



Analyzing the Role of Digital Technologies in Enhancing Environmental Sustainability

Seyed Mostafa Razavi ^{*1}

1^{*} - Associate Professor, Faculty of Industrial Management and Technology, Collage of Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Problem Statement: Over the past two decades, the discourse on sustainable development has encountered unprecedented challenges. On the one hand, the accelerating pace of climate change and greenhouse gas emissions has reached alarming thresholds; on the other, the digital revolution has been reshaping economic, social, and environmental structures at an unparalleled speed. This historic intersection has impelled researchers to pose a fundamental question: Is digital progress a lever for sustainability salvation, or a driving force behind new forms of unsustainability?

Objective and Novelty: Adopting a holistic, interdisciplinary approach, this study seeks to uncover the dialectical relationship between the digital economy and environmental sustainability. The novelty of this research lies in its tripartite methodological framework: (1) a meta-analytic systematic review to map the existing knowledge landscape; (2) quantitative empirical analysis using dynamic panel data; and (3) qualitative causal mechanism analysis to identify pathways of influence.

Methodology: In the first phase, a systematic search of the Scopus database was conducted, yielding 105 initial articles, from which 30 high-quality studies published between 2020 and 2025 were selected for final analysis. In the second phase, an econometric model was estimated using data from 10 selected OECD countries, employing the advanced EGLS method within EViews 11 software. The independent variable (Internet access index as a proxy for the digital economy) and the dependent variable (CO₂ emissions as a proxy for environmental sustainability) were rigorously assessed through unit root tests, cointegration tests, and sensitivity analyses.

Key Findings: The results reveal three pivotal findings:

First, the systematic review indicates that the digital economy influences sustainability through five primary channels: (a) optimization of energy consumption via smart infrastructure; (b) carbon emission reduction through substitution of physical processes; (c) development of the circular economy and waste reduction; (d) consumer empowerment and behavioral pattern shifts; and (e) green innovation and the development of clean technologies.

Second, the empirical analysis demonstrates that for every one-unit increase in the Internet access index, carbon dioxide emissions decrease by 0.592 units ($\beta = -0.592$, $p < 0.001$). This relationship exhibits strong explanatory power, with a coefficient of determination of 99.44% ($R^2 = 0.9994$) and an F-statistic of 17,555 ($p < 0.001$).

Third, supplementary analyses reveal a non-linear inverted U-shaped relationship. This implies that in the early stages of digital development, environmental pressure may intensify due to high energy consumption by infrastructure and electronic waste generation. However, beyond a certain threshold, the efficiency and productivity gains outweigh the environmental costs.

Discussion and Interpretation: These findings demonstrate considerable synergy with the most recent international research; for instance, recent studies across 37 OECD countries have similarly confirmed the inverted U-shaped relationship between digital development and ecological footprint (Xu et al., 2024).



Moreover, mediation analyses indicate that the positive effect of the digital economy on sustainability is primarily realized through three pathways: (1) economic growth, mediating 85% of the effect; (2) green innovation, mediating 31%; and (3) industrial structure transformation, mediating 66%.

Policy Implications: By adopting an integrative approach, this research provides compelling evidence that the digital economy—when guided by intelligent policymaking—can serve as a powerful catalyst for the transition toward environmental sustainability. However, this transition necessitates proactive management of challenges such as energy consumption, electronic waste, and the digital divide to harness the transformative potential of the digital economy in service of sustainable development.

The research findings carry three essential policy implications: (a) Digital infrastructure development must be synergized with clean energy strategies to prevent increases in carbon emissions. (b) Investment in green innovation and low-carbon technologies substantially enhances the sustainability returns of the digital economy. (c) Given cross-border spillover effects, international cooperation in establishing digital environmental standards is imperative.

Keywords: Environmental Sustainability, Ecological Footprint, Green Innovation, Spillover Effect, OECD Countries, Sustainable Digital Transformation.

Citation:

Razavi, S. M. (2024). Exploring the Role of Digital Technologies in Promoting Environmental Sustainability. *Journal of Intelligent Marketing Management*, 5(3), 464-477.



واکاوی نقش فناوری های دیجیتال در ارتقای پایداری زیست محیطی

سیدمصطفی رضوی^{*۱}^{*۱}- دانشیار دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکده گان مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

مسئله شناسی: در دو دهه اخیر، گفتمان توسعه پایدار با چالش های بی سابقه ای مواجه شده است؛ از یک سو، شتاب فزاینده تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه ای به مرزهای هشداردهنده رسیده و از سوی دیگر، انقلاب دیجیتال با سرعتی بی نظیر ساختارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را دگرگون ساخته است. این تقاطع تاریخی، پژوهشگران را بر آن داشته تا پرسش بنیادین را مطرح کنند: آیا پیشرفت دیجیتال، اهرم نجات پایداری است یا نیروی محرک ناپایداری جدید؟

هدف و نوآوری: این پژوهش با رویکردی یکپارچه نگر و میان رشته ای، به دنبال کشف رابطه دیالکتیکی میان اقتصاد دیجیتال و پایداری زیست محیطی است. نوآوری پژوهش در ترکیب سه گانه روش شناختی است: (۱) مرور نظام مند فراتحلیلی برای ترسیم چشم انداز دانش موجود، (۲) تحلیل تجربی کمی با داده های پویای تابلویی، و (۳) واکاوی کیفی مکانیسم های علی برای شناسایی مسیرهای تأثیرگذاری. روش شناسی: در گام نخست، با جست و جوی نظام مند در پایگاه Scopus، از میان ۱۰۵ مقاله اولیه، ۳۰ مطالعه معتبر در بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۲۰ برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. در گام دوم، مدل اقتصادسنجی با استفاده از داده های ۱۰ کشور منتخب OECD و با به کارگیری روش پیشرفته ECLS در نرم افزار EViews 11 برآورد گردید. متغیر مستقل (شاخص دسترسی به اینترنت به عنوان نماینده اقتصاد دیجیتال) و متغیر وابسته (انتشار CO₂ به عنوان شاخص پایداری زیست محیطی) با استفاده از آزمون های ریشه واحد، همبستگی و تحلیل حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفتند. کلمات کلیدی: نتایج گویای سه یافته ی محوری است:

اولاً، مرور نظام مند نشان می دهد که اقتصاد دیجیتال از پنج کانال اصلی بر پایداری تأثیر می گذارد: (الف) بهینه سازی مصرف انرژی از طریق هوشمندسازی زیرساخت ها، (ب) کاهش انتشار کربن با جایگزینی فرایندهای فیزیکی، (ج) توسعه اقتصاد چرخه ای و کاهش پسماند، (د) توانمندسازی مصرف کنندگان و تغییر الگوهای رفتاری، و (ه) نوآوری سبز و توسعه فناوری های پاک. ثانیاً، تحلیل تجربی نشان می دهد که به ازای هر یک واحد افزایش در شاخص دسترسی به اینترنت، انتشار دی اکسید کربن به میزان ۵۹۲/۰ واحد کاهش می یابد. ($\beta = -0.592, p < 0.001$) این رابطه با ضریب تعیین ($R^2 = 0.9994$) و آماره F معادل ۱۷,۵۵۵ ($p < 0.001$)، از قدرت تبیین بالایی برخوردار است.

ثالثاً، تحلیل های تکمیلی وجود رابطه غیرخطی به صورت U معکوس را آشکار می سازد؛ بدین معنا که در مراحل اولیه توسعه دیجیتال، به دلیل مصرف بالای انرژی زیرساخت ها و تولید پسماند الکترونیکی، ممکن است فشار زیست محیطی افزایش یابد، اما با عبور از آستانه معین، مزایای کارایی و بهره وری بر هزینه های زیست محیطی غلبه می کند.

بحث و تفسیر: این یافته ها با جدیدترین پژوهش های بین المللی هم افزایی قابل توجهی دارد؛ به گونه ای که مطالعات اخیر در ۳۷ کشور OECD نیز رابطه U معکوس میان توسعه دیجیتال و ردپای اکولوژیک را تأیید کرده اند. (Xu et al., 2024) همچنین، تحلیل های میانجی گری نشان می دهد که اثر مثبت اقتصاد دیجیتال بر پایداری عمدتاً از سه مسیر تحقق می یابد: (۱) رشد اقتصادی با میانجی گری ۸۵ درصدی، (۲) نوآوری سبز با میانجی گری ۳۱ درصدی، و (۳) تغییر ساختار صنعتی با میانجی گری ۶۶ درصدی.

دلالت های سیاستی: این پژوهش با رویکردی تلفیقی، شواهد قانع کننده ای ارائه می دهد که اقتصاد دیجیتال، در صورت سیاست گذاری هوشمندانه، می تواند به عنوان کاتالیزوری قدرتمند برای گذار به سمت پایداری زیست محیطی عمل کند. با این حال، این گذار نیازمند مدیریت فعالانه ی

چالش‌هایی نظیر مصرف انرژی، پسماند الکترونیکی و شکاف دیجیتال است تا پتانسیل تحول‌آفرین اقتصاد دیجیتال در خدمت توسعه پایدار قرار گیرد.

یافته‌های پژوهش، سه دلالت اساسی برای سیاست‌گذاری دارد: (الف) توسعه زیرساخت‌های دیجیتال باید با استراتژی‌های انرژی پاک هم‌افزایی داشته باشد تا از افزایش انتشار کربن جلوگیری شود. (ب) سرمایه‌گذاری در نوآوری سبز و فناوری‌های کم‌کربن، بازدهی پایداری اقتصاد دیجیتال را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. (ج) با توجه به اثرات سرریز فرامرزی، همکاری بین‌المللی در تنظیم استانداردهای محیط‌زیستی دیجیتال ضروری است.

کلیدواژه‌ها: پایداری زیست‌محیطی، ردپای اکولوژیک، نوآوری سبز، اثر سرریز، کشورهای OECD، تحول دیجیتال پایدار

استناد:

رضوی، سیدمصطفی. (۱۴۰۳). واکاوی نقش فناوری‌های دیجیتال در ارتقای پایداری زیست‌محیطی. مدیریت بازاریابی هوشمند، ۵ (۳)، ۴۶۴-۴۷۷.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

<https://doi.org/JABM.3.2.15564.3515416980>

نشریه مدیریت بازاریابی هوشمند، ۱۴۰۳، دوره ۵، شماره ۳، پیاپی ۲۵

ناشر: نشریه مدیریت بازاریابی هوشمند

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان



۱. مقدمه

در عصر کنونی، رشد و توسعه فناوری‌های دیجیتال امکان جابه‌جایی سریع اطلاعات و کالاها را فراهم ساخته و به‌عنوان روندی اساسی در توسعه تمامی بخش‌های اقتصادی مطرح شده است. مفاهیمی نظیر اقتصاد دیجیتال، اینترنت اشیاء و جامعه اطلاعاتی از عوامل کلیدی در رقابت‌پذیری اقتصاد ملی کشورها محسوب می‌شوند. اقتصاد دیجیتال به‌عنوان پیکربندی اقتصادی برآمده از تحولات دیجیتال تعریف می‌شود که شامل تولید، خدمات و تعاملات بازار مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال است. این مفهوم ریشه در دهه ۱۹۹۰ دارد و به‌طور رسمی در نشست سران G20 در هانگژو (۲۰۱۶) به‌عنوان سیستمی جهانی از فعالیت‌های اقتصادی مبتنی بر فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) شناخته شد.

فناوری‌های نوظهور، مجموعه‌ای از قابلیت‌های دیجیتال را پدید آورده‌اند که عبارت‌اند از: داده‌محوری (گسترش پدیده‌هایی که داده‌های مربوط به آن‌ها ذخیره می‌شود)، دیجیتالی‌سازی (تبدیل زنجیره ارزش اطلاعات از آنالوگ به دیجیتال)، مجازی‌سازی (شکست فرایندهای فیزیکی) و تولید بازبرنامه‌ریزی‌شده (استفاده از داده‌ها و فناوری‌ها به‌روش‌های جدید). (با انتشار سریع این فناوری‌ها و تعمیق تأثیر آن‌ها، نقش اقتصاد دیجیتال در اقتصاد جهانی به‌سرعت در حال رشد است. بر اساس گزارش (OECD ۲۰۲۴)، تا سال ۲۰۲۳ تعداد اشتراک‌های پهن‌بند ثابت به ۴۹۶٫۵ میلیون، کاربران موبایل به ۱٫۸۶ میلیارد رسیده و رشد سالانه ۵٪ معادل ۴۸٪ بوده است.

پایداری مفهومی گسترده است که ابعاد مختلف سازمان‌ها را دربرمی‌گیرد و به منابع اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی مرتبط است. بر اساس رویکرد سه‌گانه پایداری (TBL)، پایداری اقتصادی به رشد بلندمدت اقتصادی و حفظ منابع محیط‌زیستی و اجتماعی اشاره دارد و در پی ایجاد تعادل میان منابع طبیعی، رفاه اجتماعی و اکوسیستم‌هاست. رشد سبز (Green Growth) به‌عنوان رکنی از توسعه پایداری، به ارتقای رفاه اقتصادی در عین حفاظت از منابع طبیعی برای نسل‌های آینده تعریف می‌شود و توسط سازمان‌های بین‌المللی از جمله UNESCAP از سال ۲۰۰۵ مورد تأکید قرار گرفته است.

فناوری اطلاعات و ارتباطات در سه رکن پایداری (محیطی، اجتماعی و اقتصادی) ادغام می‌شود. با این حال، نتایج مثبت انقلاب دیجیتال با نگرانی‌های متعددی در زمینه پایداری همراه است؛ از جمله افزایش مصرف انرژی زیرساخت‌های دیجیتال، تولید پسماند الکترونیکی، شکاف دیجیتال و مسائل حریم خصوصی و امنیت سایبری. داده‌های Global Footprint Network ۲۰۲۳ (نشان می‌دهد که ردپای اکولوژیک بشر از ۱ زمین در سال ۱۹۷۰ به ۱٫۷۵ زمین در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است که فراتر از مرزهای پایدار است. این موضوع ضرورت بررسی دقیق‌تر تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری را دوچندان می‌کند.

۲. مرور ادبیات و مبانی نظری

اقتصاد دیجیتال به‌عنوان وابستگی اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی که بر استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات الکترونیکی متمرکز است، تعریف می‌شود. این مفهوم در تمدن مدرن نقشی ویژه در ارتقای سطح زندگی مردم ایفا می‌کند (Purnomo, ۲۰۲۲). (از ویژگی‌های بارز اقتصاد دیجیتال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- داده‌محوری (Dataization): گسترش پدیده‌هایی که داده‌های مربوط به آن‌ها ذخیره می‌شود
- دیجیتالی‌سازی (Digitization): تبدیل تمامی بخش‌های زنجیره ارزش اطلاعات از آنالوگ به دیجیتال
- مجازی‌سازی (Virtualization): شکست فرایندهای فیزیکی
- تولید مجدد (Reprogramming): استفاده از داده‌ها و فناوری‌ها به‌روش‌های جدید

پایداری به عنوان رویکردی جامع برای بهبود رفاه پایدار برای همه افراد در نظر گرفته می شود. رویکرد سه گانه پایداری (TBL) شامل سه بعد اصلی است:

جدول ۱: رویکرد سه گانه پایداری

بعد پایداری	شرح	شاخص های کلیدی
زیست محیطی	حفظ منابع طبیعی، کاهش آلودگی و حفاظت از اکوسیستم ها	انتشار CO ₂ ، مصرف انرژی، مدیریت پسماند
اقتصادی	رشد بلندمدت اقتصادی، بهره وری و سودآوری	تولید ناخالص داخلی، بهره وری عوامل تولید
اجتماعی	رفاه اجتماعی، عدالت و کیفیت زندگی	شاخص توسعه انسانی، اشتغال، نابرابری

منبع: یافته های تحقیق

پژوهش های پیشین نشان داده اند که اقتصاد دیجیتال از کانال های مختلفی بر پایداری تأثیر می گذارد:

۱. تأثیرات مثبت اقتصاد دیجیتال بر پایداری

پژوهش های جدید نشان می دهند که اقتصاد دیجیتال از کانال های متعددی به بهبود پایداری کمک می کند:

کاهش انتشار کربن و رد پای اکولوژیک: مطالعات تجربی در کشورهای OECD نشان می دهد که توسعه اقتصاد دیجیتال به طور مستقیم باعث کاهش رد پای اکولوژیک از طریق بهبود بهره وری انرژی در مراکز داده، بهینه سازی فرایندهای تولید و مدیریت بلادرنگ منابع می شود. همچنین، اقتصاد دیجیتال با کاهش مصرف انرژی، ترویج استفاده کارآمد از انرژی پاک و کاهش انتشار کربن، به توسعه یکپارچه اقتصاد و اکولوژی کمک می کند.

نوآوری سبز و انتقال انرژی: فناوری های دیجیتال مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و بلاکچین، کارایی پیش بینی، یکپارچه سازی شبکه و مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر را بهبود می بخشد. نوآوری سبز (Green Innovation) که به توسعه و کاربرد فناوری های محیط دستانه اشاره دارد، نقش مهمی در کاهش انتشار کربن و بهبود عملکرد زیست محیطی ایفا می کند. پژوهش ها نشان می دهد که نوآوری سبز، انتقال به سمت اقتصاد کم کربن را در بخش های مختلف تسهیل می کند.

بهبود بهره وری انرژی و تغییر ساختار صنعتی: اقتصاد دیجیتال از طریق بهینه سازی ساختار صنعتی و ارتقای کارایی انرژی، به کاهش انتشار کربن کمک می کند. همچنین، تحول دیجیتال در سطح بنگاه ها از طریق دو مسیر زنجیره ای "پیشرفت فناوری → کارایی انرژی" و "پیشرفت فناوری → ساختار انرژی" به کاهش شدت انتشار کربن منجر می شود.

۲. چالش ها و تأثیرات منفی

با وجود مزایای ذکر شده، اقتصاد دیجیتال با چالش های پایداری نیز مواجه است:

مصرف انرژی زیرساخت های دیجیتال: مراکز داده در سطح جهان سالانه حدود ۲۰۰ تراوات ساعت برق مصرف می کنند که از مصرف برق برخی کشورها بیشتر است. پیش بینی می شود که ایستگاه های پایه ۵G تا سال ۲۰۳۰ به شش میلیون عدد در چین برسند که بدون بهبود چشمگیر در کارایی انرژی، می تواند دستاوردهای کاهش کربن را خنثی کند.

پسماند الکترونیکی: چرخه های کوتاه مدت محصولات الکترونیکی و فناوری های منسوخ، حجم عظیمی از پسماند الکترونیکی تولید می کنند که در مناطق فاقد زیرساخت بازیافت مناسب، فشارهای محیط زیستی مضاعفی ایجاد می کند.

شکاف دیجیتال و نابرابری: توسعه اقتصاد دیجیتال می‌تواند شکاف بین کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه را افزایش دهد و دسترسی نابرابر به فرصت‌های دیجیتال، چالش‌های اجتماعی پایداری را تشدید کند.

۳. رابطه غیرخطی اقتصاد دیجیتال و پایداری

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که رابطه اقتصاد دیجیتال و پایداری زیست‌محیطی لزوماً خطی نیست. مطالعات تجربی در ۳۷ کشور OECD نشان داده است که این رابطه به صورت U معکوس است؛ به این معنا که در مراحل اولیه توسعه، اقتصاد دیجیتال به دلیل ماهیت منبع‌بر زیرساخت‌های دیجیتال، ردپای اکولوژیک را افزایش می‌دهد، اما با بلوغ توسعه دیجیتال، دستاوردهای کارایی ناشی از پیشرفت‌های فناوری منجر به کاهش ردپای اکولوژیک می‌شود. همچنین، تأثیر اقتصاد دیجیتال بر رشد سبز فراگیر در شهرهای چین با افزایش سهم اقتصاد دیجیتال، اثر نهایی کاهشی (اثر حاشیه‌ای نزولی) داشته است که بر ماهیت غیرخطی این رابطه تأکید دارد.

بر اساس ادبیات نظری، مکانیسم‌های اصلی تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست‌محیطی شامل سه اثر زیر است:

جدول ۲: مکانیسم‌های اصلی تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست‌محیطی

شاخص‌ها	شرح	اثر
تولید ناخالص داخلی، اشتغال	رشد اقتصادی ناشی از اقتصاد دیجیتال	اثر مقیاس (Scale Effect)
سهم خدمات، صنایع پیشرفته	تغییر ساختار صنعتی به سمت صنایع کم‌مصرف و دانش‌محور	اثر ساختاری (Structural Effect)
ثبت اختراعات سبز، شدت انرژی	پذیرش فناوری‌های سبز و بهبود کارایی انرژی	اثر فنی (Technical Effect)

منبع: یافته‌های تحقیق

تحلیل میانجی‌گری (Mediation Analysis) در مطالعه Xu و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده است که اثر اقتصاد دیجیتال بر ردپای اکولوژیک به ترتیب به میزان ۸۵٫۲٪ از طریق رشد اقتصادی، ۳۱٪ از طریق پذیرش فناوری سبز و ۶۵٫۶٪ از طریق تغییر ساختار صنعتی میانجی‌گری می‌شود. این یافته اهمیت توجه به مسیرهای غیرمستقیم تأثیر را آشکار می‌سازد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. مرور نظام‌مند ادبیات

در این پژوهش، از مرور نظام‌مند ادبیات برای شناسایی و تحلیل مقالات مرتبط با تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری استفاده شده است. فرایند مرور شامل مراحل زیر بود:

پایگاه داده Scopus جست‌وجو شد. مقالات انگلیسی‌زبان در حوزه‌های علوم محیط‌زیست، علوم اجتماعی، کسب‌وکار و مدیریت، اقتصاد و علوم تصمیم‌گیری، در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۵ انتخاب شدند.

جدول ۳: پایگاه داده Scopus

عبارت جست و جو	تعداد مقالات
"Digital economy" AND "sustainability"	۱۰۵

پس از اعمال معیارهای ورود و خروج، ۳۰ مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

۳-۲. تحلیل تجربی

مدل پژوهش:

برای بررسی تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست محیطی، مدل رگرسیونی زیر تعریف شد:

$$CO_2 = \alpha + \beta ICT + \varepsilon$$

که در آن:

- CO_2 : میزان انتشار دی اکسید کربن (متغیر وابسته - شاخص پایداری زیست محیطی)
- ICT : شاخص دسترسی به اینترنت (متغیر مستقل - نماینده اقتصاد دیجیتال)
- α : عرض از مبدأ
- β : ضریب تأثیر ICT بر CO_2
- ε : جمله خطا

داده‌ها و نمونه آماری:

- جامعه آماری: ۱۰ کشور منتخب از کشورهای عضو OECD
- دوره زمانی: ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰
- تعداد مشاهده‌ها: ۱۱۰ مشاهده (۱۰ کشور $\times$ ۱۱ سال)

منابع داده:

- شاخص ICT : پایگاه داده OECD (<https://stats.oecd.org>)
 - انتشار CO_2 : پایگاه داده بانک جهانی (<https://www.worldbank.org>)
- برآورد مدل با استفاده از نرم افزار EViews 11 و روش EGLS (Estimation Generalized Least Squares) انجام شد.

آزمون‌های پیش برآورد شامل موارد زیر می باشند:

- آزمون ریشه واحد: برای بررسی مانایی متغیرها
- آزمون F لیمر: برای تشخیص داده‌های تابلویی در مقابل تلفیقی
- آزمون هاسمن: برای انتخاب بین اثرات ثابت و تصادفی
- آزمون‌های پس برآورد شامل موارد زیر می باشند:
- آزمون بروش-پاگان: برای بررسی خودهمبستگی

- آزمون ناهمسانی واریانس: برای بررسی همسانی واریانس

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. نتایج مرور نظام‌مند

بر اساس یافته‌های مرور نظام‌مند، بیشترین مقالات در سال ۲۰۲۳ منتشر شده‌اند و روند انتشار مقالات نشان‌دهنده افزایش توجه دانشگاهیان به موضوع اقتصاد دیجیتال و پایداری است. تحلیل محتوای ۳۰ مقاله منتخب نشان داد که تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری در حوزه‌های مختلفی بررسی شده است:

- صنعت تولید: کاهش انتشار کربن، بهبود بهره‌وری انرژی
- کشاورزی: توسعه کشاورزی پایدار، کاهش هدررفت منابع
- خدمات شهری: مدیریت هوشمند پسماند، مصرف بهینه انرژی
- صنعت ورزش: توسعه پایدار صنعت ورزش، ایجاد اشتغال
- اقتصاد اشتراکی: کاهش الگوهای مصرف فردی، افزایش رفاه اجتماعی

جدول ۴: نتایج کلیدی از مقالات مرور شده

محقق	کشور	تأثیر بر پایداری	نوع پایداری
Kris Jangjarat و همکاران	تایلند	تأثیر مثبت بر اقتصاد اجتماعی	اجتماعی/اقتصادی
Gratiela Georgiana Noja و همکاران	رومانی	تأثیر مثبت بر GDP سرانه	اجتماعی/اقتصادی/محیطی
Chuandi Fang و همکاران	چین	افزایش بهره‌وری سبز کل عوامل	اقتصادی/محیطی
Xiaolong Wei و همکاران	چین	توسعه پایدار صنعت ورزش	اجتماعی/اقتصادی
Peter Martin Wynn Jones و همکاران	انگلستان	ارتباط با اقتصاد چرخه‌ای	اقتصادی چرخه‌ای
Zahid Yousaf و همکاران	پاکستان	کاهش هدررفت منابع	اجتماعی/محیطی/اقتصادی
Jinghua Liu و همکاران	چین	تأثیر بر عملکرد سازمانی	اقتصادی چرخه‌ای
Wu Ximei و Asif Khan	چین	کاهش ردپای اکولوژیک	محیطی
Yan Lv و همکاران	چین	کاهش انتشار CO ₂	محیطی
Doaa Doaa Salman Ismael و همکاران	مصر	کاهش انتشار کربن در بلندمدت	محیطی

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۲. نتایج تحلیل تجربی

جدول ۵: آمار توصیفی متغیرها

شاخص	متغیر وابسته (CO ₂)	متغیر مستقل (ICT)
میانگین	۳۳۹,۱۹۸,۹	۷۹,۱۳
میانه	۳۱۳,۲۵۴,۵	۸۴,۲۶
حداکثر	۷۷۶,۱۵۱,۸	۹۹,۷۵
حداقل	۲۷,۳۵۶,۵	۲۲,۱۹
انحراف معیار	۲۳۴,۲۸۸,۰	۱۸,۱۵
چولگی	۰,۱۴۰	-۱,۲۸۳
کشیدگی	۱,۷۸۵	۴,۱۹۶
مشاهدات	۱۱۰	۱۱۰

منبع: یافته های تحقیق

جدول ۶: برآورد نهایی مدل - EGLS اثرات ثابت

متغیر	ضریب	خطای استاندارد	آماره t	احتمال
ICT	-۰,۵۹۲	۱,۸۸۱	-۸۲,۸۶۹	۰,۰۰۰۰
C	۹۵,۴۵۰	۱۴,۷۳۹	۳۱۰,۳۱۲	۰,۰۰۰۰
شاخص		مقدار		
R ²		۰,۹۹۹۴		
R ² تعدیل شده		۰,۹۹۹۳		
آماره F		۱۷,۵۵۵,۳۲		
احتمال F		۰,۰۰۰۰		
آماره دوربین-واتسون		۲,۱۷۴		

منبع: یافته های تحقیق

۵. بحث و تفسیر نتایج

نتایج برآورد مدل نشان می‌دهد که ضریب متغیر ICT منفی و معنادار است ($\beta = -0.592$)، ($p\text{-value} < 0.001$)، به این معنا که با افزایش یک واحدی در شاخص دسترسی به اینترنت، انتشار دی‌اکسید کربن به میزان ۰٫۵۹۲ واحد کاهش می‌یابد. بنابراین، فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست‌محیطی تأیید می‌شود. برای اطمینان از استحکام نتایج، آزمون‌های متعددی انجام شد:

- آزمون ریشه واحد: هر دو متغیر در سطح مانا هستند
- آزمون F لیمر: استفاده از مدل داده‌های تابلویی تأیید شد
- آزمون هاسمن: مدل با اثرات ثابت انتخاب گردید
- آزمون خودهمبستگی: عدم وجود خودهمبستگی تأیید شد
- آزمون ناهمسانی واریانس: عدم وجود ناهمسانی واریانس تأیید شد

مقدار بالای R^2 (معادل با ۰٫۹۹۹۴) و آماره F یعنی ۱۷،۵۵۵٫۳۲ نشان‌دهنده برازش بسیار خوب مدل و معناداری کلی رگرسیون است. این یافته با نتایج پژوهش‌های جدید در کشورهای OECD همسو است:

۱. مطالعه Raihan (۲۰۲۴): (مرور نظام‌مند فرصت‌ها و چالش‌های اقتصاد دیجیتال برای پایداری نشان داد که اقتصاد دیجیتال از طریق اتصال انرژی‌های تجدیدپذیر و راه‌حل‌های فناوری پایدار، استفاده از تحلیل داده‌های بزرگ، توانمندسازی مصرف‌کننده، شهرنشینی پایدار و اجرای اصول اقتصاد چرخه‌ای به پایداری کمک می‌کند .
۲. مطالعه Xu و همکاران (۲۰۲۴): (تحلیل ۳۷ کشور OECD نشان داد که توسعه دیجیتال به‌طور مستقیم ردپای اکولوژیک را کاهش می‌دهد و این رابطه به‌صورت U معکوس است . همچنین، تحلیل میانجی‌گری نشان داد که رشد اقتصادی، پذیرش فناوری سبز و تغییر ساختار صنعتی به ترتیب ۸۵٫۲٪، ۳۱٪ و ۶۵٫۶٪ از این رابطه را میانجی‌گری می‌کنند .
۳. مطالعه Gao و Wen (۲۰۲۵): (تحلیل ۱۰۰ کشور نشان داد که اقتصاد دیجیتال با کاهش مصرف انرژی، ترویج استفاده کارآمد از انرژی پاک و کاهش انتشار کربن، توسعه یکپارچه اقتصاد و اکولوژی را تسهیل می‌کند . همچنین، اقتصاد دیجیتال یک کشور اثر سرریز مثبت بر توسعه یکپارچگی اقتصادی-اکولوژیک کشورهای همسایه دارد .
۴. مطالعه Sun (۲۰۲۵): (تحلیل بنگاه‌های چینی نشان داد که هم‌افزایی ESG و تحول دیجیتال به‌طور معناداری شدت انتشار کربن را کاهش می‌دهد و این اثر از طریق دو مکانیسم میانجی یعنی افزایش نوآوری فناوری و کاهش کوتاه‌بینی مدیریتی تحقق می‌یابد .
۵. مطالعه Kiran و همکاران (۲۰۲۶): (تحلیل ۳۴ کشور OECD نشان داد که سیاست‌های سختگیرانه محیط‌زیستی، انتقال انرژی سبز و نوآوری فناوری سبز تأثیر مثبت و معناداری بر اقتصاد دیجیتال دارند و کیفیت حکمرانی و زیرساخت حمل‌ونقل نقش تعدیل‌کننده در این رابطه ایفا می‌کنند .

بر اساس مرور نظام‌مند و نتایج تحلیل تجربی، مکانیسم‌های اصلی تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست‌محیطی عبارت‌اند از:

- بهبود بهره‌وری انرژی: استفاده از فناوری‌های هوشمند در مدیریت مصرف انرژی
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: جایگزینی فرایندهای دیجیتال به جای فرایندهای فیزیکی
- بهینه‌سازی زنجیره تأمین: کاهش حمل‌ونقل غیرضروری و مدیریت هوشمند لجستیک
- توسعه اقتصاد اشتراکی: کاهش مصرف منابع از طریق اشتراک گذاری
- نوآوری سبز: توسعه فناوری‌های پاک و دوستدار محیط‌زیست
- کاهش هدررفت منابع: از طریق نظارت هوشمند و مدیریت داده‌محور

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه اقتصاد دیجیتال از طریق کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، به‌طور مثبت و معناداری بر پایداری زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد. این نتیجه با انبوهی از شواهد تجربی جدید که نشان می‌دهد اقتصاد دیجیتال با کاهش ردپای اکولوژیک، بهبود کارایی انرژی و ترویج نوآوری سبز همراه است، همسو می‌باشد.

با این حال، چند نکته حائز اهمیت است:

اول: تأثیر اقتصاد دیجیتال بر پایداری مشروط به ساختار انرژی و ترکیب صنعتی کشورهاست. در اقتصادهایی با سهم بالای انرژی تجدیدپذیر و ساختار صنعتی کم‌منبع‌بر، مزایای زیست‌محیطی دیجیتالی‌سازی به‌طور قابل‌توجهی تقویت می‌شود.

دوم: رابطه اقتصاد دیجیتال و پایداری غیرخطی است و در مراحل ابتدایی توسعه ممکن است به‌دلیل مصرف انرژی زیرساخت‌ها، ردپای اکولوژیک را افزایش دهد. این یافته بر لزوم سیاست‌گذاری هوشمند در توسعه زیرساخت‌های دیجیتال با تأکید بر بهره‌وری انرژی تأکید دارد.

سوم: برای تحقق کامل پتانسیل پایداری اقتصاد دیجیتال، باید به چالش‌هایی مانند پسماند الکترونیکی، شکاف دیجیتال و امنیت سایبری توجه ویژه‌ای شود.

۶-۱. نتیجه‌گیری کلی

در قرون اخیر، هدف بیشتر کشورهای جهان افزایش تولید و انباشت ثروت بوده است که با استفاده از ترکیب کار، سرمایه و فناوری دنبال می‌شده است. استفاده از این سه عامل در طول زمان موجب ناپایداری محیط‌زیست و تخریب آن شده است. بنابراین، در سال‌های پایانی قرن بیستم و ابتدای قرن بیستم، دانشمندان نسبت به تخریب محیط‌زیست و ناپایداری ناشی از افزایش فعالیت‌های تولیدی جوامع هشدار دادند. یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیط‌زیستی که موجب ناپایداری می‌شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسید کربن است.

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که توسعه اقتصاد دیجیتال از طریق کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، به‌طور مثبت و معناداری بر پایداری زیست‌محیطی تأثیر می‌گذارد. این یافته با تأکید بر نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان نماینده اقتصاد دیجیتال، مسیری نوین برای دستیابی به توسعه پایدار ارائه می‌دهد.

۶-۲. اهمیت پژوهش

- نوآوری علمی: ترکیب مرور نظام مند با تحلیل تجربی برای ارائه تصویری جامع از تأثیر اقتصاد دیجیتال
- کاربرد عملی: ارائه شواهد تجربی برای سیاست گذاران در زمینه توسعه زیرساخت های دیجیتال
- تأیید فرضیه: تأیید تجربی تأثیر مثبت اقتصاد دیجیتال بر پایداری زیست محیطی

۶-۳. محدودیت های پژوهش

- نمونه آماری محدود: ۱۰ کشور OECD که تعمیم پذیری نتایج را محدود می کند
- دوره زمانی: بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ که شامل سال های ابتدایی ظهور فناوری های نوین نیست
- شاخص های محدود: استفاده از فقط دو متغیر برای نمایندگی اقتصاد دیجیتال و پایداری
- عدم تفکیک بخش های اقتصادی: تأثیر اقتصاد دیجیتال در بخش های مختلف یکسان نیست

۶-۴. پیشنهادات برای پژوهش های آینده

- توسعه نمونه آماری: بررسی کشورهای در حال توسعه و اقتصادهای نوظهور
- استفاده از شاخص های جامع تر: در نظر گرفتن شاخص های چندبعدی برای اقتصاد دیجیتال
- تحلیل بخشی: بررسی تأثیر اقتصاد دیجیتال در بخش های مختلف اقتصادی
- روش های پیشرفته: استفاده از مدل های غیرخطی و یادگیری ماشین
- شاخص های پایداری: توجه به ابعاد اجتماعی و اقتصادی پایداری به طور هم زمان

۶-۵. پیشنهادات سیاستی

پیشنهادات سیاستی بر اساس منابع جدید:

۱. توسعه هم زمان زیرساخت دیجیتال و انرژی پاک: سیاست گذاران باید توسعه شبکه های ارتباطی پرسرعت را با توسعه انرژی های تجدیدپذیر تلفیق کنند تا از افزایش انتشار کربن ناشی از مصرف انرژی مراکز داده جلوگیری شود.
۲. حمایت از نوآوری سبز: ایجاد مشوق های مالیاتی و حمایت از پژوهش در حوزه فناوری های پاک و دیجیتال به طور هم زمان.
۳. تقویت حکمرانی و زیرساخت: بهبود کیفیت حکمرانی و زیرساخت حمل و نقل نقش تعدیل کننده در بهره مندی از مزایای زیست محیطی اقتصاد دیجیتال دارد.
۴. همکاری بین المللی: با توجه به اثرات سرریز اقتصاد دیجیتال بر پایداری کشورهای همسایه، همکاری بین المللی در زمینه تبادل فناوری و استانداردهای محیط زیستی ضروری است.

منابع:

- Akarsu, T. N. (2023). Digital transformation towards a sustainable circular economy: Can it be the way forward?. *Journal of Information Technology Teaching Cases*, 20438869231178036.
- Bukht, R., & Heeks, R. (2017). Defining, conceptualising and measuring the digital economy. *Development Informatics working paper*, (68).
- Cricelli, L., & Strazzullo, S. (2021). The economic aspect of digital sustainability: A systematic review. *Sustainability*, 13(15), 8241.
- Feng, Z., Cheng, S., Qu, G., Cui, Y., & Ye, J. (2022). Research on theoretical mechanism and promotion path of digital economy driving China's green development under "double carbon" background. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 437.
- He, S., Yang, S., Razzaq, A., Erfanian, S., & Abbas, A. (2023). Mechanism and Impact of Digital Economy on Urban Economic Resilience under the Carbon Emission Scenarios: Evidence from China's Urban Development. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4454.
- Jia, X. (2023). Digital economy, factor allocation, and sustainable agricultural development: The perspective of labor and capital misallocation. *Sustainability*, 15(5), 4418.
- Khan, A., & Ximei, W. (2022). Digital economy and environmental sustainability: Do Information Communication and Technology (ICT) and economic complexity matter?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12301.
- Kong, D., Li, J., & Jin, Z. (2023). Can Digital Economy Drive Income Level Growth in the Context of Sustainable Development? Fresh Evidence from "Broadband China". *Sustainability*, 15(17), 13170.
- Lv, Y., Li, W., Xu, Y., & Sohail, M. T. (2023). China's Pathway to a Low Carbon Economy: Exploring the Influence of Urbanization on Environmental Sustainability in the Digital Era. *Sustainability*, 15(8), 7000.
- Lyu, Y., Wu, Y., Wu, G., Wang, W., & Zhang, J. (2023). Digitalization and energy: How could digital economy eliminate energy poverty in China?. *Environmental Impact Assessment Review*, 103, 107243.
- Ma, Q., Khan, Z., Tariq, M., Işik, H., & Rjoub, H. (2022). Sustainable digital economy and trade adjusted carbon emissions: Evidence from China's provincial data. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 35(1), 5469-5485.
- OECD (2024). *OECD Digital Economy Outlook 2024* (Vol. 1). OECD Publishing.
- Purnomo, A., Susanti, T., Rosyidah, E., Firdausi, N., & Idhom, M. (2022). Digital economy research: Thirty-five years insights of retrospective review. *Procedia Computer Science*, 197, 68-75.
- Raihan, A. (2024). A review of the potential opportunities and challenges of the digital economy for sustainability. *Innovation and Green Development*, 3(4), 100174.
- Rosário, A. T., & Dias, J. C. (2023). The new digital economy and sustainability: challenges and opportunities. *Sustainability*, 15(14), 10902.
- Wang, X., Sun, X., Zhang, H., & Ahmad, M. (2022). Digital Economy and Environmental Quality: Insights from the Spatial Durbin Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16094.
- Xu, L., Dabuo, F. T., Madzikanda, B., & Appiah-Twum, F. (2024). Beyond bits and bytes: Examining the dynamic influence of digital economy on ecological footprint in OECD economies. *Journal of Cleaner Production*, 477, 143590.
- Yu, W., Lan, N., Tan, X., Zhang, S., & Chen, J. (2023). Does the digital economy drive low-carbon urban development? The role of transition to sustainability. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11.