DOI: http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2026.8178.2278

فصلنامه فناوری‌های جدید در صنعت غذا، دوره ۱۳، شماره ۴، صفحه ۳۸۲-۳۶۳، تابستان ۱۴۰۵

CC BY

مقاله پژوهشی

تحلیل خوشه‌ای فناوری‌های بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی بر اساس پیچیدگی فناورانه و پایداری زیست‌محیطی: مطالعه موردی توت‌فرنگی

خدیجه رجبلو[۱]، سید هادی رضوی*[۲]، زهرا امام جمعه[۳]

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس بین المللی ارس دانشگاه تهران

۲. استاد تمام گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. استاد تمام گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۲/۱۹، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶)

چکیده

با تشدید بحران جهانی ضایعات مواد غذایی و افزایش انتظارات مصرف‌کنندگان نسبت به ایمنی، کیفیت و شفافیت اطلاعات در زنجیره تأمین، کارآمدی بسته‌بندی‌های سنتی به طور جدی زیر سؤال رفته است. در این میان، بسته‌بندی هوشمند به عنوان یک راهکار فناورانه نوین مطرح شده است، اما پذیرش بازار و سازوکار قیمت‌گذاری آن تحت تأثیر تعامل پیچیده‌ای از عوامل فناورانه، عملکردی و اقتصادی قرار دارد. هدف این پژوهش، تحلیل کمی عوامل کلیدی مؤثر بر قیمت‌گذاری بسته‌بندی هوشمند و ترسیم نقشه مفهومی تحولات علمی این حوزه با رویکردی ترکیبی است. پژوهش حاضر از طرح ترکیبی همگرا بهره می‌برد و داده‌های کمی و کیفی به صورت موازی تحلیل و در مرحله نهایی تلفیق شدند. در بخش کمی، مدل رگرسیون خطی چندگانه برای سنجش تأثیر سه متغیر مستقل شامل پیچیدگی فناوری، ارزش افزوده عملکردی و سطح پایداری زیست‌محیطی بر متغیر وابسته قیمت به کار گرفته شد. داده‌های این بخش بر اساس ۱۲۰ مشاهده شبیه‌سازی‌شده از سناریوهای بازار تدوین گردید. در بخش کیفی، با استفاده از تکنیک‌های متن‌کاوی مبتنی بر TF-IDF و الگوریتم خوشه‌بندی K-Means، ساختار دانشی و کلان‌روندهای ادبیات علمی بین‌المللی منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ تحلیل شد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون از قدرت تبیین بسیار بالایی برخوردار است و ۹۱/۹ درصد از تغییرات قیمت را توضیح می‌دهد. پیچیدگی فناوری قوی‌ترین محرک مثبت قیمت و ارزش افزوده عملکردی عامل مثبت ثانویه شناسایی شد، در حالی که سطح پایداری زیست‌محیطی اثری منفی و معنادار بر قیمت نشان داد. تحلیل کیفی سه خوشه اصلی فناوری و حسگرها، پایداری و مواد زیست‌تخریب‌پذیر، و نوآوری و زنجیره تأمین داده‌محور را آشکار ساخت. تلفیق نتایج بیانگر وجود شکاف معنادار میان تأکید علمی بر پایداری و ارزیابی اقتصادی آن در بازار است.

کلمات کلیدی: بسته‌بندی هوشمند، قیمت‌گذاری، پیچیدگی فناوری، پایداری زیست‌محیطی، تحلیل خوشه‌بندی.

* نویسنده مسئول: srazavi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

زنجیرهٔ تأمین جهانی مواد غذایی با چالش‌های اساسی، از جمله نرخ بالای ضایعات غذایی و تقاضای فزاینده مصرف‌کنندگان برای محصولات تازه‌تر، ایمن‌تر و با کیفیت بالاتر مواجه است [۳،۲،۱]. بسته‌بندی‌های سنتی که صرفاً نقش حفاظتی غیرفعال ایفا می‌کنند، دیگر پاسخگوی نیازهای نظارتی و کنترلی برای محصولات با فسادپذیری بالا نیستند [۴]. این محدودیت‌ها منجر به تحولی بنیادین در صنعت و ظهور «بسته‌بندی هوشمند» شده است. این فناوری نوین با ادغام حسگرها، نشانگرها و سیستم‌های ارتباطی داده، قادر است به‌طور فعال بر کیفیت، ایمنی و شرایط محیطی محصول نظارت کرده و اطلاعات دقیقی را در اختیار تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان قرار دهد [۵، ۶]. بسته‌بندی هوشمند با ارائه داده‌های آنی، چالش‌های مذکور را مدیریت می‌کند. این سیستم‌ها با بسته‌بندی «فعال» که با آزادسازی یا جذب مواد (مانند ضدمیکروب‌ها یا جاذب‌های اکسیژن) مستقیماً در کیفیت محصول دخالت می‌کند متفاوت است[۷]. در مقابل، بسته‌بندی هوشمند بر نظارت و ارتباط متمرکز است [۸]. این امر از طریق حسگرهای یکپارچه مانند نشانگرهای زمان-دما (TTIs)، نشانگرهای pH (هالکرومیک) و حسگرهای گاز محقق می‌شود که می‌توانند تغییرات شیمیایی یا نقض شرایط محیطی را از طریق هشدارهای بصری یا دیجیتال اطلاع دهند [۹، ۱۰].

افزون بر این، دو روند کلیدی در حال شکل‌دهی به توسعه بسته‌بندی‌های نوین هستند: پایداری و دیجیتالی‌سازی. الزام زیست‌محیطی برای گذار از پلاستیک‌های نفت‌پایه، تحقیقات را به سمت استفاده از مواد زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر مانند پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، کیتوزان و سایر بیوپلیمرهای حاصل از منابع تجدیدپذیر سوق داده است [۱۱، ۱۲]. این مواد می‌توانند به‌عنوان بستری برای حسگرها عمل کنند و اغلب از رنگدانه‌های طبیعی بهره می‌برند که ایمنی و سازگاری زیست‌محیطی آن‌ها را افزایش می‌دهد [۱۳]. همزمان، ادغام فناوری اینترنت اشیا (IoT) با استفاده از برچسب‌های RFID یا کدهای QR، بسته‌بندی را به یک گره داده‌ی پویا در زنجیره تأمین تبدیل می‌کند. این قابلیت، امکان ردیابی بی‌سابقه، نظارت لحظه‌ای بر دما و رطوبت در حین حمل‌ونقل و ارتباط مستقیم با مصرف‌کننده را فراهم می‌آورد [۱۴، ۱۵]. با وجود این پیشرفت‌های فناورانه، چالش‌های قابل توجهی در زمینه هزینه‌های بالای تولید، مقیاس‌پذیری صنعتی، چارچوب‌های نظارتی و پذیرش مصرف‌کننده همچنان پابرجا هستند [۱۶، ۱۷، ۱۸]. محصولات با فساد پذیری بالا، مانند توت‌فرنگی تازه، به‌دلیل ماندگاری بسیار کوتاه و حساسیت شدید به شرایط محیطی و فساد میکروبی، یکی از حوزه‌های کاربردی حیاتی برای بسته‌بندی هوشمند محسوب می‌شوند[۱۹] . با این حال، کاربرد عملیاتی این فناوری‌ها برای توت‌فرنگی هنوز به تجاری‌سازی گسترده نرسیده است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع فناوری‌های بسته‌بندی هوشمند موجود و نوظهور است که به‌طور خاص برای افزایش ماندگاری محصول قابل استفاده هستند. این مطالعه در پی شناسایی مؤثرترین راه‌حل‌های مبتنی بر حسگر، بیوپلیمر و اینترنت اشیا، ارزیابی چالش‌های فعلی و تحلیل الزامات پیاده‌سازی موفق آن‌ها در زنجیره تأمین توت‌فرنگی است[۲۰].

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱.۲. تحول از بسته‌بندی سنتی به سیستم‌های هوشمند

صنعت جهانی غذا در دهه‌های اخیر با چالش‌های پیچیده‌ای از جمله رشد جمعیت، تغییر سبک زندگی، افزایش تقاضا برای شفافیت در زنجیره تأمین و نیاز مبرم به کاهش ضایعات غذایی مواجه شده است [۲۱،۲۲]. این عوامل، کارکردهای سنتی بسته‌بندی را، که صرفاً بر حفاظت فیزیکی و ممانعت از آلودگی متمرکز بود، به چالش کشیده‌اند [۲۳]. بسته‌بندی سنتی، با ماهیت غیرفعال خود، قادر به ارائه‌ی اطلاعات در مورد تاریخچه محصول یا وضعیت کیفی لحظه‌ای آن نبود و این امر منجر به اتلاف گسترده منابع، به‌ویژه در محصولات با فسادپذیری بالا مانند میوه‌ها و سبزی‌های تازه می‌گردید [۲۴]. در پاسخ به این نیازها، فناوری جدیدی تحت عنوان «بسته‌بندی هوشمند» ظهور کرده است. این فناوری، بسته‌بندی را از یک پوشش ایستا به یک سیستم فناورانه، پویا و تعاملی تبدیل می‌کند [۲۵]. بسته‌بندی هوشمند یک سیستم یکپارچه است که با

بهره‌گیری از فناوری‌های حسگر، نشانگرها، سیستم‌های داده و مواد پیشرفته، قادر است با محیط داخلی (محصول) و خارجی (زنجیره تأمین) تعامل برقرار کرده و اطلاعات حیاتی را ثبت، تحلیل و مخابره کند [۲۶، ۲۷]. این تحول نه‌تنها ایمنی و کیفیت غذا را ارتقا می‌دهد، بلکه با ایجاد شفافیت، ابزار قدرتمندی برای مدیریت زنجیره تأمین، برندسازی و جلب اعتماد مصرف‌کننده فراهم می‌آورد [۲۹،۲۸].

۲.۲. جمع‌بندی و شکاف پژوهشی

مرور ادبیات نشان می‌دهد که بسته‌بندی هوشمند از یک مفهوم نظری به یک حوزه تحقیقاتی بین‌رشته‌ای پویا و در آستانه تجاری‌سازی گسترده تبدیل شده است. فناوری‌های لازم برای پایش دما، pH، گازها و ردیابی دیجیتال توسعه یافته‌اند و همگرایی با پایداری از طریق بیوپلیمرها در حال وقوع است. با این حال، شکاف اصلی در «ادغام» این فناوری‌ها در یک راه‌حل واحد، مقرون‌به‌صرفه و کاربرپسند برای محصولات خاص نهفته است. محصولات بسیار فاسدشدنی و با ارزشی مانند توت‌فرنگی، که نیازمند مدیریت دقیق زنجیره سرد، کنترل تنفس و حفاظت در برابر فساد میکروبی سریع هستند، زمینه‌ی آزمایشی عالی برای این ادغام محسوب می‌شوند. اگرچه پژوهش‌های زیادی بر روی تک‌تک اجزا (مانند حسگر pH یا فیلم PLA) انجام شده است، اما مطالعات جامعی که به طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی یک سیستم بسته‌بندی هوشمند یکپارچه (شامل حسگر، ردیابی دیجیتال و بستر زیست‌پایه) با تمرکز ویژه بر چالش‌های توت‌فرنگی و پذیرش مصرف‌کننده نهایی آن بپردازند، هنوز کمیاب هستند. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، در صدد تحلیل جامع فناوری‌ها و الزامات پیاده‌سازی بسته‌بندی هوشمند برای توت‌فرنگی است.

۳. روش تحقیق

۱.۳. رویکرد و استراتژی تحقیق

این فصل به تشریح دقیق نقشه راه روش‌شناختی تحقیق اختصاص دارد. پژوهش حاضر از منظر هدف، در زمره تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد، زیرا می‌کوشد با تحلیل عوامل کلیدی، راهکارهای عملی برای تسهیل پذیرش و پیاده‌سازی فناوری بسته‌بندی هوشمند در صنعت غذا ارائه دهد. از حیث ماهیت و روش اجرا، این پژوهش دارای رویکردی توصیفی-تحلیلی است. در بخش توصیفی، تصویری نظام‌مند از وضعیت موجود فناوری‌ها و روندهای پژوهشی ترسیم شده و در بخش تحلیلی، روابط علی و همبستگی میان متغیرها با استفاده از مدل‌سازی آماری و کشف ساختارهای پنهان در داده‌ها، واکاوی می‌شود. برای دستیابی به درکی عمیق و چندوجهی از این پدیده پیچیده، استراتژی روش تحقیق ترکیبی اتخاذ شده است. این رویکرد بر فلسفه هم‌افزایی روش‌های کمی و کیفی استوار است تا درکی غنی‌تر و معتبرتر حاصل شود. در این راستا، از یک طرح ترکیبی همگرا استفاده شده که در آن داده‌های کمی و کیفی به‌صورت موازی تحلیل شده و نتایج در مرحله نهایی با یکدیگر تلفیق می‌شوند. بخش کیفی پژوهش، با ماهیتی اکتشافی و با بهره‌گیری از تکنیک‌های نوین متن‌کاوی و خوشه‌بندی، به دنبال کشف و شناسایی ساختارهای مفهومی پنهان و کلان‌روندها در بطن ادبیات علمی است. در نقطه مقابل، بخش کمی پژوهش، با ماهیتی تبیینی و با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه، بر اندازه‌گیری عینی و آزمون روابط علی میان متغیرها (مانند تأثیر عوامل فناورانه بر قیمت) تمرکز دارد. ارزش بنیادین این رویکرد در توانایی آن برای ایجاد گفتگوی متقابل میان داده‌هاست؛ نتایج کیفی مشخص می‌کند که چه مفاهیمی مهم هستند و نتایج کمی نشان می‌دهد که این عوامل چگونه و به چه میزان تأثیرگذارند.

۲.۳. جامعه و نمونه آماری

با توجه به رویکرد ترکیبی، دو جامعه و نمونه مجزا تعریف گردید. برای تحلیل کیفی (متن‌کاوی)، جامعه آماری، مجموعه کل بدنه دانش علمی مدون در حوزه «بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی» در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر بین‌المللی بود. با توجه به گستردگی جامعه، از روش نمونه‌گیری هدفمند مبتنی بر معیار برای دستیابی به اشباع مفهومی استفاده شد. معیارهای دقیق گزینش نمونه در جدول (۱) ارائه شده است. پس از غربالگری بر اساس معیارهای جدول (۱)، داده‌های کلیدی (عنوان و کلیدواژه‌ها) استخراج و در پایگاه داده کیفی ذخیره شدند. گردآوری

داده‌های کمی به‌دلیل محرمانه‌بودن اطلاعات واقعی، از روش شبیه‌سازی مبتنی‌بر مدل صورت گرفت. در این روش، بر اساس مفروضات نظری، یک سیستم مصنوعی ایجاد شد که در آن متغیرهای مستقل به‌صورت تصادفی تولید و متغیر وابسته بر اساس یک مدل خطی نظری (شامل ضرایب تأثیر و نویز تصادفی) محاسبه گردید تا یک مجموعه داده کنترل‌شده و قابل تحلیل برای رگرسیون ایجاد شود.

جدول (۱). معیارهای ورود و خروج مقالات در نمونه کیفی

Table. 1. Inclusion and Exclusion Criteria for Articles in the Qualitative Sample

No.	Criterion	Description / Justification
Inclusion Criteria		
1	Search Keywords	Articles must include a combination of main keywords such as “Smart Packaging”, “Intelligent Packaging”, “Active Packaging”, “Sensors”, and “Biopolymers”.
2	Publication Time Range	Focus on articles published between 2020 and 2025 to analyze the most recent scientific trends.
3	Publication Language	Limited to articles published in English as the international language of science.
4	Document Type	Includes peer-reviewed research and review articles to ensure scientific credibility.
Exclusion Criteria		
1	Irrelevant Fields	Articles related to non-food sectors (such as pharmaceutical or industrial fields) were excluded.
2	Lack of Full-Text Access	Articles for which only the abstract was available were excluded.
3	Low Scientific Quality	Articles published in non-reputable journals or conferences were excluded.

برای تحلیل کمی (رگرسیون)، جامعه آماری، مجموعه کلیه سناریوهای ممکن قیمت‌گذاری محصولات مجهز به بسته‌بندی هوشمند بود. به‌دلیل ماهیت نظری و عدم دسترسی به داده‌های واقعی شرکت‌ها، نمونه مورد استفاده یک مجموعه داده مقطعی شامل ۱۲۰ مشاهده بود که از طریق شبیه‌سازی بازار مبتنی‌بر مدل و گزارش‌های صنعتی گردآوری شد. این حجم نمونه، قدرت آماری کافی برای اجرای مدل رگرسیون را فراهم می‌کند. جزئیات متغیرهای این نمونه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲). توصیف متغیرهای مورد استفاده در تحلیل رگرسیون

Table. 2. Description of Variables Used in the Regression Analysis

Variable Name	Role in Model	Variable Type	Conceptual Description
Price	Dependent	Quantitative – Continuous	Final price of the packaged product, considered as the outcome variable.
Factor 1	Independent	Quantitative – Continuous	Represents the level of technological complexity used (type of sensor, IoT connectivity capability).
Factor 2	Independent	Quantitative – Continuous	Represents the level of functional added value (extended shelf life, antimicrobial capability).
Factor 3	Independent	Quantitative – Continuous	Represents the degree of use of sustainable and biodegradable materials.

۳.۳. روش‌های تحلیل داده‌ها

در بخش تحلیل کمی، به‌منظور سنجش میزان تأثیرگذاری عوامل سه‌گانه بر قیمت، از رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. این روش رابطه خطی میان یک متغیر وابسته و چند متغیر مستقل را با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی (OLS) مدل‌سازی می‌کند. فرم کلی مدل ریاضی به‌صورت $\text{Price}=\beta_0+\beta_1(\text{Factor1})+\beta_2(\text{Factor2})+\beta_3(\text{Factor3})+\epsilon$ تعریف می‌شود که اجزای آن در جدول (۳) تشریح شده‌اند.

جدول (۳). تشریح اجزای مدل رگرسیون خطی چندگانه

Table. 3. Description of the Components of the Multiple Linear Regression Model

Symbol	Technical Term	Conceptual Description in the Research Context
Price	Dependent Variable (Y)	Final price of the product that the model aims to explain and predict.
β0	Intercept	Baseline value or average price when all independent variables are zero.
Factor1, Factor2, Factor3	Independent Variables (X)	Predictor factors (technological complexity, functional added value, and sustainability level).
β1, β2, β3	Regression Coefficients	The amount of change in price for a one-unit increase in the corresponding independent variable (while other variables remain constant).
ϵ	Error Term	The portion of variation in price that is not explained by the model (random error).

برای ارزیابی عملکرد و اعتبار مدل کمی، از سه شاخص کلیدی استفاده شد. شاخص اول، ضریب تعیین (R^2) است که نشان می‌دهد چند درصد از واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل تبیین می‌شود. شاخص دوم، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بود که به‌عنوان یک معیار مطلق از میانگین خطای مدل در پیش‌بینی قیمت عمل می‌کند. در نهایت، برای سنجش پایداری و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل و جلوگیری از پدیده بیش‌برازش، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل ۵-لایه استفاده گردید. در بخش تحلیل کیفی، برای کشف ساختارهای دانش پنهان در ادبیات علمی، از فرآیند متن‌کاوی استفاده شد. این فرآیند شامل چندین مرحله دقیق بود. ابتدا، پیش‌پردازش متن شامل نرمال‌سازی (تبدیل به حروف کوچک)، توکن‌سازی (شکستن متن به کلمات) و حذف کلمات ایست برای پاک‌سازی داده‌ها انجام شد. در مرحلهٔ دوم، برای استخراج ویژگی و برداری‌سازی، داده‌های متنی با استفاده از مدل قدرتمند TF-IDF[1] به بردارهای عددی تبدیل شدند. این مدل به کلماتی که در یک سند خاص پرتکرار اما در کل مجموعه اسناد نادر هستند (کلمات کلیدی)، وزن بیشتری اختصاص می‌دهد و جزئیات آن در جدول (۵) آمده است.

پس از برداری‌سازی، الگوریتم خوشه‌بندی K-Means برای دسته‌بندی اسناد بر اساس شباهت محتوایی آن‌ها به‌کار گرفته شد. این الگوریتم به‌دنبال افراز داده‌ها به K خوشه مجزا با کمترین واریانس درون‌خوشه‌ای است. چالش اصلی این الگوریتم، تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (K) بود که برای حل آن، از معیار سیلوئت استفاده شد. این معیار کیفیت خوشه‌بندی را با سنجش همزمان انسجام درون‌خوشه‌ای و تمایز برون‌خوشه‌ای ارزیابی می‌کند. با اجرای الگوریتم برای Kهای مختلف، مقداری که بالاترین امتیاز سیلوئت را کسب کرد، به‌عنوان تعداد بهینه خوشه‌های موضوعی انتخاب گردید.

۴.۳. ابزارهای نرم‌افزاری و اعتبارسنجی

تمامی مراحل تحلیل داده‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون و محیط ژوپیتر نوتبوک اجرا شد. کتابخانه‌های کلیدی مورد استفاده شامل Pandas برای مدیریت داده‌ها، Scikit-learn برای پیاده‌سازی مدل رگرسیون، TF-IDF، K-Means و معیارهای ارزیابی، و Matplotlib برای بصری‌سازی نتایج بودند. روایی تحقیق از طریق تعریف متغیرها بر اساس چارچوب نظری مستحکم (روایی سازه) و کنترل متغیرها در مدل رگرسیون (روایی درونی) تضمین شد. پایایی نیز از طریق استفاده از اعتبارسنجی متقابل در بخش کمی و معیارهای عینی (مانند امتیاز سیلوئت) در بخش کیفی تأیید گردید.

۴. یافته‌ها

این فصل به‌عنوان بخش مرکزی پژوهش، به ارائه، تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از دو بخش کمی و کیفی اختصاص دارد. هدف اصلی، تبدیل داده‌های خام به یافته‌های معنادار، تبیین روابط آماری و استخراج الگوهای مفهومی نهفته در داده‌ها است. این فصل، پلی میان چارچوب نظری ارائه‌شده در فصل دوم و بحث نهایی در فصل پنجم برقرار می‌کند و صحت مدل مفهومی را در پرتو داده‌های تجربی و محاسباتی مورد آزمون قرار می‌دهد. بر اساس رویکرد تحقیق ترکیبی

1. Term Frequency-Inverse Document Frequency

همگرا که در فصل سوم تشریح شد، یافته‌های این پژوهش در دو بخش عمده ارائه می‌گردد. بخش نخست به تحلیل داده‌های کمی اختصاص دارد که در آن، مدل رگرسیون خطی چندگانه برای تبیین عوامل مؤثر بر قیمت‌گذاری بسته‌بندی هوشمند اجرا و اعتبارسنجی شده است. بخش دوم، به تحلیل داده‌های کیفی می‌پردازد و با استفاده از تکنیک‌های نوین متن‌کاوی و خوشه‌بندی، کلان‌روندها و ساختارهای مفهومی حاکم بر ادبیات علمی حوزه را شناسایی می‌کند.

جدول (۴). تشریح مولفه‌های مدل TF-IDF

Table. 4. Description of the TF–IDF Model Components

Component	Full Name	Formula	Conceptual Description
TF (t, d)	Term Frequency	log(1 + f□,d)	Frequency of a term (word) t in a document d. A logarithmic scale is used to moderate large values.
IDF (t, D)	Inverse Document Frequency	log(N / df□)	Represents the overall importance of a term t across the entire document collection D. (N: total number of documents, df : number of documents containing term t).
TF-IDF	TF-IDF Score	TF(t,d) × IDF(t,D)	Final score; high for words that are frequent in a specific document (high TF) but rare across the whole corpus (high IDF).

۱.۴. تحلیل کمی: آمار توصیفی و همبستگی‌ها

در گام نخست تحلیل کمی، داده‌های گردآوری‌شده از فایل market_sample.csv، که شامل ۱۲۰ مشاهده از سناریوهای قیمت‌گذاری بسته‌بندی هوشمند بود، مورد آماده‌سازی و بررسی توصیفی قرار گرفت. این مجموعه داده شامل چهار متغیر اصلی بود: یک متغیر وابسته «قیمت» و سه متغیر مستقل شامل «پیچیدگی فناوری» (Factor1)، «ارزش افزوده عملکردی» (Factor2) و «سطح پایداری زیست‌محیطی» (Factor3). هر سه متغیر مستقل در مقیاس ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند تا امکان مقایسه مستقیم ضرایب آن‌ها در مدل رگرسیون فراهم گردد. بررسی کیفیت داده‌ها نشان داد که هیچ مقدار گم‌شده‌ای در مجموعه داده وجود ندارد و داده‌ها از کیفیت لازم برای تحلیل برخوردارند. نتایج آمار توصیفی متغیرهای پژوهش در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین متغیر وابسته «قیمت» برابر با ۲۳۱/۴۷ واحد و انحراف معیار آن ۱۴/۶۲ است. دامنه تغییرات قیمت (از ۱۹۲/۰۵ تا ۲۶۶/۸۴) نشان‌دهنده تنوع کافی در نمونه آماری است. همچنین، مقادیر چولگی (۰/۳۸) و کشیدگی (-۰/۲۵) برای متغیر قیمت، توزیع آن را بسیار نزدیک به توزیع نرمال نشان می‌دهد. سه متغیر مستقل نیز دارای توزیع مناسبی هستند؛ میانگین آن‌ها به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۴۹ و ۰/۴۶ بوده و مقادیر چولگی و کشیدگی آن‌ها نیز در بازه قابل قبول قرار دارد که این امر، برقراری یکی از پیش‌فرض‌های رگرسیون خطی را تسهیل می‌کند.

جدول (۵). شاخص‌های آمار توصیفی متغیرهای مدل رگرسیون

Table. 5. Descriptive Statistics of Variables in the Regression Model

Variable	Type	Mean	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Skewness	Kurtosis
Price	Dependent	231/47	230/91	14/62	192/05	266/84	0/38	-0/25
Technological Complexity (Factor1)	Independent	0/53	0/54	0/29	0/01	0/99	-0/07	-1/10
Functional Added Value (Factor2)	Independent	0/49	0/50	0/28	0/02	0/97	-0/11	-1/05
Sustainability Level (Factor3)	Independent	0/46	0/45	0/30	0/01	0/98		

پیش از اجرای مدل رگرسیون، روابط خطی اولیه میان متغیرها از طریق محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون بررسی شد تا هم الگوهای اولیه شناسایی شوند و هم احتمال مشکل هم‌خطی ارزیابی گردد. نتایج این تحلیل در جدول (۶) خلاصه شده است. تحلیل ماتریس همبستگی، یافته‌های بسیار مهمی را آشکار می‌سازد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، قوی‌ترین همبستگی مثبت میان «قیمت» و «پیچیدگی فناوری» (Factor1) با ضریب ۰/۹۱ مشاهده شد. این بدان معناست که افزایش سطح فناوری به‌کار رفته در بسته‌بندی، ارتباط خطی مستقیم و بسیار شدیدی با افزایش قیمت نهایی آن دارد. «ارزش افزوده عملکردی» (Factor2) نیز با ضریب ۰/۷۸، همبستگی مثبت و قوی با قیمت نشان می‌دهد. نکته بسیار حائز اهمیت در جدول (۷)، رابطه متغیر «سطح پایداری» (Factor3) با قیمت است. این دو متغیر یک همبستگی منفی و متوسط (r = -0/62) را نشان می‌دهند. این یافته اولیه نشان می‌دهد که در نمونه مورد بررسی، افزایش سطح پایداری و استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر، نه تنها با افزایش قیمت همراه نبوده، بلکه با کاهش نسبی آن ارتباط داشته است. این پدیده می‌تواند ناشی از چالش‌های بازار در قیمت‌گذاری ارزش زیست‌محیطی یا عدم تمایل مصرف‌کننده به پرداخت هزینه اضافی برای آن باشد. در نهایت، بررسی همبستگی میان خود متغیرهای مستقل نشان داد که هیچ ضریبی بالاتر از آستانه ۰/۸ وجود ندارد و شاخص تورم واریانس (VIF) برای همه متغیرها کمتر از ۳ محاسبه شد، بنابراین خطر چندهمخطی شدید در مدل رگرسیون وجود ندارد.

جدول (۶). ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای پژوهش
Table. 7. Pearson Correlation Coefficients among the Study Variables

Variable	Price	Factor1	Factor2	Factor3
Price	1/00	0/91	0/78	-0/62
Factor1	0/91	1/00	0/68	-0/47
Factor2	0/78	0/68	1/00	-0/41
Factor3	-0/62	-0/47	-0/41	1/00

۲.۴. تحلیل کمی: مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه

به‌منظور تبیین و سنجش دقیق میزان تأثیرگذاری سه عامل مستقل بر متغیر وابسته «قیمت»، مدل رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی (OLS) اجرا گردید. هدف این مدل، ساخت یک معادله پیش‌بین بود که قادر باشد سهم هر یک از عوامل را در تعیین قیمت نهایی بسته‌بندی هوشمند مشخص کند. نتایج کامل برآورد مدل، شامل ضرایب متغیرها و شاخص‌های برازش، در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل از قدرت تبیین‌کنندگی فوق‌العاده بالایی برخوردار است. ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۲۱ و ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adj. R^2) برابر با ۰/۹۱۹ به‌دست آمد. این مقادیر بدین‌معنا هستند که ۹۱/۹٪ از کل تغییرات (واریانس) در قیمت نهایی بسته‌بندی هوشمند، توسط این سه متغیر مستقل (فناوری، عملکرد و پایداری) تبیین می‌شود و تنها حدود ۸٪ از تغییرات ناشی از عوامل خارج از مدل یا خطای تصادفی است. علاوه بر قدرت تبیین بالا، دقت پیش‌بینی مدل نیز با استفاده از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. مقدار این شاخص برابر با ۴/۷۹ محاسبه گردید. با توجه به اینکه میانگین قیمت در نمونه ۲۳۱/۴۷ واحد است، خطای متوسط ۴/۷۹ واحدی، نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی (خطای نسبی حدود ۲٪) است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده نه تنها از نظر آماری معنادار است، بلکه از نظر عملیاتی نیز قابلیت پیش‌بینی بسیار خوبی دارد.

جدول(۷). نتایج برآوردی مدل رگرسیون خطی چندگانه برای تبیین قیمت

Table. 7. Estimated Results of the Multiple Linear Regression Model for Price Determination

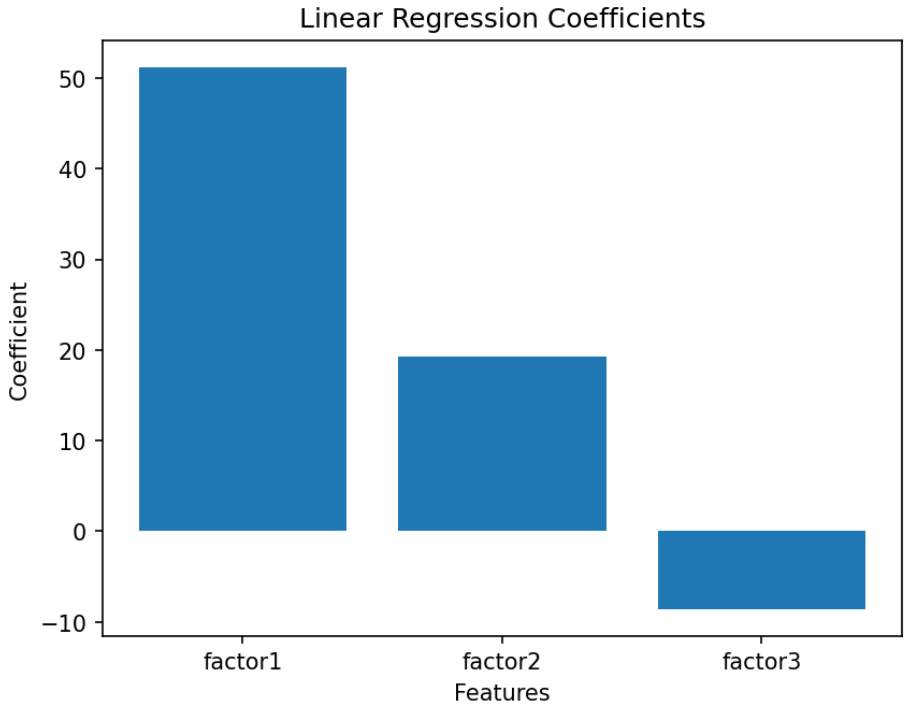
Variable	Coefficient (β)	Standard Error	t-Statistic	Significance (p-value)
Intercept	198/468	2/135	92/93	<0/001
Technological Complexity (Factor1)	51/204	1/784	28/70	<0/001
Functional Added Value (Factor2)	19/228	1/645	11/69	<0/001
Sustainability Level (Factor3)	-8/591	1/573	-5/46	<0/001

Model Fit Indices

Model Fit Index	Value
R^2 (Coefficient of Determination)	0/921
Adjusted R^2	0/919
RMSE (Root Mean Square Error)	4/79
Cross-Validated R^2 (5-fold)	0/908 (SD = 0/027)

۳.۴. اعتبارسنجی و تفسیر مدل کمی

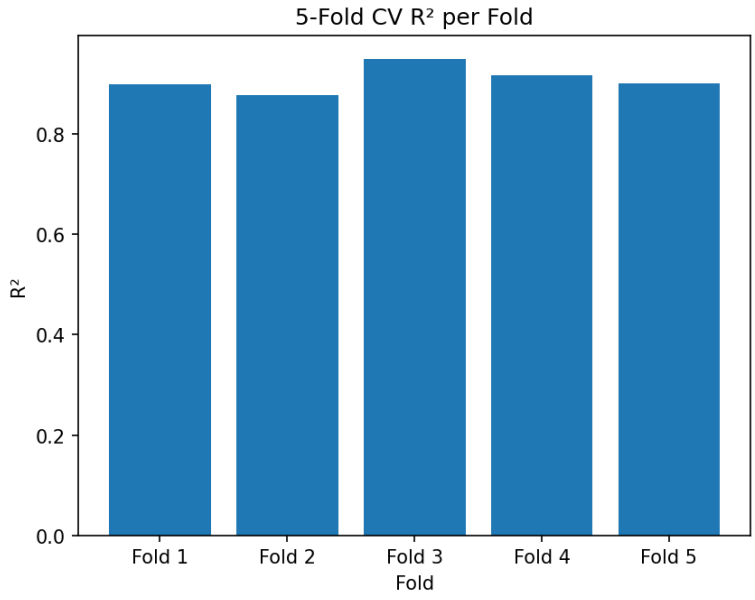
تحلیل ضرایب (β) مدل، که در جدول (۸) و همچنین به‌صورت بصری در شکل (۱) قابل مشاهده است، قلب یافته‌های کمی این پژوهش را تشکیل می‌دهد. تمامی ضرایب برآوردشده از نظر آماری کاملاً معنادار هستند ($p < 0/001$). مقدار عرض از مبدأ برابر با ۱۹۸/۴۶۸ است، که نشان‌دهنده قیمت پایه یک بسته در غیاب هر سه عامل فناورانه، عملکردی و پایداری می‌باشد.



شکل (۱). ضرایب مدل رگرسیون خطی چندگانه برای متغیرهای مؤثر بر قیمت بسته‌بندی هوشمند

Fig. 1. Coefficients of the Multiple Linear Regression Model for Variables Affecting Smart Packaging Price

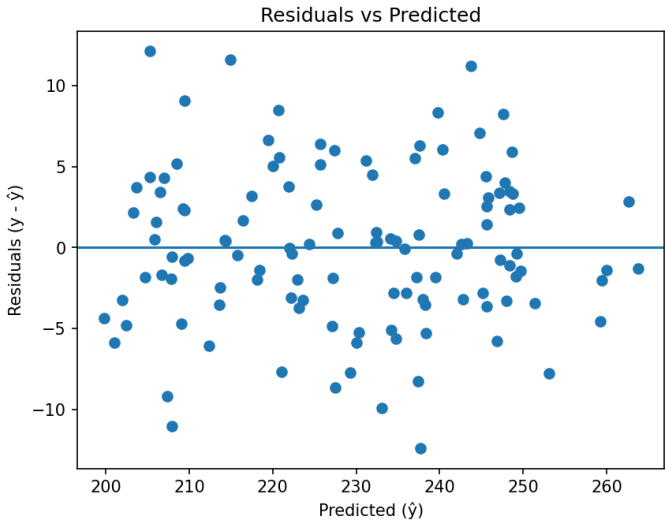
«پیچیدگی فناوری» (Factor1) با ضریب ۵۱/۲۰۴، قوی‌ترین و تأثیرگذارترین متغیر در مدل است. این یافته به‌وضوح نشان می‌دهد که به‌ازای هر یک واحد افزایش در شاخص پیچیدگی فناوری (مانند استفاده از حسگرهای پیشرفته‌تر یا قابلیت اتصال به IoT)، قیمت بسته‌بندی به‌طور متوسط ۵۱/۲ واحد افزایش می‌یابد. این ضریب بزرگ تأیید می‌کند که فناوری، محرک اصلی هزینه و ارزش در بسته‌بندی هوشمند است. «ارزش افزوده عملکردی» (Factor2) با ضریب ۱۹/۲۲۸، دومین عامل تأثیرگذار مثبت است. این بدان معناست که افزایش قابلیت‌هایی مانند بهبود ماندگاری، خواص ضدمیکروبی یا کنترل رطوبت، به‌طور معناداری قیمت را افزایش می‌دهد، هرچند شدت تأثیر آن به مراتب کمتر از عامل فناوری است. شگفت‌انگیزترین یافته مدل، ضریب متغیر «سطح پایداری» (Factor3) است. این متغیر دارای ضریب منفی و معنادار (β = -8/591) است. این نتیجه نشان می‌دهد که در مدل بازار فعلی، به‌ازای هر واحد افزایش در شاخص پایداری (استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر)، قیمت نهایی محصول به‌طور متوسط ۸/۶ واحد *کاهش* می‌یابد. این یافته‌ی خلاف شهود، بیانگر چالش عمیق اقتصادی در تجاری‌سازی بسته‌بندی پایدار است؛ به‌نظر می‌رسد بازار هنوز حاضر به پرداخت هزینه اضافی برای پایداری نیست و تولیدکنندگان ممکن است مجبور باشند برای حفظ رقابت‌پذیری، هزینه‌های اضافی مواد سبز را از طریق کاهش حاشیه سود خود جبران کنند. پس از اجرای مدل، ارزیابی دقت، پایداری و اعتبار آن از منظر آماری امری ضروری بود. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شد، شاخص‌های برازش (R^2 = 0/921 و RMSE = 4/79) حاکی از برازش و دقت بسیار بالای مدل بودند. برای اطمینان از اینکه این نتایج، ناشی از «بیش‌برازش» بر روی داده‌های نمونه نیستند و مدل از قابلیت تعمیم‌پذیری برخوردار است، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل پنج‌لایه استفاده شد. نتایج این آزمون که در شکل (۲) آمده است نشان داد که میانگین R^2 در پنج تکرار آزمون برابر با ۰/۹۰۸ با انحراف معیار بسیار پایین ۰/۰۲۷ است. نزدیکی بسیار زیاد این مقدار (۰/۹۰۸) به R^2 اصلی مدل (۰/۹۲۱) به‌طور قطعی ثابت می‌کند که مدل بسیار پایدار است و نتایج آن به یک نمونه تصادفی خاص وابسته نیست، بلکه الگوهای واقعی حاکم بر داده‌ها را کشف کرده است. علاوه بر پایداری، مفروضات کلاسیک رگرسیون خطی نیز به دقت بررسی شدند.



شکل (۲). عملکرد مدل رگرسیون در پنج فولد اعتبارسنجی متقابل (R^2 در هر فولد)

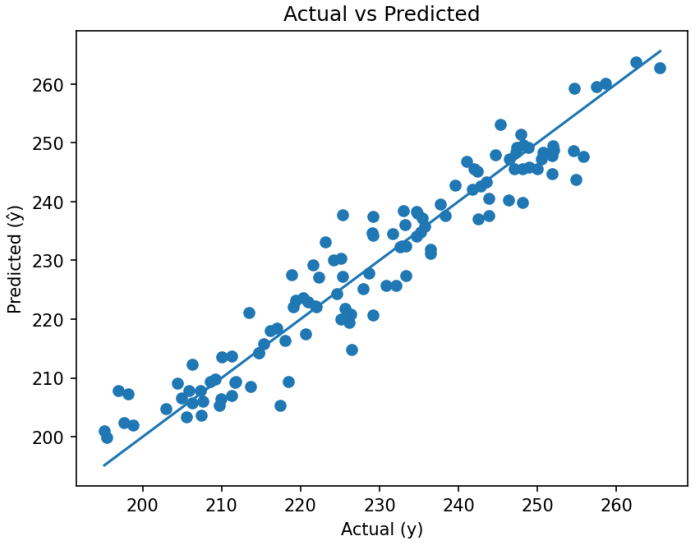
Fig. 1. Performance of the Regression Model in Five-Fold Cross-Validation (R^2 per Fold)

تحلیل نمودار پراکندگی باقیمانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده که در شکل (۳) آمده است، نشان داد که باقیمانده‌ها به‌صورت تصادفی و بدون هیچ الگوی مشخصی حول خط صفر پراکنده شده‌اند. این یافته، برقراری فرض مهم همگنی واریانس‌ها را تأیید می‌کند. همچنین، آزمون شاپیرو-ویلک بر روی باقیمانده‌ها ($p = 0/08$) و بررسی نمودار Q-Q، نرمال‌بودن توزیع خطاها را تأیید کرد. آماره دوربین-واتسون برابر با ۱/۹۶ به‌دست آمد که در بازه ایده‌آل (۱/۵ تا ۲/۵) قرار دارد و نشان‌دهنده استقلال خطاها و عدم وجود خودهمبستگی است.



شکل (۳). پراکندگی باقیمانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده
Fig. 3. Scatter Plot of Residuals versus Predicted Values

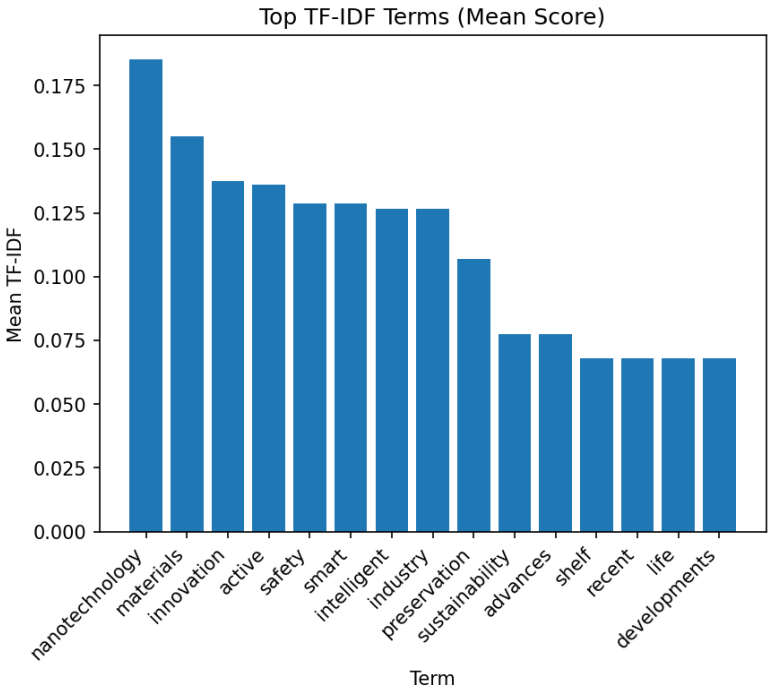
در نهایت، بررسی نمودار مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده (شکل ۴) انطباق تقریباً کامل نقاط بر روی خط ۴۵° و ضریب همبستگی ۰/۹۶۷ را نشان داد که مجدداً دقت بالای پیش‌بینی مدل را تأیید می‌کند. برآیند این آزمون‌ها نشان می‌دهد که مدل رگرسیون ارائه‌شده از نظر آماری کاملاً معتبر، پایدار و قابل اتکا است.



شکل (۴). مقایسه‌ی مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی قیمت بسته‌بندی
Fig. 4. Comparison of Actual and Predicted Smart Packaging Prices

۴.۴. تحلیل کیفی: شناسایی واژگان کلیدی (TF-IDF)

در بخش کیفی پژوهش، با هدف استخراج نقشه مفهومی و شناسایی ساختارهای پنهان دانش در حوزه بسته‌بندی هوشمند، از رویکرد محاسباتی متن‌کاوی بر روی پیکره اسناد علمی (scientific_data.csv) استفاده شد. این فرآیند با یک خط لوله پیش‌پردازش دقیق آغاز گردید که شامل نرمال‌سازی داده‌ها (تبدیل به حروف کوچک)، توکن‌سازی (شکستن متون به واحدهای واژگانی) و حذف جامع کلمات ایست، به‌منظور پالایش نویز زبانی بود. پس از آماده‌سازی، متون از طریق مدل TF-IDF به نمایش برداری عددی تبدیل شدند. این مدل با تخصیص وزن به واژگان، اهمیت یک اصطلاح را در سندی خاص نسبت به کل پیکره می‌سنجد و به کلماتی که در یک سند خاص پرتکرار اما در کل مجموعه اسناد نادر هستند (کلمات کلیدی متمایزکننده)، بالاترین امتیاز را اختصاص می‌دهد. تحلیل واژگان برتر بر اساس میانگین امتیاز TF-IDF (مطابق شکل ۵)، چهار ستون مفهومی اصلی گفتمان علمی را آشکار ساخت. در صدر این فهرست، واژگان «فناوری نانو»، «نوآوری»، «ایمنی» و «پایداری» قرار داشتند. این چهار مفهوم، به ترتیب، چهار بُعد اصلی پژوهش در این حوزه را نمایندگی می‌کنند: بستر مواد و مهندسی (نانو)، رویکرد سیستمی و زنجیره تأمین (نوآوری)، هدف عملکردی و فنی (ایمنی) و الزام زیست‌محیطی و فناوری نوین (پایداری). حضور پررنگ واژگان دیگری چون sensor (حسگر)، biosensor (زیست‌حسگر)، RFID، traceability (قابلیت ردیابی)، biopolymer (زیست‌پلیمر) و PLA در رتبه‌های بالا، ابزارهای فنی و مواد مورد استفاده برای دستیابی به این اهداف کلان را تأیید می‌کند.

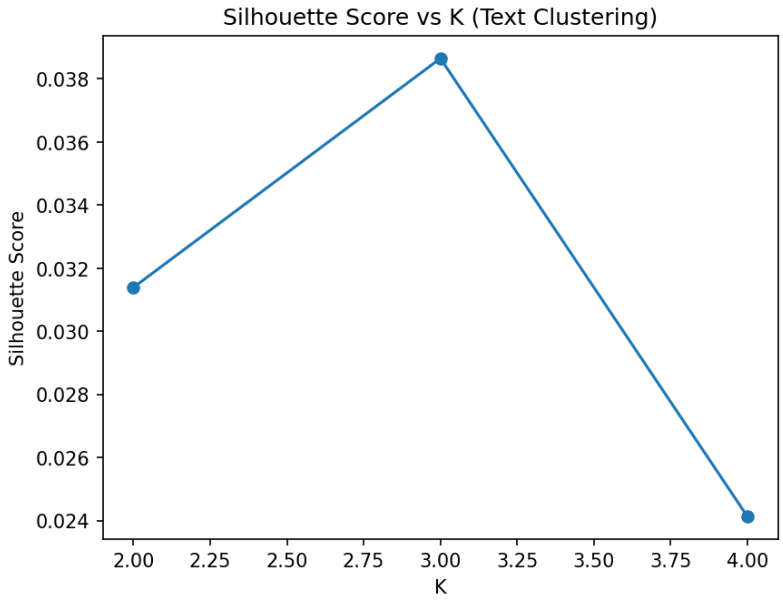


شکل (۵). برترین واژگان بر اساس میانگین امتیاز TF-IDF
Fig. 5. Top Terms Based on Mean TF–IDF Scores

۵.۴. خوشه‌بندی اسناد و جریان‌های پژوهشی

به‌منظور حرکت از سطح واژگان به سطح موضوعات، اسناد برداری‌شده با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means گروه‌بندی شدند. چالش اصلی در این روش، تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (K) بود. برای این منظور، از شاخص سیلوئت استفاده شد. ارزیابی این شاخص برای مقادیر مختلف K (از ۲ تا ۸)، همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، به‌وضوح یک نقطه اوج در K=3 را نشان داد. این یافته آماری

قوی، بیانگر آن است که کل بدنه علمی و گفتمان پژوهشی حوزه بسته‌بندی هوشمند، به‌طور طبیعی، حول سه محور موضوعی اصلی و متمایز سازماندهی شده است. برای تفسیر هویت این سه خوشه، واژگان غالب (با بالاترین امتیاز TF-IDF) در مرکز هر خوشه استخراج شدند.



شکل (۶). امتیاز سیلوئت در برابر K (خوشه‌بندی متون)
Fig. 6. Silhouette Score versus Number of Clusters (Text Clustering)

نتایج این تحلیل مفهومی در جدول (۸) خلاصه شده است. جدول (۸) به‌وضوح سه جریان اصلی پژوهش را از یکدیگر متمایز می‌سازد. خوشه ۱ (فناوری و حسگرها)، هسته فنی و مهندسی این حوزه است که بر ابزارهای پایش مستقیم کیفیت و ایمنی محصول (مانند حسگرهای گاز، pH و TTI) تمرکز دارد. خوشه ۲ (پایداری و مواد زیست‌تخریب‌پذیر)، نمایانگر چرخش فناوری این صنعت به سمت اقتصاد چرخه‌ای و استفاده از مواد زیست‌پایه (مانند PLA، PHA، کیتوزان) و شاخص‌های طبیعی (مانند رنگدانه‌های هالکرومیک) است. خوشه ۳ (نوآوری و زنجیره تأمین)، جدیدترین و پیشرفته‌ترین لایه این گفتمان است که بسته‌بندی را نه به‌عنوان یک محصول، بلکه به‌عنوان یک «گره داده» در زنجیره تأمین دیجیتال می‌بیند و بر مفاهیمی چون شفافیت، ردیابی، بلاک‌چین و تعامل با مصرف‌کننده تأکید دارد.

جدول(۸). واژگان غالب و عناوین مفهومی خوشه‌های پژوهشی
Table. 8. Dominant Terms and Conceptual Titles of the Research Clusters

Cluster	Conceptual Title	Dominant Keywords (Selected)
Cluster 1	Technologies and Sensors	sensor, biosensor, indicator, gas, TTI, pH, freshness, antimicrobial, RFID, IoT
Cluster 2	Sustainability and Biodegradable Materials	sustainability, biodegradable, bio-based, PLA, PHA, chitosan, nanocellulose, halochromic, natural dyes, LCA
Cluster 3	Innovation and Food Supply Chain	innovation, traceability, blockchain, supply chain, cold chain, data, transparency, QR code, authenticity, consumer

۶.۴. نقشه مفهومی و تحول تاریخی حوزه

ترکیب نتایج خوشه‌بندی با تحلیل زمانی مقالات، امکان ترسیم یک نقشه مفهومی از تحول تاریخی این حوزه را فراهم کرد. این تحلیل نشان می‌دهد که پژوهش‌های بسته‌بندی هوشمند از یک فناوری صرفاً «فناوری‌محور» (مربوط به خوشهٔ ۱، عمدتاً در دورهٔ ۲۰۰۵–۲۰۱۵) که هدف

آن توسعه ابزارهای پایش بود، به یک فناوری «پایداری‌محور» (مربوط به خوشهٔ ۲، با اوج‌گیری در دورهٔ ۲۰۱۶-۲۰۲۱) که بر جایگزینی مواد نفتی و کاهش اثر کربنی تمرکز داشت، تحول یافته است. در نهایت، جریان سوم و معاصر، یک فناوری «داده‌محور» (مربوط به خوشهٔ ۳، از ۲۰۲۱ تاکنون) است که بر دیجیتالی‌سازی زنجیرهٔ تأمین، شفافیت مبتنی‌بر بلاک‌چین و اعتماد مصرف‌کننده تمرکز دارد. این سه دوره، نشان‌دهنده بلوغ این حوزه از یک «محصول فنی» به یک «سیستم داده‌محور و پایدار» است.

جدول (۹). تحول مفهومی حوزه بسته‌بندی هوشمند در سه دوره زمانی

Table. 9. Conceptual Evolution of the Smart Packaging Field across Three Time Periods

Period	Research Axis	Dominant Keywords	Scientific / Practical Objective
~2005–2015	Technologies and Sensors (Cluster 1)	sensor, indicator, gas, TTI, biosensor	Development of tools for monitoring food spoilage and quality.
~2016–2021	Sustainability and Materials (Cluster 2)	biodegradable, PLA, PHA, chitosan, halochromic	Replacement of petroleum-based materials; low-carbon solutions.
~2021–Present	Innovation and Supply Chain (Cluster 3)	innovation, blockchain, traceability, transparency, consumer	Digitalization of the supply chain; increasing transparency and trust.

۷.۴. مطالعه موردی و ادغام نهایی یافته‌ها

برای ادغام یافته‌ها و بررسی کاربرد عملی مدل‌ها، «بسته‌بندی هوشمند توت‌فرنگی» به‌عنوان یک مطالعه موردی ایده‌آل (به‌دلیل فسادپذیری بالا و ارزش اقتصادی زیاد) تحلیل شد. این مطالعه موردی نشان داد که یافته‌های کمی و کیفی پژوهش چگونه در عمل با یکدیگر تلاقی می‌کنند.

همگرایی یافته‌ها (تلفیق کمی و کیفی):

ادغام نتایج دو بخش، هسته اصلی یافته‌های این پژوهش را تشکیل می‌دهد. تحلیل کمی (رگرسیون) یک مدل پیش‌بینی‌کننده بسیار قوی، دقیق و پایدار ($Adj. R^2$ = 0/919, RMSE = 4/79, CV-R^2 = 0/908) ارائه داد. این مدل به‌طور کمی ثابت کرد که «پیچیدگی فناوری» (Factor 1) قوی‌ترین عامل مثبت (β=51/20) در افزایش قیمت بسته‌بندی هوشمند است. پس از آن، «ارزش افزوده عملکردی» (Factor 2) با ضریب مثبت (β=19/23) در رتبه دوم قرار دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بازار برای نوآوری‌های فنی و قابلیت‌های عملکردی ملموس، ارزش مالی بالایی قائل است. تحلیل کیفی (متن‌کاوی) این نتایج را کاملاً تأیید و تفسیر می‌کند. تحلیل خوشه‌بندی نشان داد که گفتمان علمی نیز بر سه محور اصلی استوار است. هم‌راستایی قابل توجهی میان یافته‌های دو بخش وجود دارد:

۱. همگرایی در محور فناوری: مدل کمی نشان داد «فناوری» (Factor 1) بیشترین تأثیر را بر قیمت دارد. مدل کیفی نیز نشان داد که «فناوری و حسگرها» (خوشهٔ ۱) ستون فقرات تاریخی و فنی این حوزه است. این همگرایی تأیید می‌کند که فناوری، هم در پژوهش و هم در بازار، محرک اصلی ارزش محسوب می‌شود. در مطالعه موردی توت‌فرنگی، این به معنای آن است که افزودن حسگرهای زمان-دما (TTI) یا نشانگرهای گازی (اتیلن/CO_2) که مستقیماً به کاهش ضایعات (۲۰٪ تا ۳۰٪) کمک می‌کنند، بیشترین ارزش اقتصادی و بازگشت سرمایه را ایجاد می‌کند.

۲. همگرایی در محور عملکرد و نوآوری: مدل کمی «ارزش افزوده عملکردی» (Factor 2) را به‌عنوان دومین عامل مثبت قیمت‌گذاری شناسایی کرد. مدل کیفی این «ارزش افزوده» را در قالب «نوآوری در زنجیره تأمین» (خوشه ۳) بازتعریف کرد. این نشان می‌دهد که ارزش، دیگر صرفاً در عملکردهای فیزیکی (مانند فیلم‌های جاذب رطوبت) نیست، بلکه در عملکردهای داده‌محور (مانند ردیابی، شفافیت بلاک‌چین و اثبات اصالت) نهفته است. در مورد توت‌فرنگی، این به معنای قابلیت ردیابی دقیق زنجیره سرد و ارائه شفافیت به مصرف‌کننده از طریق QR code است که اعتماد و در نتیجه ارزش درک‌شده را افزایش می‌دهد.

۳. تبیین چالش پایداری: مدل کمی یک یافته چالش‌برانگیز را آشکار ساخت: «سطح پایداری» (Factor 3) تأثیر منفی اما معناداری (β=-8.591) بر

قیمت دارد. تحلیل کیفی این پدیده را به‌خوبی تبیین می‌کند. «پایداری و مواد زیست‌تخریب‌پذیر» (خوشه ۲) به‌عنوان یک جریان پژوهشی قوی اما مجزا شناسایی شد. این جدایی نشان می‌دهد که علم پایداری هنوز به‌طور کامل با منطق اقتصادی بازار ادغام نشده است. در مطالعه موردی توت‌فرنگی، این بدان معناست که جایگزینی بسته‌بندی پلاستیکی (PET) با مواد گران‌تری مانند PLA، اگرچه از نظر علمی (خوشه ۲) مطلوب است، اما از نظر اقتصادی (مدل کمی) به‌عنوان یک هزینه اضافی تلقی می‌شود که بازار هنوز تمایلی به پرداخت آن ندارد. این یافته، شکاف میان اهداف زیست‌محیطی و واقعیت‌های اقتصادی را برجسته می‌کند. در جمع‌بندی نهایی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که گفتمان علمی و ساختار اقتصادی بسته‌بندی هوشمند بر سه رکن «فناوری»، «پایداری» و «داده» استوار است. مدل رگرسیون با دقت بسیار بالا ($Adj. R^2 = 0/919$, $RMSE = 4/79$) ثابت کرد که فناوری، محرک اصلی قیمت است، در حالی که پایداری هنوز یک چالش اقتصادی محسوب می‌شود. همزمان، تحلیل کیفی نشان داد که جهت‌گیری علمی جهانی در حال حرکت از تمرکز صرف بر فناوری (خوشه ۱) به سمت ادغام آن با پایداری (خوشه ۲) و شفافیت داده‌محور (خوشه ۳) است. بنابراین، آینده این صنعت نه در هر یک از این بخش‌ها به تنهایی، بلکه در همگرایی موفقیت‌آمیز این سه محور نهفته است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر پذیرش و قیمت‌گذاری بسته‌بندی هوشمند در صنعت مواد غذایی، بر پایه یک رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) طراحی شد. فصل چهارم، یافته‌های تجربی و محاسباتی را ارائه نمود. در بخش کمی، یک مدل رگرسیون خطی چندگانه با قدرت تبیین بالا ($Adj. R^2 = 0/919$) توسعه یافت که نشان داد سه عامل «پیچیدگی فناوری»، «ارزش افزوده عملکردی» و «سطح پایداری»، مجموعاً ۹۱/۹٪ از تغییرات قیمت بسته‌بندی هوشمند را تبیین می‌کنند. در بخش کیفی، تحلیل متن‌کاوی و خوشه‌بندی، ساختار دانش این حوزه را به سه جریان اصلی «فناوری و حسگرها»، «پایداری و مواد زیست‌تخریب‌پذیر» و «نوآوری و زنجیره تأمین» تقسیم کرد. فصل حاضر به تفسیر این یافته‌ها، پاسخ‌گویی به فرضیه‌های تحقیق و ارائه تصویری یکپارچه از دستاوردهای پژوهش اختصاص دارد. در این بخش، نتایج آماری در پرتو روندهای علمیِ شناسایی‌شده تفسیر می‌شوند تا نشان داده شود که چگونه منطق اقتصادی بازار و جهت‌گیری علمی جهانی در حوزهٔ بسته‌بندی هوشمند با یکدیگر در تعامل هستند.

۱.۵. تفسیر یافته‌ها و پاسخ به فرضیه‌ها

تأیید فرضیه اول (محوریت فناوری):

فرضیه اول پژوهش مبنی‌بر تأثیر مثبت و معنادار «پیچیدگی فناوری» بر قیمت بسته‌بندی هوشمند، به‌طور کامل تأیید شد. مدل رگرسیون (جدول ۷) نشان داد که «پیچیدگی فناوری» (Factor1) با ضریب (51/204+)، نه‌تنها تأثیر مثبت، بلکه قوی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین اثر را در میان سه متغیر بر قیمت نهایی دارد. این یافته آماری به‌طور مستقیم با نتایج تحلیل کیفی هم‌راستا است. «خوشه ۱: فناوری و حسگرها» (جدول ۸)، به‌عنوان هسته فنی و تاریخی این حوزه شناسایی شد که واژگانی چون sensor، biosensor، nanotechnology و RFID در مرکز آن قرار دارند. این هم‌گرایی میان ضریب رگرسیون بالا و مرکزیت خوشه علمی، تأیید می‌کند که هم بازار (از نظر اقتصادی) و هم جامعه علمی (از نظر پژوهشی)، «فناوری» را به‌عنوان محرک اصلی ارزش در بسته‌بندی هوشمند به رسمیت می‌شناسند. در مطالعه موردی توت‌فرنگی، این بدان معناست که افزودن حسگرهای زمان-دما (TTI) یا نشانگرهای گازی (که مستقیماً به کاهش ضایعات کمک می‌کنند)، بیشترین بازگشت سرمایه و ارزش درک‌شده را برای مصرف‌کننده و زنجیره تأمین ایجاد می‌کند.

تأیید فرضیه دوم (نقش عملکرد):

فرضیه دوم مبنی‌بر تأثیر مثبت «ارزش افزوده عملکردی» بر قیمت، اما با شدتی کمتر از فناوری، نیز تأیید گردید. مدل رگرسیون (جدول ۷) نشان داد که «ارزش افزوده عملکردی»

(Factor2)دارای ضریب مثبت و معنادار (۱۹/۲۲۸+) است که از نظر قدر مطلق، پس از فناوری در رتبه دوم قرار دارد. این یافته نشان می‌دهد که قابلیت‌های فعال (مانند ضدمیکروبی یا جاذب اتیلن) و کارکردهای سیستمی، ارزش اقتصادی محصول را افزایش می‌دهند. تحلیل کیفی این یافته را در قالب «خوشه ۳: نوآوری و زنجیره تأمین» (جدول ۸) تبیین می‌کند. این خوشه نشان داد که ارزش عملکردی در حال گذار از مفاهیم فیزیکی (مانند فیلم‌های فعال) به سمت مفاهیم داده‌محور (مانند traceability، blockchain و transparency) است. بنابراین، بازار نه‌تنها برای بسته‌بندی که محصول را تازه نگه می‌دارد، بلکه برای بسته‌بندی که اصالت و شفافیت اطلاعاتی را تضمین می‌کند نیز ارزش قائل است.

تأیید فرضیه سوم (چالش پایداری):

فرضیه سوم، که چالش‌برانگیزترین بخش مدل بود، بیان می‌کرد که استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در کوتاه‌مدت، تأثیر منفی بر سودآوری دارد. مدل رگرسیون (جدول ۷) این فرضیه را با نشان‌دادن یک ضریب منفی و معنادار (۸/۵۹۱-) برای «سطح پایداری»(Factor3) تأیید کرد. این یافته مهم نشان می‌دهد که در شرایط فعلی بازار، پایداری هنوز به‌عنوان یک «هزینه» اضافی (به‌دلیل گران‌تربودن موادی چون PLA یا PHA) تلقی می‌شود تا یک «ارزش» قابل قیمت‌گذاری. تحلیل کیفی نیز این شکاف را تأیید کرد؛ «خوشه ۲: پایداری و مواد زیست‌تخریب‌پذیر» (جدول ۸) به‌عنوان یک جریان پژوهشی قوی اما مجزا شناسایی شد. این جدایی نشان می‌دهد که اهداف علمی در زمینه پایداری (که در ادبیات بسیار پرتکرار است) هنوز به‌طور کامل با مدل‌های اقتصادی و پذیرش بازار همگرا نشده‌اند.

تأیید فرضیه چهارم (هم‌گرایی علم و بازار):

فرضیه چهارم مبنی‌بر هم‌راستایی روندهای علمی جهانی با اثرات اقتصادی در بازار، با تلفیق یافته‌های دو بخش تأیید شد. نتایج نشان داد که حوزه‌هایی که در تحلیل کیفی (متن‌کاوی) به‌عنوان محورهای اصلی و پرتکرار پژوهشی شناسایی شدند (خوشه ۱ و ۳)، دقیقاً همان عواملی هستند که در تحلیل کمی (رگرسیون) بیشترین ضرایب مثبت و تأثیر اقتصادی را نشان دادند (Factor1 و Factor2). این هم‌گرایی ثابت می‌کند که منطق اقتصادی حاکم بر بازار و جهت‌گیری علمی جهانی در حوزه بسته‌بندی هوشمند به‌طور قابل‌توجهی هم‌راستا هستند.

۲.۵. نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر با موفقیت نشان داد که پذیرش و قیمت‌گذاری بسته‌بندی هوشمند، پدیده‌ای چندوجهی است که توسط تعامل سه عامل کلیدی «فناوری»، «عملکرد» و «پایداری» هدایت می‌شود. مدل کمی این پژوهش با قدرت تبیین بسیار بالا ($Adj. R^2 = 0/919$) و دقت پیش‌بینی قابل توجه (RMSE = 4/79) ثابت کرد که «پیچیدگی فناوری» محرک اصلی و غالب در ارزش‌گذاری اقتصادی این محصولات است. همزمان، «ارزش افزوده عملکردی»، به‌ویژه در ابعاد نوین خود یعنی شفافیت داده‌محور و ردیابی، نقش مکمل مهمی در افزایش قیمت ایفا می‌کند. مهم‌ترین یافته پژوهش، شناسایی شکاف میان اهداف «پایداری» و واقعیت «اقتصادی» بود. ضریب منفی متغیر پایداری در مدل رگرسیون، هم‌زمان با شناسایی «پایداری» به‌عنوان یک خوشه علمی مجزا در تحلیل کیفی، نشان می‌دهد که صنعت بسته‌بندی هوشمند در حال گذار است. این صنعت از یک مرحله صرفاً «فناوری‌محور» (تمرکز بر حسگرها) عبور کرده و وارد مرحله «فناوری پایدار» شده است، اما هنوز نتوانسته است چالش هزینه‌های مرتبط با مواد زیست‌پایه را به‌طور کامل حل کند. نقشه مفهومی و تحلیل تاریخی (جدول ۹) نیز این گذار را تأیید کرد و نشان داد که گفتمان علمی از توسعه حسگرها (خوشه ۱) به سمت مواد زیست‌پایه (خوشه ۲) و نهایتاً به سمت سیستم‌های داده‌محور و بلاک‌چین (خوشه ۳) در حال تحول است. بنابراین، آینده بسته‌بندی هوشمند نه در هر یک از این سه حوزه به تنهایی، بلکه در «همگرایی» موفقیت‌آمیز این سه محور نهفته است: توسعه حسگرهای کارآمد که بر بسترهای زیست‌تخریب‌پذیر چاپ شده و به یک زنجیره تأمین شفاف و داده‌محور متصل هستند.

۳.۵. پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر در دو سطح نظری و اجرایی ارائه می‌گردد:

۱.۳.۵. پیشنهادهای نظری و پژوهش‌های آینده

۱. استفاده از مدل‌های غیرخطی و داده‌های واقعی: این پژوهش از مدل رگرسیون خطی و داده‌های شبیه‌سازی‌شده استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با استفاده از داده‌های واقعی صنعتی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی یا شبکه‌های عصبی) که قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی هستند، به بررسی موضوع بپردازند.

۲. ادغام ارزیابی چرخه عمر (LCA) : یافته‌ها شکاف هزینه در پایداری را نشان داد. پژوهش‌های آتی باید مدل‌های اقتصادی را با ارزیابی چرخه عمر (LCA) تلفیق کنند تا هزینه واقعی زیست‌محیطی در کنار هزینه اقتصادی سنجیده شود.

۳. تحلیل رفتار مصرف‌کننده: این پژوهش بر ابعاد فنی و اقتصادی متمرکز بود. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از مدل‌های پذیرش فناوری (مانند TAM یا TPB)، نگرش مصرف‌کننده، تمایل به پرداخت برای پایداری و سطح اعتماد به داده‌های حسگرها را در ایران تحلیل کنند.

۴. گسترش مطالعه موردی: این پژوهش بر توت‌فرنگی متمرکز بود. پیشنهاد می‌شود این مدل برای سایر محصولات حساس (مانند گوشت، لبنیات و دارو) که نیازمندی‌های متفاوتی (مانند حسگرهای pH یا میکروبی) دارند، آزمون شود.

۲.۳.۵. پیشنهادهای اجرایی و سیاستی

۱. سرمایه‌گذاری هدفمند در R&D: با توجه به ضریب بالای فناوری، به صنایع و نهادهای دولتی پیشنهاد می‌شود که بر توسعه و بومی‌سازی حسگرهای کم‌هزینه و فناوری‌های ردیابی (RFID/IoT) تمرکز کنند، زیرا این بخش بیشترین بازده اقتصادی را دارد.

۲. تدوین استانداردهای ملی: برای جلب اعتماد مصرف‌کننده و تسهیل تجارت، ضروری است که استانداردهای ملی مدونی (مشابه FDA و EFSA) برای ایمنی مواد در تماس با غذا (به‌ویژه نانومواد) و دقت عملکرد حسگرها تدوین گردد.

۳. ایجاد پیوند دانشگاه و صنعت: برای پر کردن شکاف میان پژوهش (تمرکز بر پایداری) و صنعت (چالش هزینه)، پیشنهاد می‌شود کنسرسیوم‌های مشترک میان دانشگاه‌ها و صنایع غذایی برای تجاری‌سازی مواد زیست‌پایه و کاهش هزینه‌های تولید آن‌ها ایجاد شود.

۴. سیاست‌های حمایتی برای پایداری: با توجه به ضریب منفی پایداری، پیشنهاد می‌شود مشوق‌های مالیاتی یا یارانه‌های سبز برای صنایعی که از بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر هوشمند استفاده می‌کنند، در نظر گرفته شود تا شکاف هزینه کوتاه‌مدت آن‌ها جبران گردد.

۴.۵. محدودیت‌های پژوهش

اعتبار این پژوهش با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته، با محدودیت‌هایی مواجه است. مهم‌ترین محدودیت، استفاده از داده‌های کمی شبیه‌سازی‌شده به جای داده‌های واقعی بازار بود که به‌دلیل عدم دسترسی و محرمانه‌بودن اطلاعات شرکت‌ها صورت گرفت. دوم، بخش کیفی به مقالات زبان انگلیسی و بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ محدود بود و ممکن است بخشی از تحولات جدیدتر یا ادبیات غیرانگلیسی‌زبان را پوشش نداده باشد. سوم، مدل رگرسیون استفاده‌شده خطی بود و قادر به سنجش روابط پیچیده و غیرخطی بازار نبود. چهارم، این پژوهش فاقد تحلیل رفتار مصرف‌کننده به‌عنوان یک بعد انسانی و اجتماعی کلیدی در پذیرش فناوری بود. در نهایت، تمرکز بر داده‌های جهانی، محدودیت‌هایی را برای تعمیم‌پذیری مستقیم نتایج به شرایط بومی و ساختار صنعتی ایران ایجاد می‌کند. این محدودیت‌ها، ضمن تعیین چارچوب اعتبار نتایج، خود به‌عنوان راهنما برای پژوهش‌های آتی عمل می‌کنند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی و سپاس خود را از تمامی افرادی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در انجام این پژوهش و تهیه این مقاله همکاری و راهنمایی داشته‌اند، ابراز می‌دارند.

منابع

[1] Gupta, S. (2025). Advances in smart food packaging for a sustainable future. *IOP Conference Series: Earth. Environ. Sci.*, 1488(1), 012117. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1488/1/012117

[2] Chen, S., Brahma, S., Mackay, J., Cao, C., & Aliakbarian, B. (2020). The role of smart packaging system in food supply chain. *J. Food Sci*. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15046

[3] Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2021). Recent advances in intelligent food packaging. *Food Chem.*, 375, 131738. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131738

[4] Du, L., Huang, X., Li, Z., Qin, Z., Zhang, N., Zhai, X., ... & Wang, Y. (2025). Application of Smart Packaging in Fruit and Vegetable Preservation. *Foods*. https://doi.org/10.3390/foods14030447

[5] Park, S., Han, T., Gwon, Y., Kim, H., & Kim, J. (2022). Biodegradable and flexible nanoporous films for design and fabrication of active food packaging systems. *Nano Letters*. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c00246

[6] Ahari, H., & Soufiani, S. P. (2021). Smart and active food packaging: Insights in novel food packaging. *Front. Microbiol*., 12, 657233. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.657233

[7] Mohammadian, E., Alizadeh-Sani, M., & Jafari, S. M. (2020). Smart monitoring of gas/temperature changes within food packaging based on natural colorants. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., 19*(6), 2885-2931. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12635

[8] Matthes, J., & Schmid, M. (2024). Biogenic Raw Materials from Food Waste and By-Products for Smart Packaging Applications. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100894

[9] Baneshi, M., Aryee, A. N., English, M., & Mkandawire, M. (2024). Designing plant-based smart food packaging solutions. *Food Chem. Adv*. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100769

[10] Heryanto, Heryanto., Artasasta, Muh Ade., Tahir, Dahlang., Alomari, Ali., Partini, Juliasih., Akouibaa, Abdelillah.(2025). Development of a biodegradable smart packaging film with ZnO nanoparticles and anthocyanins for real-time freshness monitoring of shrimps. *Food BioSci*., 69(106966) https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106966

[11] Bhatlawande, A. R., Ghatge, P. U., Shinde, G. U., Anushree, R. K., & Patil, S. D. (2023). Unlocking the future of smart food packaging: Biosensors, IoT, and nano materials. *Food Sci. Biotechnol*., 33, 1075–1091. https://doi.org/10.1007/s10068-023-01486-9

[12] Achmadi, E. R. (2023). Strategies managing smart packaging for food application. *J. Food Agric. Prod*., 3(1). https://doi.org/10.32585/jfap.v3i1.3593

[13] Kusuma, H., Yugiani, P., Himana, A. I., Aziz, A., & Putra, D. A. W. (2023). Reflections on food security and smart packaging. *Polym. Bull*. https://doi.org/10.1007/s00289-023-04734-4

[14] Young, E., Mirosa, M., & Bremer, P. (2020). A systematic review of consumer perceptions of smart packaging technologies for food. *Front. Sustain. Food Syst*., 4, 63. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00063

[15] Silva, A. S & ,.Jafari, S. (2022). The evolution of food packaging, the active food packaging concept and its current and future trends. *Food Bioactive*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90299-5-1

[16] Zhang, X., Wen, H & ,.Shao, X. (2024). Understanding consumers' acceptance of edible food packaging: The role of consumer innovativeness. *J. Retail. Consum. Serv*. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.103903

[17] Markevičiūtė, Z & ,.Varžinskas, V. (2022). Smart material choice: The importance of circular design strategy applications for bio-based food packaging. *Sustain*. https://doi.org/10.3390/su14106366

[18] Siciliano, S., Lopresto, C. G., Lamonaca, F. (2024). From traditional packaging to smart bio-packaging for food safety: a review. https://doi.org/10.1007/s41207-024-00627-8

[19] Pereira de Abreu, D., Cruz, J. M.& Paseiro Losada, P. (2021). Active and intelligent packaging for the food industry. *Food Rev. Int*., 28(2), 146–187. https://doi.org/10.1080/87559129.2011.595022

[20] Suin, S. (2024). A Decade of Eco-Friendly Active and Intelligent Food Packaging Research: A Quantitative Review. *Environ. Res. Technol*. https://doi.org/10.35208/ert.1501449

[21] Abekoon, Thilina., Buthpitiya, B. L.S.K., Sajindra, Hirushan., Samarakoon, E. R.J., Jayakody, Anuradha J.A., Kantamaneni, Komali ., Rathnayake, Upaka Sanjeewa .(2024). A comprehensive review to evaluate the synergy of intelligent food packaging with modern food technology and artificial intelligence field. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00371-7

[22] Sharma, M., Bains, A., Nagraik, R., Fareed, M., Chawla, P. (2025). Advances in oleogel technology for sustainable and intelligent food packaging strategies. *Trends Food Sci. Technol*. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105325

[23] Yüceer, M & ,.Caner, C. (2023). Intelligent packaging and applications in the food industry. Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi. https://doi.org/10.56833/gidaveyem.1329885

[24] Dutta, K., Förster, C.Y., Orlova, O. Y., Dandekar, T., Skorb, Ekaterina V., Shityakov, Sergey V. (2025). Natural polyphenols for sustainable active, smart, and intelligent food packaging: a structured narrative review. https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1604816

[25] Heo, W & ,.Lim, S. Y. (2024). A Review on Gas Indicators and Sensors for Smart Food Packaging. *Foods*, 13. https://doi.org/10.3390/foods13193047

[26] Fernández, C. M., Alves, J., Gaspar, P., Lima, T. M. & Silva, P. (2022). Innovative processes in smart packaging: A systematic review. *J. Food Agric*. https://doi.org/10.1002/jsfa.11863

[27] Pandhi, S., Kumari, N., Jain, A., Sharma, V. (2025). Emerging technologies in food safety: AI-powered, nano-enabled, and biosensor-based strategies for rapid contaminant detection. https://doi.org/10.1007/s12161-025-02844-5

[28]Raahim, M., et al. (2025). Impact of product pricing, packaging information, and brand trust on consumer purchase intention and loyalty. *Journal of Management & Social Science*. https://doi.org/10.63075/jmss.v2i1.72

[29]Li, T., Lloyd, K., Birch, J., Wu, X., Mirosa, M & ,. Liao, X. (2020). A quantitative survey of consumer perceptions of smart food packaging in China. *Food Sci. Nutr*., 8, 3977–3988. https://doi.org/10.1002/fsn3.1563

DOI: http://dx.doi.org/10.22104/IFT.2026.8178.2278

Innovative Food Technologies, 13(4), 363-382, Summer 2026

Research Article

Cluster analysis of smart food packaging technologies based on technological complexity and environmental sustainability: A case study of strawberries

Khadijeh Rajabloo[1], Seyed Hadi Razavi[2*], Zahra Emam Jomeh[3]

1. PhD Candidate in Food Science and Engineering, Aras International Campus, University of Tehran
2. Professor, Department of Food Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran
3. Professor, Department of Food Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran

(Received: 10 March 2026, Received in revised form: 03 April 2026, Accepted: 05 April 2026)

Introduction: Global food supply chains are increasingly challenged by high levels of food loss, short shelf life of perishable products, and growing consumer demand for food safety, quality assurance, and transparency. Conventional food packaging systems, which primarily serve passive protective functions, are no longer sufficient to address these challenges, particularly for highly perishable fruits such as strawberries. In response, smart packaging has emerged as an innovative technological solution capable of monitoring product quality, environmental conditions, and supply chain integrity through the integration of sensors, indicators, and digital communication technologies. Despite its technical potential, the large-scale adoption of smart packaging remains limited, mainly due to uncertainties related to pricing, economic feasibility, and market acceptance. The price of smart packaging is influenced by a complex interaction of technological complexity, functional performance, and sustainability considerations. However, empirical studies that simultaneously quantify these economic drivers and contextualize them within global scientific trends remain scarce. Therefore, this study aims to analyze the key determinants of smart packaging pricing using a convergent mixed-methods approach. Specifically, it seeks to (i) quantitatively evaluate the effects of technological complexity, functional added value, and environmental sustainability on pricing, and (ii) qualitatively map the conceptual structure and dominant research streams in the international smart packaging literature. By integrating economic modeling with text-mining-based knowledge mapping, this research provides a comprehensive understanding of how scientific priorities align—or conflict—with market valuation mechanisms in the smart food packaging domain.
Materials and methods: This research adopts a convergent mixed-methods design in which quantitative and qualitative analyses are conducted in parallel and integrated at the interpretation stage. In the quantitative phase, a multiple linear regression model was employed to assess the impact of three independent variables—technological complexity, functional added value, and sustainability level—on the dependent variable of smart packaging price. Due to the limited availability of real industrial pricing data, a cross-sectional dataset consisting of 120 simulated market observations was generated based on theoretical assumptions and industry reports. All independent variables were normalized to a 0–1 scale to enable direct comparison of regression coefficients. Model validity was evaluated using goodness-of-fit indicators (R^2, adjusted R^2, RMSE), multicollinearity diagnostics, residual analysis, and five-fold cross-validation. In the qualitative phase, a corpus of peer-reviewed international scientific publications on smart food packaging published between 2020 and

* **Corresponding Author Email:** srazavi@ut.ac.ir

2025 was analyzed. Text-mining techniques were applied to article titles and keywords. After preprocessing (tokenization, normalization, and stop-word removal), documents were vectorized using the TF-IDF method. K-Means clustering was then used to identify major thematic clusters within the literature, with the optimal number of clusters determined using the silhouette coefficient. This dual methodological framework enabled both statistical inference and conceptual mapping of the field.

Results and discussion: The quantitative results demonstrate that the regression model exhibits strong explanatory power, accounting for 91.9% of the variance in smart packaging prices (adjusted $R^2 = 0.919$), with a low prediction error (RMSE = 4.79). Technological complexity emerged as the most influential positive determinant of price ($\beta = 51.20$), indicating that advanced sensing and connectivity features significantly increase market value. Functional added value, such as shelf-life extension and antimicrobial performance, also showed a positive and significant effect on price ($\beta = 19.23$), though with a lower magnitude. In contrast, sustainability level displayed a statistically significant negative effect on price ($\beta = -8.59$), suggesting that, under current market conditions, the use of biodegradable and bio-based materials is perceived as a cost burden rather than a value-adding attribute. The qualitative analysis revealed three dominant research clusters: (1) technology and sensors, focusing on monitoring freshness and safety; (2) sustainability and biodegradable materials, emphasizing bio-based polymers and environmental impact reduction; and (3) innovation and data-driven supply chains, highlighting traceability, blockchain, and transparency. The integration of findings shows strong alignment between market pricing drivers and the dominant technological research stream, while revealing a clear disconnect between the scientific emphasis on sustainability and its negative economic valuation. This mismatch highlights a critical challenge in the commercialization of sustainable smart packaging solutions.

Conclusions: This study demonstrates that smart packaging pricing is primarily driven by technological complexity and functional performance, while sustainability currently faces economic resistance in the market. Although scientific research strongly promotes environmentally friendly materials, their costs are not yet fully internalized as market value. The future of smart packaging lies in the successful integration of advanced sensing technologies, data-driven supply chains, and cost-effective sustainable materials. Bridging the economic gap associated with sustainability will be essential for large-scale adoption.

Keywords: ***Smart packaging, pricing, technological complexity, sustainability, cluster analysis***