

Investigating the Impact of E-Commerce Adoption on Waste Reduction and Recycling in Businesses: Evidence from Selected EU Countries

Mohadeseh Azimi Panah Rayin¹ ; Alireza Hassanzadeh Jezdani^{2*} ; Mehdi Nejati³

1. M.Sc., Department of Economics, Faculty of Management & Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
- *2. Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Management & Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Management & Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

*Email Address: a.hassanzadeh@uk.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/07/13 Revised Date: 2026/08/05 Accepted Date: 2026/08/26 Published Date: 2026/08/26 Keywords: E-commerce adoption, Waste reduction, Recycling, Environmental policies.	The expansion of the digital economy and e-commerce has provided new opportunities for economic growth by transforming the ways of production, distribution, and consumption. However, e-commerce can exacerbate new environmental challenges. The present study aims to investigate the impact of e-commerce adoption on waste generation and recycling rates in 12 European Union member states during the period 2015-2020. To estimate the research models, the generalized least squares (EGLS) method with cluster-robust standard errors was used. The findings show that the relationship between e-commerce adoption and per capita waste generation is conditional and dependent on the intensity of environmental policies (EPS): the direct coefficient of e-commerce is -4.96 the coefficient of its interaction term with EPS is estimated to be 4.70 (both significant at the 99% confidence level). Only in countries with weaker environmental policies (EPS less than about 2.87) does increased e-commerce adoption significantly reduce per capita waste generation; whereas at higher levels of regulatory stringency (including the sample mean ($EPS \approx 2.99$)) the net effect of e-commerce becomes positive. Similarly, e-commerce adoption is positively correlated with recycling rates and is dependent on EPS: a direct coefficient of 2.95 and an interaction term coefficient of -2.88; this incremental effect holds only at low levels of regulatory stringency and becomes a small and negative effect at higher levels (including the sample mean). Environmental policies play a significant moderating role in these relationships. Accordingly, e-commerce should not be considered a substitute for environmental policymaking; Rather, combining it with smart regulatory tools (such as tax incentives for circular packaging, requiring intermediary platforms to comply with extended producer responsibility in cross-border trade through the Digital Product Passport (ESPR), and developing reverse logistics infrastructure in densely populated urban areas) provides a more reliable path to achieving circular economy goals.
Cite this article:	Mohadeseh Azimi Panah Rayin , Alireza Hassanzadeh Jezdani , Mehdi Nejati (2026) Investigating the Impact of E-Commerce Adoption on Waste Reduction and Recycling in Businesses: Evidence from Selected EU Countries , Journal of Environmental Sciences Studies, 11(2), Pages11188-11201.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The rapid expansion of the digital economy and e-commerce has fundamentally transformed global production, distribution, and consumption paradigms, offering unprecedented opportunities for economic growth and operational efficiency. As physical processes are increasingly replaced by digital alternatives—a phenomenon known as dematerialization—there is a theoretical expectation of reduced environmental pressure. However, the concurrent rise in e-commerce has introduced a complex environmental paradox. While digitalization optimizes supply chain management and reduces inventory waste, it simultaneously exacerbates new environmental challenges, most notably the exponential increase in individual packaging, fragmentation of the last-mile delivery, and elevated rates of product returns. Despite these conflicting outcomes, empirical research quantifying the net effect of business-level e-commerce adoption on internal waste management indicators remains scarce. Most existing literature focuses heavily on macroscopic carbon footprints or qualitative consumer-side packaging issues rather than firm-level operational outcomes. To address this critical gap, the present study aims to quantitatively investigate the impact of e-commerce adoption on waste generation and recycling rates among businesses in 12 selected European Union (EU) member states over the period from 2015 to 2020. Furthermore, the study explores the moderating role of environmental policy stringency (EPS) in shaping these relationships, providing nuanced insights into the interplay between technological adoption and institutional frameworks.

Materials and methods

This research adopts an applied, descriptive-analytical approach utilizing balanced panel data from 12 EU member countries (Austria, Belgium, Czech Republic, Germany, Hungary, Italy, Netherlands, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, and Spain) spanning from 2015 to 2020. Data were meticulously compiled from highly authoritative international databases, including Eurostat, the World Bank, and the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). The dependent variables are per capita waste generation (WG) and the recycling rate (RR). The primary independent variable is the rate of e-commerce adoption among businesses (ECOM), measured as the percentage of enterprises engaged in electronic sales. The moderating variable is the OECD's Environmental Policy Stringency (EPS) index. Control variables encompass energy consumption (NRG), gross domestic product per capita (GDP), and population density (POPDENS). Given that official waste management statistics are systematically reported on a biennial basis (even years), a scientifically rigorous linear interpolation method was employed to estimate values for the intervening odd years (2015, 2017, 2019), ensuring a continuous time series while preserving local macroeconomic trends. For the econometric analysis, preliminary diagnostic tests (Chow, Breusch-Pagan, and Hausman) were conducted, which collectively indicated that the Random Effects model was the most appropriate structural specification. However, subsequent tests confirmed the presence of cross-sectional heteroscedasticity and serial autocorrelation within the panel data. To robustly correct for these classical assumption violations, the models were estimated using the Estimated Generalized Least Squares (EGLS) method, fortified with cluster-robust standard errors to ensure the validity of statistical inferences.

Results and discussion

The econometric estimations yielded highly significant and nuanced findings. In the first model (Waste Generation), the direct coefficient of e-commerce adoption was -4.96 ($p < 0.01$), indicating a strong waste-reducing potential inherent to digital commerce operations. However, the interaction term between e-commerce and environmental policy stringency ($ECOM \times EPS$) exhibited a significant positive coefficient of $+4.70$ ($p < 0.01$). Marginal effect analysis reveals a conditional relationship: e-commerce significantly reduces per capita waste generation only in regulatory environments where the EPS index is relatively weak (below a threshold of approximately 2.87). In countries with stricter environmental regulations—which encompasses the sample mean ($EPS \approx 2.99$)—the net effect of e-commerce neutralizes and even shifts to a slightly positive value. This dynamic can be explained through institutional isomorphism; under weak regulations, the intrinsic efficiencies of e-commerce (e.g., dematerialization, inventory optimization) create a substantial comparative advantage over traditional retail. Conversely, stringent regulations enforce high resource-efficiency standards across all market participants, eroding the relative advantage of digital platforms while exposing the rebound effects of increased packaging waste associated with granular e-commerce logistics. A parallel

conditional dynamic emerged in the second model (Recycling Rate). The direct effect of e-commerce on recycling was positive (+2.95, $p < 0.01$), highlighting the capacity of e-commerce reverse logistics to facilitate the collection of recyclable materials. Yet, the interaction coefficient ($ECOM \times EPS$) was highly negative (-2.88, $p < 0.01$). Consequently, the positive marginal impact of e-commerce on recycling rates is sustained only at lower EPS levels (below 2.79). At higher regulatory stringency levels, this effect diminishes and turns marginally negative. Furthermore, the analysis highlighted the profound independent impact of institutional frameworks. The EPS index exhibited the largest direct effects across both models, drastically reducing waste generation (coefficient: -12.38) and substantially boosting recycling rates (coefficient: +7.38). This provides robust empirical validation for the Porter Hypothesis, demonstrating that rigorous environmental policies actively stimulate systemic efficiency and circularity rather than merely acting as economic constraints. Additional findings indicated that higher energy consumption correlates with increased waste and decreased recycling, while GDP per capita growth reflects absolute decoupling from waste generation, aligning with the Environmental Kuznets Curve. Interestingly, higher income levels negatively impacted recycling rates, a phenomenon theorized by Becker's allocation of time model, where the rising opportunity cost of time in affluent societies deters household participation in time-consuming waste sorting.

Conclusion

The findings unequivocally demonstrate that the environmental impact of e-commerce is not absolute, but deeply conditional upon the prevailing institutional and regulatory landscape. While digital commerce acts as a potent catalyst for waste reduction and recycling in environments with nascent environmental policies, its comparative ecological benefits are largely neutralized under highly stringent regulatory regimes, where the rebound effects of packaging and fragmented delivery overshadow operational efficiencies. Therefore, policymakers must not view the transition to a digital economy as an automatic substitute for robust environmental governance. To harness the synergies between the twin transitions of digitalization and sustainability, several strategic interventions are recommended. For advanced economies like the EU, transitioning from prescriptive regulations to smart, incentive-based frameworks is crucial. Policymakers should provide tax incentives for platforms adopting fully circular packaging and enforce Extended Producer Responsibility (EPR) mandates rigorously. The implementation of the Digital Product Passport (ESPR) is essential to eliminate the "free-rider" problem currently exploited by cross-border e-commerce sellers, ensuring full accountability across the global value chain. Moreover, urban planning should leverage population density by integrating municipal waste management systems with e-commerce delivery networks, transforming reverse logistics into a cost-effective, high-yield channel for recovering secondary raw materials. In developing regulatory environments, such as Iran, authorities should preemptively capitalize on the structural efficiencies of growing digital platforms to bypass traditional linear models, while concurrently institutionalizing EPR frameworks for dominant tech companies before a "throwaway society" culture becomes deeply entrenched.



بررسی تأثیر پذیرش تجارت الکترونیک بر کاهش زباله و بازیافت در کسب و کارها: شواهدی از کشورهای منتخب اتحادیه اروپا

محدثه عظیمی پناه راین^۱، دکتر علیرضا حسن زاده جزدانی^{۲*}، دکتر مهدی نجاتی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲* - استادیار، بخش اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- دانشیار، بخش اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: a.hassanzadeh@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴ کلید واژه ها: پذیرش تجارت الکترونیک، کاهش زباله، بازیافت، سیاست های زیست محیطی.	گسترش اقتصاد دیجیتال و تجارت الکترونیک با ایجاد تحول در شیوه های تولید، توزیع و مصرف، فرصت های جدیدی برای رشد اقتصادی فراهم کرده است. با این حال، تجارت الکترونیک می تواند چالش های زیست محیطی جدیدی را تشدید نماید. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر پذیرش تجارت الکترونیک بر تولید زباله و نرخ بازیافت در ۱۲ کشور عضو اتحادیه اروپا طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ انجام شده است. برای برآورد مدل های پژوهش، روش حداقل مربعات تعمیم یافته (EGLS) همراه با خطاهای استاندارد مقاوم خوشه ای به کار گرفته شده است. یافته ها نشان می دهد رابطه میان پذیرش تجارت الکترونیک و سرانه تولید زباله، رابطه ای شرطی و وابسته به شدت سیاست های زیست محیطی (EPS) است: ضریب مستقیم تجارت الکترونیک برابر ۴.۹۶- ضریب جمله تعاملی آن با EPS برابر ۴.۷۰ برآورد شده است (هر دو در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار). تنها در کشور-سال هایی با سیاست های زیست محیطی ضعیف تر (EPS کمتر از حدود ۲.۸۷)، افزایش پذیرش تجارت الکترونیک سرانه تولید زباله را به طور معناداری کاهش می دهد؛ در حالی که در سطوح بالاتر سخت گیری قانونی (شامل میانگین نمونه $EPS \approx 2.99$) اثر خالص تجارت الکترونیک مثبت می شود. به طور مشابه، پذیرش تجارت الکترونیک با نرخ بازیافت دارای رابطه ای متقابل و وابسته به EPS است: ضریب مستقیم برابر ۲.۹۵ و ضریب جمله تعاملی برابر ۲.۸۸-؛ این اثر افزایشی تنها در سطوح پایین سخت گیری قانونی برقرار است و در سطوح بالاتر (شامل میانگین نمونه) به اثری اندک و منفی تبدیل می شود. سیاست های زیست محیطی نقش تعدیل کننده معناداری در این روابط ایفا می کند. بر این اساس، تجارت الکترونیک را نباید جایگزینی برای سیاست گذاری زیست محیطی قلمداد کرد؛ بلکه تلفیق آن با ابزارهای تنظیم گری هوشمند (نظیر مشوق های مالیاتی برای بسته بندی های چرخشی، الزام پلتفرم های واسطه به رعایت مسئولیت گسترده تولیدکننده در تجارت فرامرزی از طریق پاسپورت دیجیتال محصول (ESPR)، و توسعه زیرساخت های لجستیک معکوس در مناطق پرتراکم شهری) مسیر مطمئن تری برای دستیابی به اهداف اقتصاد چرخشی فراهم می سازد.

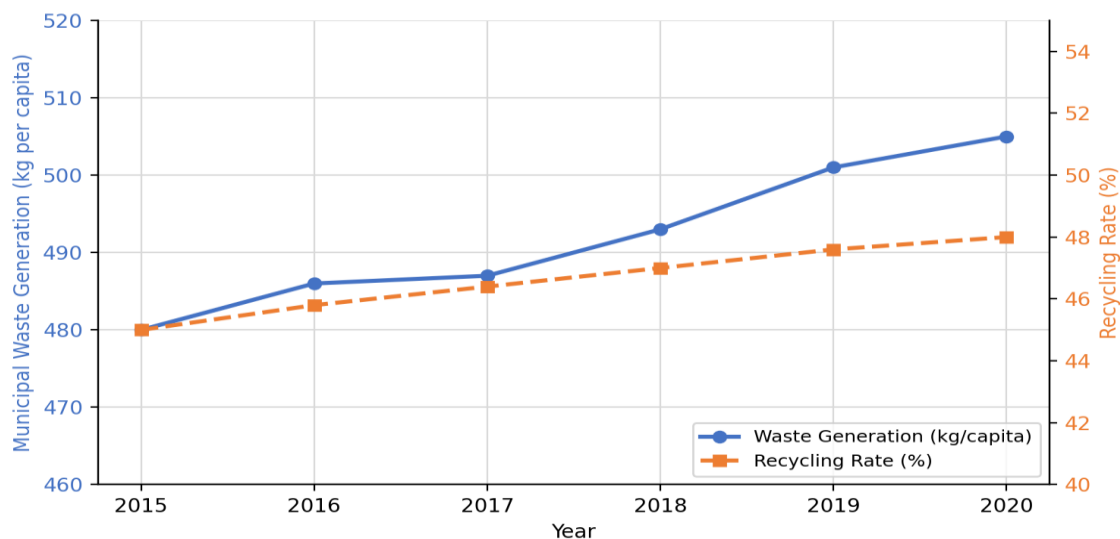
۱- مقدمه

تحولات فناورانه و گسترش فناوری‌های دیجیتال در دهه‌های اخیر، ساختار اقتصاد جهانی را به‌طور بنیادین دگرگون کرده است. توسعه فناوری‌های مبتنی بر اینترنت، پلتفرم‌های آنلاین و ابزارهای نوین اطلاعاتی، فرآیندهای تولید، توزیع و مصرف کالا و خدمات را به شکل چشمگیری تحت تأثیر قرار داده است. در چنین فضایی، اقتصاد دیجیتال به یکی از محورهای اصلی تحول اقتصادی تبدیل شده است. تجارت الکترونیک به عنوان یکی از اصلی‌ترین جلوه‌های اقتصاد دیجیتال، با کاهش واسطه‌ها، تسهیل ارتباط مستقیم تولیدکننده و مصرف‌کننده، و امکان خرید و فروش سریع، مسیر جدیدی برای رشد اقتصادی ایجاد کرده است. همزمان با رشد تجارت الکترونیک، پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های اقتصادی نیز افزایش یافته است. این پارادوکس بیانگر ماهیت دوگانه میان تجارت الکترونیک و محیط‌زیست است و ضرورت انجام تحلیل‌های دقیق و داده‌محور را برجسته می‌سازد.

۲- مبانی نظری و مرور پیشینه پژوهش

۲-۱- بیان مسئله

در سال‌های اخیر، گسترش سریع تجارت الکترونیک موجب تغییر در شیوه‌های الگوهای مصرف، مدل‌های کسب‌وکار و ساختار زنجیره‌های تأمین شده است (Turban et al, 2018). همزمان، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با مصرف منابع و تولید پسماند، ضرورت حرکت کسب‌وکارها به سوی الگوهای پایدار و مبتنی بر اقتصاد چرخشی را افزایش داده است (Geissdoerfer et al, 2017). اتحادیه اروپا با ارائه سیاست‌هایی مانند بسته اقتصاد چرخشی و پیمان سبز اروپا، تعهد خود را به گذار به سمت اقتصاد پایدارتر، نشان داده است (European Commission, 2020). پذیرش تجارت الکترونیک از یک سو، از طریق کاهش نیاز به فضای فیزیکی فروشگاهی، دیجیتالی کردن فرآیندها، بهینه‌سازی لجستیک و مدیریت موجودی می‌تواند به کاهش تولید زباله کمک کند؛ از سوی دیگر، افزایش بسته‌بندی‌های فردی، حمل‌ونقل و نرخ بازگشت کالا می‌تواند تولید زباله را افزایش دهند (Edwards et al, 2010). به‌منظور نمایش دقیق‌تر زمینه‌ای که پژوهش حاضر در آن انجام می‌شود، روند تحولات دو متغیر اصلی پژوهش، یعنی سرانه تولید زباله شهری و نرخ بازیافت، در سطح اتحادیه اروپا طی بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ در شکل ۱ ترسیم شده است.



شکل ۱: روند سرانه تولید زباله شهری (کیلوگرم) و نرخ بازیافت (درصد) در اتحادیه اروپا، ۲۰۱۵-۲۰۲۰ (منبع: محاسبات نگارندگان بر اساس (EEA, ۲۰۲۲; Eurostat, ۲۰۲۲))

همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد، علی‌رغم رشد نسبتاً پیوسته نرخ بازیافت اتحادیه اروپا از حدود ۴۵ درصد در سال ۲۰۱۵ به حدود ۴۸ درصد در سال ۲۰۲۰، سرانه تولید زباله شهری نیز در همین بازه با روندی صعودی از حدود ۴۸۰ به بیش از ۵۰۵ کیلوگرم افزایش یافته و رشد بازیافت نتوانسته با رشد موازی تولید زباله همگام شود. این واگرایی، چالش اصلی سیاست‌گذاری زیست‌محیطی اتحادیه اروپا را آشکار می‌سازد: بر پایه گزارش آژانس محیط‌زیست اروپا، حجم زباله باقی‌مانده (residual municipal waste) طی سال‌های اخیر تقریباً در سطح ۱۱۳ میلیون تن تثبیت شده و برای دستیابی به هدف نصف کردن این حجم تا سال ۲۰۳۰، حتی با تحقق کامل هدف الزام‌آور بازیافت ۶۰ درصدی، احتمالاً حدود ۲۳ میلیون تن با هدف فاصله خواهد ماند (EEA, ۲۰۲۲). گسترش تجارت الکترونیک از طریق افزایش حجم بسته‌بندی‌های تک‌سفره‌ای و تکه‌تکه‌شدن زنجیره تحویل کالا، یکی از عوامل مهم تشدیدکننده این چالش شناخته می‌شود (UNCTAD, ۲۰۲۴) و بدون هماهنگی سیاست‌های زیست‌محیطی با رشد سریع تجارت آنلاین، دستیابی به اهداف اقتصاد چرخشی

اتحادیه اروپا با ابهام جدی مواجه خواهد بود. این شکاف میان روند صعودی تولید زباله و رشد کند بازیافت، ضرورت بررسی نقش تعدیل کننده تجارت الکترونیک و سیاست‌های زیست‌محیطی، که موضوع اصلی پژوهش حاضر است، دوچندان می‌سازد.

۲-۲- مبانی نظری پژوهش

تبیین نظری رابطه میان تجارت الکترونیک، تولید زباله و بازیافت مستلزم تلفیق چند چارچوب نظری مکمل از حوزه‌های اقتصاد محیط‌زیست، اقتصاد چرخشی و جامعه‌شناسی سازمانی است. در ادامه، مهم‌ترین نظریه‌هایی که مبنای تدوین فرضیات پژوهش و تصریح مدل‌های اقتصادسنجی قرار گرفته‌اند، به ترتیب معرفی می‌شوند.

نظریه اقتصاد چرخشی و مادیت‌زدایی: نظریه اقتصاد چرخشی (Ellen MacArthur Foundation, ۲۰۱۳) بر جایگزینی الگوی خطی «استخراج-تولید-مصرف-دفع» با الگویی حلقه‌بسته تأکید دارد که در آن ارزش مواد تا حد امکان در چرخه اقتصادی حفظ می‌شود. مفهوم مکمل مادیت‌زدایی (dematerialization) نیز بیان می‌کند که جایگزینی فرآیندهای فیزیکی با فرآیندهای دیجیتال، نظیر صورتحساب الکترونیکی، کاتالوگ آنلاین و بهینه‌سازی موجودی مبتنی بر داده، می‌تواند شدت مصرف مواد به‌ازای هر واحد فعالیت اقتصادی را کاهش دهد. این چارچوب، مبنای نظری اصلی برای اثر مستقیم کاهنده تجارت الکترونیک بر تولید زباله در فرضیه اول پژوهش (H^1) است.

فرضیه پورتر: فرضیه پورتر (Porter & van der Linde, ۱۹۹۵) چارچوبی نظری برای تبیین نقش تعدیل‌گر سیاست‌های زیست‌محیطی در پژوهش حاضر فراهم می‌کند. بر خلاف دیدگاه سنتی که مقررات زیست‌محیطی سخت‌گیرانه را صرفاً هزینه‌ای بر بنگاه‌ها تلقی می‌کند، فرضیه پورتر استدلال می‌کند مقررات به‌خوبی طراحی شده می‌توانند بنگاه‌ها را به نوآوری و بهبود کارایی منابع وادار کرده و در بلندمدت به مزیت رقابتی منجر شوند. این چارچوب مبنای نظری تصریح متغیر شاخص سخت‌گیری سیاست‌های زیست‌محیطی (EPS) و انتظار اثر مستقیم کاهنده آن بر تولید زباله و افزایش آن بر نرخ بازیافت در هر دو مدل پژوهش است.

نظریه هم‌ریختی نهادی: نظریه هم‌ریختی نهادی اجباری (DiMaggio & Powell, ۱۹۸۳) تبیین می‌کند که چرا اثر تجارت الکترونیک بر شاخص‌های زیست‌محیطی می‌تواند در سطوح مختلف سخت‌گیری قانونی، جهتی متفاوت به خود بگیرد. بر اساس این نظریه، سازمان‌ها تحت فشارهای نهادی، به‌ویژه فشارهای قانونی و مقرراتی، در طول زمان به سمت همگونی رفتاری سوق می‌یابند. در محیط‌های با سیاست‌گذاری زیست‌محیطی ضعیف، بنگاه‌های پیشرو در تجارت الکترونیک می‌توانند مزیت نسبی کارایی خود را حفظ کنند؛ اما در محیط‌های با سیاست‌گذاری سخت‌گیرانه، الزامات قانونی یکسان بر همه بازیگران بازار اعمال می‌شود و مزیت نسبی فناوری‌محور تجارت الکترونیک در داده‌های تجمیعی کشوری کم‌رنگ‌تر می‌شود. این استدلال، مبنای نظری تصریح جمله تعاملی $\ln(EPS) \times \ln(ECOM)$ در هر دو مدل پژوهش و همچنین فرضیه سوم (H^3) است.

فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس: فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (Grossman & Krueger, ۱۹۹۵)؛ (Baalbaki & Marrouch, ۲۰۲۰) رابطه‌ای غیرخطی به شکل حرف U وارونه میان سطح درآمد و شدت آلودگی، از جمله تولید زباله، پیش‌بینی می‌کند: در مراحل نخستین رشد اقتصادی، افزایش تولید و مصرف به افزایش زباله می‌انجامد، اما در مراحل پیشرفته‌تر توسعه که اقتصاد به سمت بخش خدمات و فناوری‌های پاک‌تر حرکت می‌کند، افزایش درآمد سرانه می‌تواند با کاهش تولید زباله همراه شود. با توجه به آنکه کشورهای منتخب این پژوهش عمدتاً اقتصادهایی پیشرفته در مراحل پسین این منحنی هستند، این نظریه چارچوب تفسیری ضریب منفی متغیر تولید ناخالص داخلی سرانه در مدل تولید زباله را فراهم می‌سازد.

پارادوکس جونز و اثر بازگشتی: پارادوکس جونز (Jevons, ۱۸۶۵) و بسط معاصر آن در قالب نظریه اثر بازگشتی (Hertwich, ۲۰۰۵) بیان می‌کند بهبود کارایی در استفاده از یک منبع، به‌جای کاهش قطعی مصرف آن، می‌تواند از طریق کاهش قیمت مؤثر و تحریک تقاضای پنهان، به افزایش مصرف کل منجر شود. در بستر تجارت الکترونیک، کارایی بالای پلتفرم‌های آنلاین در کاهش زمان و هزینه مبادله می‌تواند به شکل‌گیری الگوی خرید خرد و مکرر بینجامد که خود حجم بسته‌بندی‌های محافظتی تک‌سفرارشی را افزایش می‌دهد. این چارچوب نظری مبنای اصلی تبیین اثر تعاملی مثبت و معنادار میان تجارت الکترونیک و سیاست‌های زیست‌محیطی در مدل تولید زباله (و اثر تعاملی منفی در مدل بازیافت) است و پیش‌بینی می‌کند در سطوح بالای EPS، اثر خالص تجارت الکترونیک می‌تواند از کاهنده به خنثی یا افزایش دهنده تغییر جهت دهد.

نظریه تخصیص زمان بکر: نظریه تخصیص زمان بکر (Becker, ۱۹۶۵) خانوار را نه فقط مصرف کننده کالا، بلکه واحدی تولیدکننده در نظر می گیرد که با ترکیب زمان و کالاهای بازاری، کالاهای نهایی، از جمله «محیط زیست سالم» از طریق تفکیک زباله، تولید می کند. بر اساس این چارچوب، با افزایش درآمد و در نتیجه بالارفتن هزینه فرصت زمان، خانوارها تمایل کمتری به صرف زمان برای فعالیتهای زمان بری نظیر تفکیک زباله از مبدأ نشان می دهند؛ حتی اگر از نظر مالی توان مشارکت در برنامه های بازیافت را داشته باشند. این نظریه مبنای تفسیر ضریب منفی تولید ناخالص داخلی سرانه در مدل نرخ بازیافت پژوهش است.

نظریه شکست بازار و مسئولیت گسترده تولیدکننده: چارچوب نظری مسئولیت گسترده تولیدکننده (OECD, ۲۰۰۱؛ Hilton et al, ۲۰۱۹) بر درونی سازی هزینه های پایان عمر محصول توسط تولیدکنندگان و توزیع کنندگان تأکید دارد. با این حال، در بستر تجارت فرامرزی الکترونیک، عدم تقارن در دامنه اعمال مقررات EPR میان فروشندگان داخلی ثبت شده و فروشندگان خرد بین المللی، زمینه ساز نوعی شکست بازار موسوم به «مسئله سواری مجانی» می شود؛ فروشندگانی که بدون ثبت نام در نظام های ملی EPR به بازار داخلی دسترسی می یابند، بدون آنکه در هزینه های بازیافت مشارکت کنند. این چارچوب، زمینه تحلیلی لازم برای تبیین اثر خالص منفی تجارت الکترونیک بر نرخ بازیافت در سطوح بالای سخت گیری قانونی و پیشنهاد سیاستی مرتبط با پاسپورت دیجیتال محصول (ESPR) را فراهم می آورد.

۲-۳- مرور پیشینه تجربی پژوهش

با وجود این موارد متضاد، تحقیقات تجربی و کمی که به طور مشخص به بررسی تأثیر خالص پذیرش تجارت الکترونیک توسط کسب و کارها بر شاخص های داخلی مدیریت پسماند پرداخته باشند، محدود است. (Popovic et al, 2025) با رویکرد VAR پانلی، گسترش تجارت الکترونیک و تولید زباله در اتحادیه اروپا را بررسی کردند و نشان دادند گسترش تجارت الکترونیک ارتباط مثبت و معناداری با افزایش زباله های بسته بندی دارد. (UNCTAD, 2024) نیز با بررسی روندهای جهانی تجارت الکترونیک، نشان داد که رشد تجارت الکترونیک با افزایش زباله های پلاستیکی بسته بندی همراه بوده است. همچنین (Zhang et al, 2023) با تمرکز بر لجستیک معکوس و کالاهای مرجوعی، نشان دادند که فرآیند بازگشت کالا در تجارت الکترونیک نیز می تواند پیامدهای زیست محیطی منفی ایجاد کند. (Baalbaki & Marrouch, 2020) با آزمون فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس (EKC) برای پسماند جامد شهری، رابطه میان درآمد سرانه و تولید زباله را بررسی کردند. همچنین (Konat et al, 2024) نیز با مطالعه کشورهای منتخب اتحادیه اروپا، نشان دادند عوامل جمعیتی و تراکم شهری می توانند نقش مهمی در افزایش تولید پسماند داشته باشند. در مقابل، گروه دیگری از پژوهش ها بر ظرفیت فناوری های دیجیتال برای کاهش ضایعات و بهبود مدیریت پسماند تمرکز دارند؛ (Mersico et al, 2024) در مطالعه ای نقش پلتفرم های دیجیتال در مدیریت پسماند شهری را مطالعه نمودند. همچنین (Hilton et al, 2019) و گزارش های تکمیلی (OECD, 2024) نیز نقش سیاست های مسئولیت گسترده تولیدکننده (EPR) را در بهبود عملکرد بازیافت بازارهای آنلاین بررسی کردند. (Tao & Zhan, 2025) نیز رابطه تجارت فرامرزی الکترونیک با اختراعات فناوری سبز را ارزیابی کردند.

۲-۴- فرضیات پژوهش

با تلفیق مبانی نظری فوق با شواهد تجربی مرور شده، فرضیات پژوهش به شرح زیر تدوین شده اند:

- H^۱: پذیرش تجارت الکترونیک اثر معنادار و مشروطی بر سرانه تولید زباله در کسب و کارهای اتحادیه اروپا دارد؛ به گونه ای که این اثر تنها در سطوح پایین تر سخت گیری سیاست های زیست محیطی، جهت کاهنده دارد.
- H^۲: پذیرش تجارت الکترونیک اثر معنادار و مشروطی بر نرخ بازیافت در کسب و کارهای اتحادیه اروپا دارد؛ به گونه ای که این اثر تنها در سطوح پایین تر سخت گیری سیاست های زیست محیطی، جهت افزایش دهنده دارد.
- H^۳: سیاست های زیست محیطی نقش تعدیل کننده معناداری در رابطه میان تجارت الکترونیک و متغیرهای عملکرد زیست محیطی (تولید زباله و نرخ بازیافت) ایفا می کنند.

۳- روش شناسی پژوهش

۳-۱- جامعه آماری و دوره زمانی

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بهره گیری از داده های تابلویی انجام شده است. جامعه آماری شامل ۱۲ کشور منتخب عضو اتحادیه اروپا طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ است. داده ها از منابع رسمی نظیر Eurostat، بانک جهانی، OECD و کمیسیون اروپا گردآوری شده اند.

۳-۲- مدل‌های اقتصادسنجی

پس از تبدیل متغیرها به لگاریتم طبیعی برای خطی‌سازی روابط، دو مدل اقتصادسنجی جداگانه تصریح شده است:

مدل اول (تولید زباله):

$$\ln(WG)_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(ECOM)_{it} + \beta_2 \ln(NRG)_{it} + \beta_3 \ln(GDP)_{it} + \beta_4 \ln(EPS)_{it} + \beta_5 [\ln(ECOM) \times \ln(EPS)]_{it} + \beta_6 \ln(POP DENS)_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it} \quad (۱)$$

مدل دوم (نرخ بازیافت):

$$\ln(RR)_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln(ECOM)_{it} + \gamma_2 \ln(NRG)_{it} + \gamma_3 \ln(GDP)_{it} + \gamma_4 \ln(EPS)_{it} + \gamma_5 \ln[\ln(ECOM) \times \ln(EPS)]_{it} + \gamma_6 \ln(POP DENS)_{it} + \mu_i + v_{it} \quad (۲)$$

که در آن WG سرانه تولید زباله (تن)، RR نرخ بازیافت (%)، ECOM درصد پذیرش تجارت الکترونیک در کسب‌وکارها، NRG مصرف انرژی نهایی، GDP تولید ناخالص داخلی سرانه، EPS شاخص سخت‌گیری سیاست‌های زیست‌محیطی OECD و POPDENS تراکم جمعیت است.

۳-۳- آزمون‌های تشخیصی و روش برآورد

آزمون‌های تشخیصی چاو، بروش-پاگان و هاسمن جهت انتخاب ساختار مناسب مدل پانلی به کار گرفته شدند. در گام بعد، با توجه به تأیید وجود ناهمسانی واریانس و خودهمبستگی سریالی، روش حداقل مربعات تعمیم‌یافته (EGLS) همراه با خطاهای استاندارد مقاوم خوشه‌ای برای غلبه بر نقض فروض کلاسیک به کار گرفته شد. در مورد داده‌های دوسالانه مدیریت پسماند (که برای سال‌های زوج ۲۰۱۴، ۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ گزارش می‌شود)، پس از بررسی مقایسه‌ای روش‌های مختلف، درونیابی خطی به دلیل تناسب نظری، حفظ روند، شفافیت و اصل صرفه‌جویی به عنوان مناسب‌ترین روش برای این سری‌های زمانی کوتاه انتخاب شد.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- آمار توصیفی

جدول ۱: آمار توصیفی داده‌های پژوهش

متغیر	میانگین	میانه	ماکزیمم	مینیمم	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
WG (تن)	۱۷۴.۴۴	۱۸۵.۸۵	۴۸۱.۶۵	۸۷.۶۰	۸۲.۸۱	۲.۲۶	۸.۰۹
RR (%)	۴۳.۸۶	۴۱.۵۵	۶۸.۱۲	۱۹.۲۰	۱۲.۹۴	۰.۰۳	۲.۰۷
ECOM (%)	۲۰.۶۸	۲۰.۳۶	۳۰.۶۲	۹.۹۵	۵.۴۵	-۰.۰۰۴	۱.۹۳
NRG (تراژول)	۲,۴۴۷,۹۶۱	۱,۳۹۳,۷۸۲	۹,۵۷۴,۰۶۹	۱۹۲,۷۳۰	۲,۴۹۶,۱۳۴	۱.۶۹	۵.۲۰
GDP (€)	۲۶,۸۲۶	۲۳,۲۴۵	۴۷,۸۴۰	۱۱,۲۷۰	۱۱,۵۶۴	۰.۳۶	۱.۶۲
EPS	۲.۹۹	۲.۹۴	۴.۰۶	۲.۱۷	۰.۴۳	۰.۴۵	۳.۰۲
ECOM×EPS	۶۱.۶۰	۵۷.۲۵	۹۸.۴۴	۳۴.۰۰	۱۸.۳۹	۰.۳۷	۱.۹۰
POPDENS (نفر/کم ^۲)	۱۸۵.۱۵	۱۱۸.۰۴	۵۱۸.۰۱	۹۲.۹۱	۱۲۶.۳۱	۱.۶۱	۴.۳۱
منبع: محاسبات پژوهش							

بر اساس نتایج جدول ۱، میانگین تولید زباله ۱۷۴.۴۴ تن، نرخ بازیافت ۴۳.۸۶ درصد، پذیرش تجارت الکترونیک ۲۰.۶۸ درصد، شاخص EPS ۲.۹۹ (در مقیاس صفر تا شش) و تولید ناخالص داخلی سرانه ۲۶,۸۲۶ یورو است.

۲-۴- نتایج آزمون‌های تشخیصی

جدول ۲: نتایج آزمون‌های تشخیصی

آزمون	مدل	آماره	احتمال	نتیجه
چاو	تولید زیاله	۱۲۴.۰۱	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات ثابت)
چاو	نرخ بازیافت	۴۸.۳۴	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات ثابت)
بروش-پاگان	تولید زیاله	۱۳۷.۴۵	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات تصادفی)
بروش-پاگان	نرخ بازیافت	۱۳۱.۸۲	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات تصادفی)
هاسمن	تولید زیاله	۱.۶۶	۰.۸۹۴۰	عدم رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات تصادفی)
هاسمن	نرخ بازیافت	۰.۴۱	۰.۹۹۵۲	عدم رد فرض صفر (انتخاب مدل اثرات تصادفی)
ناهمسانی واریانس	تولید زیاله	۶۳.۰۴	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (وجود ناهمسانی واریانس)
ناهمسانی واریانس	نرخ بازیافت	۵۰.۸۸	۰.۰۰۰۲	رد فرض صفر (وجود ناهمسانی واریانس)
خودهمبستگی سریالی	تولید زیاله	۵۲.۷۳۳	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (وجود خودهمبستگی سریالی)
خودهمبستگی سریالی	نرخ بازیافت	۴۶.۶۲۴	۰.۰۰۰۰	رد فرض صفر (وجود خودهمبستگی سریالی)

نتایج آزمون چاو وجود ناهمگنی ساختاری معنادار میان کشورها را تأیید می‌کند. آزمون بروش-پاگان نیز وجود اثرات تصادفی معنادار بین کشورها را تأیید می‌نماید. آزمون هاسمن با احتمال بالا (۰.۸۹۴۰ برای مدل اول و ۰.۹۹۵۲ برای مدل دوم) مدل اثرات تصادفی را به عنوان چارچوب نهایی برآورد تأیید می‌کند. همچنین وجود ناهمسانی واریانس و خودهمبستگی سریالی تأیید شد و روش ECLS با خطاهای استاندارد مقاوم خوشه‌ای برای برآورد انتخاب گردید.

۳-۴- نتایج برآورد مدل اول: عوامل مؤثر بر تولید زیاله

معادله برآورد شده:

$$\ln(WG) = 22.12 - 4.96\ln(ECOM) + 0.87\ln(NRG) - 0.51\ln(GDP) - 12.38\ln(EPS) + 4.70[\ln(ECOM) \times \ln(EPS)] - 0.03\ln(POPDENS) \quad (۳)$$

جدول ۳: نتایج برآورد مدل اول پژوهش (تولید زیاله)

متغیر	نام متغیر	ضریب	آماره t	نتیجه
$\ln(ECOM)$	تجارت الکترونیک	-۴.۹۶***	-۶.۷۵	معنادار
$\ln(NRG)$	مصرف انرژی	۰.۸۷***	۸.۲۴	معنادار
$\ln(GDP)$	تولید ناخالص داخلی	-۰.۵۱***	-۶.۰۳	معنادار
$\ln(EPS)$	سیاست‌های زیست‌محیطی	-۱۲.۳۸***	-۷.۱۱	معنادار
$\ln(ECOM) \times \ln(EPS)$	اثر تعاملی	۴.۷۰***	۸.۴۰	معنادار
$\ln(POPDENS)$	تراکم جمعیت	-۰.۰۳	-۰.۴۷	بی‌معنا
C	عرض از مبدأ	۲۲.۱۲***	۱۴.۶۸	معنادار

یادداشت: ***, ** و * به ترتیب نشان‌دهنده معناداری آماری در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ درصد (به ترتیب سطوح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد) هستند.

تجارت الکترونیک (مدل اول):

ضریب مستقیم تجارت الکترونیک (-۴.۹۶) در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است و نشان می‌دهد در غیاب اثر تعاملی، افزایش یک درصدی پذیرش تجارت الکترونیک منجر به کاهش ۴.۹۶ درصدی سرانه تولید زیاله می‌شود. این کاهش از طریق مادیت‌زدایی (دیجیتالی‌شدن اسناد)، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و حذف واسطه‌های فیزیکی قابل تبیین است.

سیاست‌های زیست‌محیطی (مدل اول):

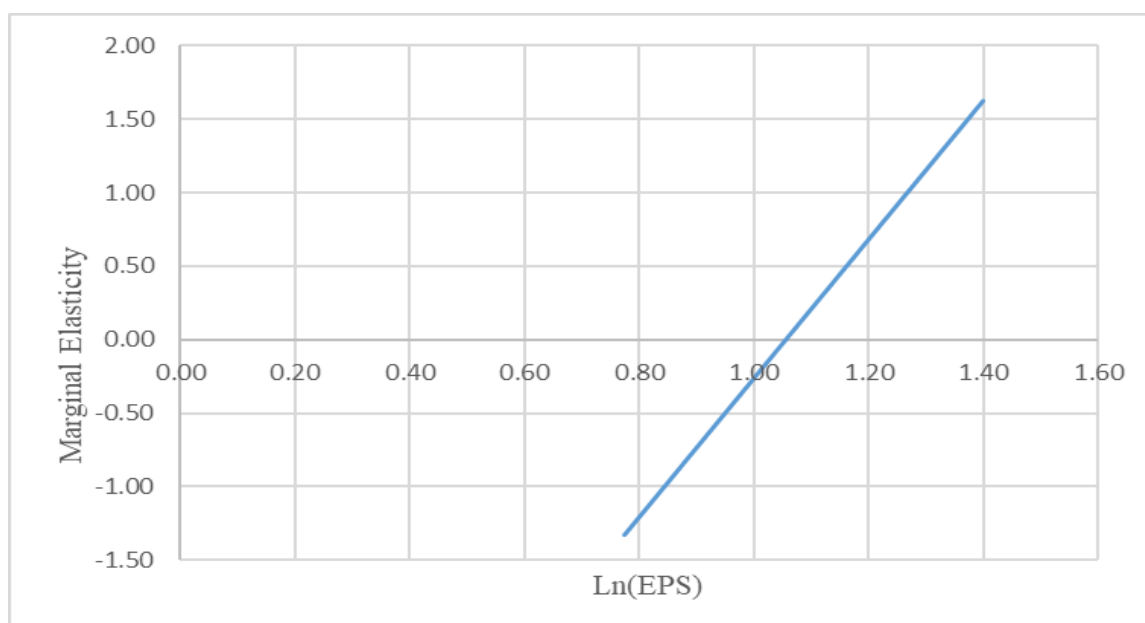
متغیر $\ln(EPS)$ با ضریب -12.38 تأثیر کاهنده بسیار قوی بر تولید زباله دارد و شواهد تجربی مهمی در تأیید فرضیه پورتر (Porter & van der Linde, 1995) ارائه می‌دهد. این ضریب بزرگ، بیانگر آن است که سیاست‌های سخت‌گیرانه از طریق الزام بنگاه‌ها به اصلاح فرآیندها، به کاهش نظام‌مند پسماند منجر می‌شوند.

اثر تعاملی و کشش نهایی (مدل اول):

ضریب جمله تعاملی $(+4.70)$ بیانگر رابطه جانشینی میان مکانیسم‌های بازار (تجارت الکترونیک) و مکانیسم‌های دستوری (قوانین) است. کشش نهایی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \ln(WG)}{\partial \ln(ECOM)} = -4.96 + 4.70 \times \ln(EPS) \quad (4)$$

نقطه تغییر علامت این اثر برابر با $EPS \approx 2.87$ است؛ از آنجا که میانگین (2.99) و میانه (2.94) نمونه از این آستانه بالاترند، در اکثر مشاهدات، تأثیر خالص تجارت الکترونیک به سمت مثبت تغییر می‌کند.



شکل ۲: اثر نهایی تجارت الکترونیک بر تولید زباله در سطوح مختلف EPS

مصرف انرژی (مدل اول):

ضریب مثبت $\ln(NRG)$ $(+0.87)$ نشان‌دهنده همبستگی مثبت و قوی میان شدت انرژی و شدت مواد بر اساس مدل موازنه مواد است. کشورهای با مصرف انرژی بالاتر، تولید زباله فیزیکی بیشتری دارند.

تولید ناخالص داخلی (مدل اول):

ضریب منفی $\ln(GDP)$ (-0.51) بیانگر پدیده جدایی رشد اقتصادی از تولید زباله است. این یافته با منحنی زیست‌محیطی کوزنتس سازگار بوده و نشان می‌دهد کشورهای منتخب در مرحله فراصنعتی با غلبه بخش خدمات قرار دارند.

۴-۴ نتایج برآورد مدل دوم: عوامل مؤثر بر نرخ بازیافت

معادله برآورد شده :

$$\ln(RR) = -0.74 + 2.95\ln(ECOM) - 0.09\ln(NRG) - 0.43\ln(GDP) + 7.38\ln(EPS) - 2.88[\ln(ECOM) \times \ln(EPS)] + 0.51\ln(POP\text{DENS}) \quad (5)$$

جدول ۴: نتایج برآورد مدل دوم پژوهش (نرخ بازیافت)

متغیر	نام متغیر	ضریب	آماره t	نتیجه
Ln(ECOM)	تجارت الکترونیک	۲.۹۵***	۴.۳۸	معنادار
Ln(NRG)	مصرف انرژی	-۰.۰۹***	-۷.۱۵	معنادار
Ln(GDP)	تولید ناخالص داخلی	-۰.۴۳***	-۹.۰۹	معنادار
Ln(EPS)	سیاست‌های زیست‌محیطی	۷.۳۸***	۴.۵۳	معنادار
Ln(ECOM)×Ln(EPS)	اثر تعاملی	-۲.۸۸***	-۵.۱۲	معنادار
Ln(POP DENS)	تراکم جمعیت	۰.۵۱***	۱۱.۵۴	معنادار
C	عرض از مبدأ	-۰.۷۴	-۰.۴۴	بی‌معنا

یادداشت: ***, ** و * به ترتیب نشان‌دهنده معناداری آماری در سطوح ۱، ۵ و ۱۰ درصد (به ترتیب سطوح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد) هستند.

تجارت الکترونیک (مدل دوم):

جهت تعیین نحوه پراکنش غلظت آلاینده ضریب مستقیم Ln(ECOM) برابر ۲.۹۵ در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است. این نتیجه تجربی نشان می‌دهد تجارت الکترونیک از طریق زیرساخت‌های لجستیک معکوس، استفاده از بسته‌بندی‌های همگن (کارتن مقوایی با بالاترین نرخ بازیافت) و به اشتراک‌گذاری ظرفیت خالی ناوگان توزیع، ظرفیت‌های جدیدی برای بازیافت ایجاد می‌کند.

سیاست‌های زیست‌محیطی (مدل دوم):

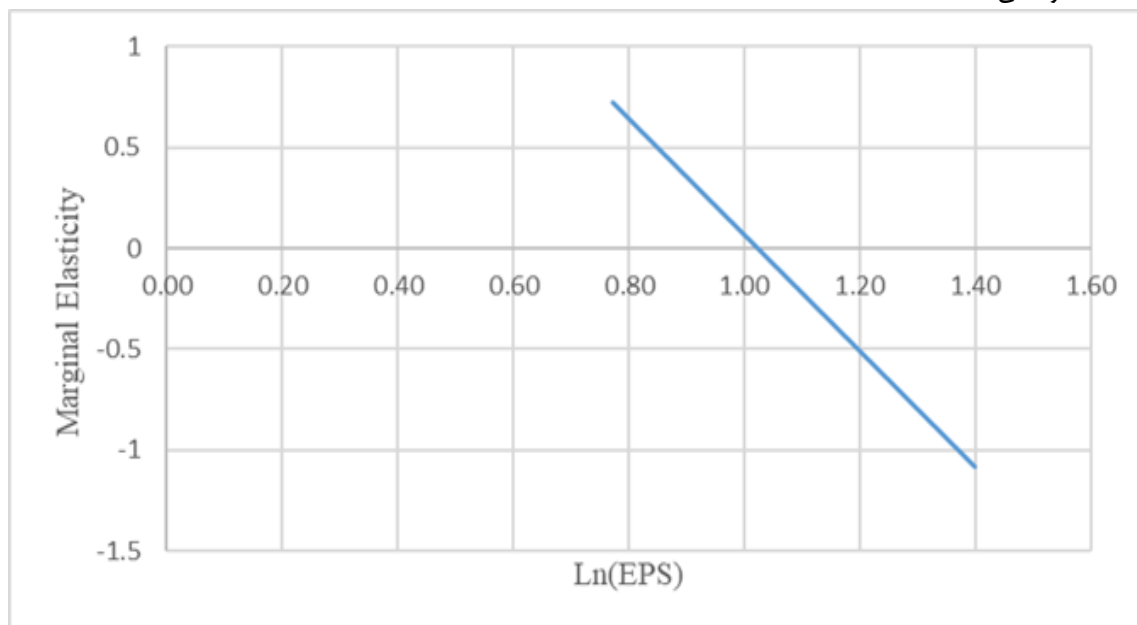
ضریب Ln(EPS) برابر ۷.۳۸ (مثبت و معنادار) بزرگ‌ترین اثر را در این مدل دارد و بازیافت را به عنوان یک فعالیت سیاست‌محور معرفی می‌کند. اجرای سیاست‌های مسئولیت گسترده تولیدکننده (EPR) در این یافته، نقش اساسی دارد.

اثر تعاملی و کشش نهایی (مدل دوم):

ضریب تعاملی (-۲.۸۸) بیانگر رابطه جانشینی است. کشش نهایی:

$$\frac{\partial \ln(RR)}{\partial \ln(ECOM)} = 2.95 - 2.88 \times \ln(EPS) \quad (۴)$$

نقطه تعادل ($EPS \approx ۲.۷۹$) پایین‌تر از میانه و میانگین نمونه است. در محدوده غالب مشاهدات، اثر خالص تجارت الکترونیک بر نرخ بازیافت اندک و منفی است.



شکل ۳: اثر نهایی تجارت الکترونیک بر نرخ بازیافت در سطوح مختلف EPS

تراکم جمعیت (مدل دوم):

ضریب ۰.۵۱ تراکم جمعیت در مدل دوم (معنادر ۹۹ درصد) وجود صرفه‌جویی‌های ناشی از تراکم در سیستم‌های جمع‌آوری پسماند را تأیید می‌کند. در مناطق متراکم شهری، هزینه نهایی جمع‌آوری کاهش یافته و ناوگان تجارت الکترونیک می‌تواند با بارگیری در مسیر بازگشت، پسماندهای قابل بازیافت را با هزینه نهایی اندک جمع‌آوری کند.

رشد اقتصادی (مدل دوم):

ضریب منفی $\ln(GDP)$ (-۰.۴۳) بیانگر آن است که با افزایش رفاه، هزینه فرصت زمان خانوارها برای تفکیک زباله بالا می‌رود (نظریه بکر؛ Becker, 1965) این یافته، منعکس کننده این موضوع است که رشد اقتصادی به‌تنهایی، تضمین کننده اقتصاد چرخشی نیست.

۴-۵- نتایج آزمون فرضیات

جدول ۵: نتایج آزمون فرضیات پژوهش

فرضیه	بیان فرضیه	نتیجه آزمون
H1	پذیرش تجارت الکترونیک تأثیر معنادار و کاهنده‌ای بر تولید زباله دارد.	$(EPS < 2.87)$ تأیید مشروط
H2	پذیرش تجارت الکترونیک تأثیر معنادار و افزایش‌دهی بر نرخ بازیافت دارد.	$(EPS < 2.79)$ تأیید مشروط
H3	سیاست‌های زیست‌محیطی رابطه میان تجارت الکترونیک و متغیرهای عملکردی را تعدیل می‌کند.	تأیید کامل
منبع: یافته‌های پژوهش		

۵- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات**۵-۱- تحلیل نتایج**

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد اثر تجارت الکترونیک بر عملکرد زیست‌محیطی کسب‌وکارها اثری شرطی و وابسته به سطح سیاست‌های زیست‌محیطی است. در محیط‌هایی با سخت‌گیری قانونی کمتر ($EPS < 2.87$)، تجارت الکترونیک، پیشران قدرتمندی برای کاهش زباله است. اما با عبور از این آستانه، فشار قانونی به‌قدری همه‌بنگاه‌ها را به حداکثرسازی کارایی منابع وادار می‌کند که مزیت ذاتی تجارت الکترونیک در داده‌های تجمعی کشوری، دیگر، قابل مشاهده نیست. این مکانیسم با نظریه هم‌ریختی اجباری (DiMaggio & Powell, 1983) همخوانی دارد. در حوزه بازیافت نیز، نتایج مشابهی مشاهده می‌شود. آستانه تغییر اثر تجارت الکترونیک بر نرخ بازیافت برابر با $EPS \approx 2.79$ است. در اکثر کشورهای منتخب اتحادیه اروپا که EPS آن‌ها از این آستانه بالاتر است، اثر بازگشتی افزایش حجم سفارش‌های خرد و بسته‌بندی‌های متناظر، سودمندی لجستیکی تجارت الکترونیک را خنثی یا معکوس می‌کند. این یافته با گزارش‌های (UNCTAD, 2024) و (Woola, 2025) در مورد رشد موازی زباله‌های بسته‌بندی همخوانی دارد. این الگوی بازگشتی را می‌توان با بسط نظری آن، یعنی پارادوکس جونز، تبیین کرد. پارادوکس جونز که ریشه در اقتصاد انرژی دارد، بیان می‌کند که هرگونه پیشرفت فناوری که کارایی استفاده از یک منبع را افزایش می‌دهد، در نهایت به‌جای کاهش مصرف آن منبع، به دلیل افت قیمت نسبی و تحریک تقاضای پنهان، باعث افزایش مصرف کل آن می‌شود. پلتفرم‌های تجارت الکترونیک با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، زنجیره‌های تأمین به‌شدت کارآمدی ایجاد کرده‌اند که زمان و هزینه مبادلات را برای مصرف‌کننده به حداقل رسانده است. این سهولت قابل توجه، باعث شکل‌گیری پدیده خریدهای خرد و مکرر شده است: مصرف‌کننده‌ای که در گذشته ماهی یک‌بار خریدهای خود را تجمیع می‌کرد، اکنون در طول هفته چندین سفارش کوچک و مجزا ثبت می‌کند. در نتیجه، منافع زیست‌محیطی حاصل از دیجیتالی‌شدن هر تراکنش، توسط حجم انبوه بسته‌بندی‌های محافظتی تک‌سفارشی خنثی یا حتی معکوس می‌شود؛ یافته‌ای که با گزارش‌های (UNCTAD, 2024) و (Woola, 2025) درباره رشد موازی زباله‌های بسته‌بندی و با چارچوب نظری اثر بازگشتی (Hertwich, 2005) همخوانی کامل دارد. فراتر از متغیر اصلی پژوهش، ضرایب معنادار متغیرهای کنترلی نیز تصویر منسجمی از عوامل مؤثر بر عملکرد زیست‌محیطی کسب‌وکارها به دست می‌دهند. ضریب مثبت مصرف انرژی در مدل تولید زباله با منطق موازنه جرم و انرژی سازگار است: اقتصادهایی با شدت انرژی بالاتر، جریان مواد فیزیکی بیشتری را در چرخه تولید و مصرف جابه‌جا می‌کنند و از همین رو پسماند بیشتری تولید می‌کنند؛ ضریب منفی همین متغیر در مدل نرخ بازیافت نیز احتمالاً بازتاب ترکیب صنعتی این اقتصادهاست، چرا که جریان‌های پسماند صنعتی و ترکیبی ناشی از فعالیت‌های انرژی‌بر، در مقایسه با جریان همگن‌تر پسماند خانگی و بسته‌بندی در اقتصادهای خدمت‌محور، دشوارتر بازیافت می‌شوند. جالب‌تر آنکه تولید ناخالص داخلی سرانه در دو مدل پژوهش، دو چهره متفاوت از رفاه اقتصادی را آشکار می‌سازد: ضریب منفی آن در مدل تولید زباله با فرضیه جدایی و منحنی زیست‌محیطی کوزنتس همخوان است و نشان

می‌دهد کشورهای ثروتمندتر نمونه، در مرحله فراصنعتی و خدمت‌محور، به‌ازای هر واحد تولید ناخالص داخلی، پسماند فیزیکی کمتری بر جای می‌گذارند؛ اما ضریب منفی همین متغیر در مدل نرخ بازیافت، روایت دیگری از سمت مصرف ارائه می‌دهد: بر اساس نظریه تخصیص زمان بکر (Becker, 1965)، افزایش درآمد سرانه هزینه فرصت زمان خانوار را بالا می‌برد و انگیزه مشارکت فعال در تفکیک زباله از مبدأ را می‌کاهد. به عبارت دیگر، رفاه اقتصادی می‌تواند بار تولید پسماند را در سطح بنگاه سبک کند، بدون آنکه به‌خودی‌خود مشارکت خانوارها در بازیافت را افزایش دهد؛ این نتیجه بر ضرورت زیرساخت‌ها و سیاست‌های فعال بازیافت، فارغ از سطح درآمد، تأکید می‌کند. در همین راستا، معناداری مثبت تراکم جمعیت در مدل نرخ بازیافت، تأییدی بر وجود صرفه‌جویی‌های ناشی از تراکم در سیستم‌های جمع‌آوری پسماند شهری است؛ چنین صرفه‌جویی‌هایی می‌توانند با شبکه‌های توزیع تجارت الکترونیک هم‌افزایی ایجاد کنند، مشروط بر آنکه چارچوب‌های نظارتی، ظرفیت لجستیکی این شبکه‌ها را به‌سوی جمع‌آوری معکوس پسماند قابل بازیافت هدایت کنند. بخشی از این اثر خالص نامطلوب تجارت الکترونیک بر نرخ بازیافت در سطوح بالای سخت‌گیری قانونی را می‌توان به یک شکست بازار مشخص، ناشی از تجارت فرامرزی الکترونیک، نیز نسبت داد. سیاست مسئولیت گسترده تولیدکننده (EPR) که هزینه‌های پایان عمر محصول را درونی می‌کند، عمدتاً بر تولیدکنندگان و پلتفرم‌های ثبت‌شده در داخل هر کشور قابل اجراست؛ در حالی که فروشندگان خرد فرامرزی، از طریق پلتفرم‌های واسط بین‌المللی، می‌توانند بدون ثبت‌نام در نظام‌های EPR ملی و بدون پرداخت عوارض بازیافت، مستقیماً به مصرف‌کننده نهایی دسترسی یابند. این پدیده سواری مجانی، بخشی از ظرفیت لجستیکی و اطلاعاتی تجارت الکترونیک را از کارکرد بالقوه آن در ارتقای بازیافت جدا می‌کند. پاسخ نظارتی اتحادیه اروپا به این شکست بازار، پاسپورت دیجیتال محصول ذیل مقررات طراحی اکولوژیک (ESPR) است؛ ابزاری که با ثبت مسیر کامل زنجیره ارزش هر کالا و الزام پلتفرم‌های واسط بین‌المللی به کنترل آن، راه‌گزین فروشندگان فرامرزی از تعهدات EPR را مسدود می‌کند. این یافته‌ها مبنای تجربی سه پیشنهاد سیاستی بخش بعد را تشکیل می‌دهند.

۲-۵- پیشنهاد سیاستی

با توجه به یافته‌های پژوهش، توصیه‌های سیاستی زیر برای کشورهای اروپایی ارائه می‌گردد: (۱) گذار از رگولاتوری دستوری به هوشمند با تمرکز بر مشوق‌های مالیاتی برای پلتفرم‌هایی که از بسته‌بندی‌های کاملاً چرخشی استفاده می‌کنند؛ (۲) اجرای الزامات پاسپورت دیجیتال محصول (ESPR) برای مسدود کردن سواری مجانی تجارت فرامرزی الکترونیک از سیستم‌های EPR؛ (۳) تقویت زیرساخت‌های لجستیک معکوس در مناطق متراکم. برای اقتصاد ایران: (۱) از آنجا که EPS ایران پایین‌تر از آستانه‌های شناسایی‌شده است، گسترش کسب‌وکارهای پلتفرمی می‌تواند پتانسیل بالایی برای کاهش پسماندهای تجاری و اداری داشته باشد؛ (۲) تدوین مقرراتی که پلتفرم‌های بزرگ (مانند دیجی‌کالا و اسنپ‌فود) را ملزم به مشارکت در هزینه‌های EPR کند؛ (۳) استفاده از داده‌های شبکه شاپرک برای شناسایی نقاط داغ تولید زباله و بهینه‌سازی ناوگان جمع‌آوری.

۳-۵- محدودیت‌های پژوهش

مهم‌ترین محدودیت پژوهش، استفاده از درون‌یابی برای نیمی از مشاهدات دوره مطالعه (سال‌های فرد) است که می‌تواند بخشی از خودهمبستگی سریالی مشاهده‌شده را توضیح دهد. همچنین، محدودیت زمانی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ که شامل تکانه کووید-۱۹ بود ممکن است الگوهای مصرف و تولید زباله را موقتاً تحت تأثیر قرار داده باشد. پژوهش‌های آتی می‌توانند مدل‌های پانل فضایی، تفکیک مدل‌های کسب‌وکار B2B در برابر B2C، و ورود متغیرهای فرهنگی رفتار مصرف‌کننده را مورد بررسی قرار دهند.

منابع

- Baalbaki, R., & Marrouch, W. (2020). Is there a garbage Kuznets curve? Evidence from OECD countries. *Economics Bulletin*, 40(2), 1049-1055.
- Becker, G. S. (1965). A theory of the allocation of time. *Economic Journal*, 75(299), 493-517.
- DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147-160.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation.
- European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. COM (2020) 98 final. Brussels.
- European Environment Agency (EEA). (2022). Reaching 2030's residual municipal waste target: Why recycling is not enough (EEA Briefing No. 02/2022).

- Eurostat. (2022). Municipal waste statistics. Statistics Explained, European Commission.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- Hertwich, E. G. (2005). Consumption and the rebound effect: An industrial ecology perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), 85-98.
- Hilton, M., Sherrington, C., McCarthy, A., & Börkey, P. (2019). Extended Producer Responsibility (EPR) and the impact of online sales. *OECD Environment Working Papers*, No. 142.
- Jevons, W. S. (1865). *The coal question: An inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal mines*. Macmillan.
- Konat, G., Dürri, Z., & Han, A. (2024). Investigation of waste Kuznets curve hypothesis in selected OECD member EU countries. *Journal of Academic Approaches*, 15(2), 1028-1049.
- Mersico, L., Aureli, S., & Foschi, E. (2024). Exploring the role of digital platforms in promoting value co-creation in municipal solid waste management. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*.
- OECD. (2001). *Extended producer responsibility: A guidance manual for governments*. OECD Publishing.
- Popovic, et al. (2025). The e-commerce expansion and waste generation in the EU: A panel vector autoregression approach. *Ekonomika*, 71(2).
- Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97-118.
- Tao, C., & Zhan, C. (2025). From trade to green: How cross-border e-commerce drives green technology inventions. *Science Progress*, 108(1).
- Turban, E., Outland, J., King, D., Lee, J. K., Liang, T. P., & Turban, D. C. (2018). *Electronic commerce 2018: A managerial and social networks perspective* (9th ed.). Springer.
- UNCTAD. (2024). *Digital economy report 2024: Shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future*. United Nations.
- Woola. (2025). *Online shopping packaging waste statistics*. Woola Report.
- Zhang, Y., et al. (2023). Strategies and practices to reduce the ecological impact of product returns: An environmental sustainability framework. *Business Strategy and the Environment*.