌سوخت با بازده بالا و آلایندگی پایین، به‌ویژه فناوری‌های نسل دوم و سوم، باید در اولویت برنامه‌های تحقیق و توسعه قرار گیرد. حمایت از نوآوری‌های فناورانه می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رقابت‌پذیری زیست‌سوخت‌ها در بازارهای انرژی کمک نماید.

توصیه می‌شود که سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی طراحی و پیاده‌سازی شود تا زنجیره‌های تأمین با پتانسیل بالای توسعه پایدار شناسایی شده و سیاست‌های حمایتی به‌صورت دقیق‌تر به سمت این زنجیره‌ها هدایت گردد. این اقدام می‌تواند به بهبود کارایی مداخلات سیاستی و تسریع روند گذار به سمت زنجیره‌های تأمین پایدار منجر شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می باشد.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند سپاسگزاری می‌کنیم.

References

Ahmed, W. and Sarkar, B. "Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for

asecond generation biofuel," *Journal of cleaner production*, vol. 186, pp. 807-820, 2018.

Awudu. I and Zhang, J. "Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1359-1368, 2012.

Blair, M. J. Gagnon, B. Klain, A. and Kulišić, B."Contribution of biomass supply chains for bioenergy to
sustainable development goals," *Land*, vol. 10, no. 2, p. 181, 2021.
Basu,c. *Biofuels and Biodiesel*. Springer, 2021.
Bandh, S. A. and Malla, F. A. *Biofuels in Circular Economy*. Springer, 2022.
Biénabe, E. Rival , A and. Loeillet, D. *Sustainable development and tropical agri-chains*. Springer, 2017.
Brownlee,J. *Machine learning mastery*. Machine Learning Mastery, 2022.
Boyabatlı, O. Kazaz, B. and Tang, C. S. *Agricultural Supply Chain Management Research*. Springer, 2022.
Burkov, A. *The hundred-page machine learning book*. Andriy Burkov Quebec City, QC, Canada, 2019.
Blaschek, H. P. Ezeji, T. C. and Scheffran, J. *Biofuels from agricultural wastes and byproducts*. Wiley Online Library, 2010.
Chandel A. K. and Sukumaran, R. K. *Sustainable biofuels development in India*. Springer, 2017.
Despoudi, S. Spanaki, K. Rodriguez-Espindola, O. and Zamani, E. D. *Agricultural supply chains and industry 4.0*. Springer, 2021.
De Brauw A. and Bulte, E. *African farmers, value chains and agricultural development*. Springer, 2021
De Blasio, C. *Fundamentals of biofuels engineering and technology*. Springer, 2019.
Dalal-Clayton, B. and S. Bass, *Sustainable development strategies: a resource book*. Routledge, 2012.
Hashmi, M. F . and Kesakr, A. G. *Machine Learning and Deep Learning for Smart Agriculture and*
Applications. IGI global, 2023.
Katila, P. C.. Colfer, J. P .De Jong, G. Galloway, P. Pacheco, and Winkel, G. *Sustainable development goals*. Cambridge University Press, 2019.
Kamble, S. S. Gunasekaran, A. and. Gawankar, S. A "Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications," *International journal of production economics*, vol. 219, pp. 179-194, 2020.
Khandelwal, C. Singhal, M. Gaurav, G. Dangayach, G. and Meena, M. "Agriculture supply chain management: a review (2010–2020)," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3144-3153, 2021.
Liakos, K. G. Busato, P. Moshou, D. Pearson, S. and Bochtis, D. "Machine learning in agriculture:A review," *Sensors*, vol. 18, no .8 ,p. 2674, 2018.
Lal R. and Stewart, B. A. *Soil quality and biofuel production*. CRC Press, 2009.
Marten, G. G. *Human ecology: Basic concepts for sustainable development*. Routledge, 2010.
Mukherjee, A. A. . Singh, R. K Mishra, R. and S. Bag, "Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: Justification framework," *Operations. ManagementResearch*, vol. 15, no. 1, pp. 46-61, 2022.
Narula S. A. and Raj, S.Sustainable Food Value Chain. *Development*. Springer, 2023.
Nagothu, U. S. *Agricultural Development and Sustainable Intensification*. 2018.
Otsuka, K.and Fan, S. *Agricultural development: New perspectives in a changing world*. Intl Food Policy Res Inst, 2021.
Roorda, N. *Fundamentals of sustainable development*. Routledge, 2020.
Roosa, S. A .*Sustainable development handbook*. CRC Press, 2020.

Safari, Amin, and Ali Azar. "Teaching Geographic Sciences in the Age of Artificial Intelligence: Explaining Opportunities and Challenges." Organization of space economy 2, no. 5. 2024. 83-102.

Schnepf, R. "Agriculture-based biofuels: Overview and emerging issues," 2010.

Singh, R. S. Pandey, A. and Gnansounou, E. *Biofuels: production and future perspectives*. CRC press, 2016.

Srivastava, N. Srivastava, M .Mishra, P. K and Gupta, V. K. *Biofuel production technologies:*
critical analysis for sustainability. Springer, 2020.

Uddin M. S. and Bansal, J. C. *Computer Vision and Machine Learning in Agriculture, Volume 2*. Springer, 2022.

Umakanth, A. Datta, A. Reddy, B. S. and Bardhan, S. "Biomass feedstocks for advanced biofuels: sustainability and supply chain management," *Advanced biofuel technologies*, pp. 39-72, 2022.

Zaimes, G. G. Vora, N. Chopra, S. S. Landis, A. E. and V. Khanna, "Design of sustainable biofuel processes and supply chains: challenges and opportunities," *Processes*, vol. 3, no. 3, 2015p633.