
TÁC ĐỘNG CỦA CÔNG NGHỆ THÔNG TIN TRUYỀN THÔNG (ICT) TỚI PHÁT THẢI CO₂: BẰNG CHỨNG QUỐC TẾ VÀ HÀM Ý CHÍNH SÁCH CHO VIỆT NAM

Lê Hải Trung*

Học viện Ngân hàng

Email: trunglh@hvn.edu.vn

Nhữ Thanh Hương

Công ty cổ phần FiinGroup Việt Nam

Email: nhuthanhhuongpytn@gmail.com

Bùi Thị Lan Anh

Ngân hàng Thương mại Cổ phần Quân Đội

Email: lananh04052004@gmail.com

Nguyễn Thị Hải Anh

Ngân hàng Thương mại Cổ phần Quân Đội

Email: haianhnguyenthi1511@gmail.com

Mã bài báo: JED-2874

Ngày nhận: 27/01/2026

Ngày nhận bản sửa: 06/04/2026; 23/04/2026; 15/05/2026

Ngày duyệt đăng: 15/05/2026

DOI: 10.33301/JED.VI.2874

Tóm tắt:

Nghiên cứu này đánh giá tác động của công nghệ thông tin và truyền thông (ICT) lên phát thải CO₂ trong ngắn hạn và dài hạn bằng dữ liệu bảng của 99 quốc gia giai đoạn 1990-2023. Sử dụng chỉ số ICT tổng hợp xây dựng bằng PCA, kết quả mô hình CS-ARDL cho thấy ICT làm giảm phát thải CO₂ trong ngắn hạn, nhưng làm tăng phát thải trong dài hạn. Kết quả phân tích theo nhóm quốc gia cũng cho thấy mối quan hệ này chỉ có ý nghĩa thống kê ở nhóm quốc gia phát thải cao, trong khi không có ý nghĩa thống kê ở nhóm quốc gia phát thải thấp. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hàm ý rằng phát triển ICT cần được gắn với chuyển dịch năng lượng và xanh hóa hạ tầng số nhằm hạn chế rủi ro gia tăng phát thải trong dài hạn, đặc biệt đối với các nền kinh tế đang phát triển như Việt Nam.

Từ khóa: Phát thải CO₂, mô hình CS-ARDL, công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), tác động ngắn hạn và dài hạn.

Mã JEL: Q53, O33, C33, Q43.

The impact of information and communication technology on the CO₂ emission: International evidence and implications for Vietnam

Abstract:

This study examines the short-run and long-run impacts of information and communication technology (ICT) on CO₂ emissions using panel data for 99 countries over the period 1990–2023. Using an ICT composite index constructed through principal component analysis and the CS-ARDL model, the results reveal that ICT reduces CO₂ emissions in the short run but increases them in the long run. Further group-based analysis indicates that this relationship is statistically significant only among high-emitting countries, while it is statistically insignificant among low-emitting countries. The findings suggest that ICT development should be aligned with energy transition and the greening of digital infrastructure in order to limit the risk of higher emissions in the long run, especially in developing economies such as Vietnam.

Keywords: CO₂ emissions, CS-ARDL model, information and communication technology (ICT), short-run and long-run effects.

JEL codes: Q53, O33, C33, Q43.

1. Giới thiệu

Ô nhiễm không khí gia tăng cùng với suy thoái môi trường đang làm trầm trọng hơn các tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu, ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường tự nhiên và làm gia tăng chi phí kinh tế (Zhao & cộng sự, 2024). Điều này đặt ra thách thức lớn cho các quốc gia trong việc cân bằng giữa tăng trưởng kinh tế và cắt giảm khí thải (Calvet & cộng sự, 2022). Trong bối cảnh đó, cách mạng công nghiệp 4.0 đã thúc đẩy mạnh mẽ quá trình đổi mới công nghệ, đặc biệt là việc ứng dụng công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), được kỳ vọng giúp cải thiện hiệu suất năng lượng và tạo động lực cho quá trình chuyển đổi sang nền kinh tế carbon thấp, từ đó góp phần cải thiện môi trường (Briglaue & cộng sự, 2023).

Mặc dù vậy, các kết quả nghiên cứu thực nghiệm về mối quan hệ giữa ICT và ô nhiễm môi trường chưa thống nhất. Một số nghiên cứu ủng hộ giả thuyết về “hiệu ứng hiệu quả” (*efficiency effect*), hàm ý sự phát triển của ICT giúp thúc đẩy chuyển đổi số nền kinh tế, từ đó cải thiện hiệu quả năng lượng (Lee & cộng sự, 2023), góp phần sản xuất bền vững, tiết kiệm nhiên liệu và giảm phát thải CO₂. Ngược lại, một số nghiên cứu cho rằng ICT mang lại “hiệu ứng phản hồi” (*rebound effect*) đối với môi trường khi phát thải CO₂ có thể gia tăng bởi sự gia tăng đáng kể nhu cầu điện năng cho hạ tầng số, đặc biệt khi nguồn điện phụ thuộc nhiều vào nhiên liệu hóa thạch (Malmodin & cộng sự, 2024). Ngoài ra, sự phát triển của ICT cũng có thể làm gia tăng ô nhiễm môi trường bởi “hiệu ứng mở rộng” (*expansion effect*), khi nhu cầu năng lượng gia tăng, đặc biệt trong các ngành công nghiệp thâm dụng năng lượng (Jin & Yu, 2022). Sự không thống nhất này cho thấy tác động của ICT tới phát thải CO₂ phụ thuộc vào điều kiện môi trường và phát triển của từng quốc gia, cũng như tạo ra các tác động không đồng nhất trong ngắn hạn và dài hạn do sự tương quan giữa các hiệu ứng trái chiều qua thời gian (Wang & cộng sự, 2024).

Nghiên cứu này đánh giá tác động của ICT tới phát thải CO₂ trong ngắn hạn và dài hạn tại 99 quốc gia trên thế giới từ 1990 tới 2023, bằng mô hình tự phân phối hồi quy trễ với dữ liệu dạng bảng chéo (CS-ARDL - Cross-sectional Autoregressive Distributed Lag). Kết quả cho thấy ICT góp phần giảm phát thải CO₂ trong ngắn hạn, nhưng làm gia tăng phát thải trong dài hạn. Bên cạnh đó, nghiên cứu cho thấy rằng tác động khác nhau này chỉ xuất hiện ở nhóm quốc gia phát thải CO₂ cao, trong khi không tìm thấy bằng chứng tương tự ở nhóm quốc gia phát thải thấp. Điều này cho thấy ở các quốc gia phát thải cao, trong đó phần lớn có xu hướng cấu trúc kinh tế thâm dụng công nghiệp và phụ thuộc vào năng lượng hóa thạch như Việt Nam, việc phát triển ICT có thể bước đầu mang lại hiệu ứng hiệu quả nhờ cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng hoặc tối ưu sản xuất. Tuy nhiên, trong dài hạn, hiệu ứng mở rộng quy mô lấn át khi ICT thúc đẩy mở rộng sản xuất, gia tăng năng lượng đi kèm với sự mở rộng của các ngành công nghiệp “nâu”. Kết quả này hàm ý rằng yêu cầu cấp thiết về chính sách theo hướng gắn kết chuyển đổi số với chuyển dịch cơ cấu năng lượng và xanh hóa sản xuất, nhằm hạn chế rủi ro “tái ràng buộc carbon” trong quá trình phát triển ICT.

2. Tổng quan nghiên cứu và giả thuyết nghiên cứu

Công nghệ thông tin và truyền thông (ICT) đóng vai trò cốt lõi trong quá trình chuyển đổi số nền kinh tế (Dobrota & cộng sự, 2012), góp phần cải thiện hiệu quả hoạt động và thông tin truyền thông giữa các doanh nghiệp, chính phủ và xã hội (Tudose & cộng sự, 2023). Về mặt lý thuyết, lý thuyết kinh tế tân cổ điển của Solow (1956) coi ICT và sự phát triển của công nghệ nói chung, đóng vai trò như một yếu tố đầu vào giúp tạo ra giá trị gia tăng của nền kinh tế thông qua sự cải thiện về chất lượng lao động và hiệu quả sản xuất. Các nghiên cứu thực nghiệm cũng ủng hộ điều này khi cho thấy chuyển đổi số giúp gia tăng năng suất lao động (Li & cộng sự, 2022), giảm thiểu chi phí sản xuất (Yoo & Yi, 2022) và thúc đẩy tăng trưởng kinh tế (Lê Hải Trung & cộng sự, 2025). Trên cơ sở đó, một nhóm nghiên cứu cho rằng ICT có thể làm giảm phát thải CO₂ nhờ “hiệu ứng hiệu quả”. Theo Iqbal & cộng sự (2024), việc chuyển dịch hoạt động sang môi trường số giúp cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng, cắt giảm nhu cầu đi lại cũng như tiêu thụ năng lượng hóa thạch, từ đó giảm phát thải CO₂. Bên cạnh đó, ICT còn giúp thúc đẩy chuyển đổi số nền kinh tế, từ đó giảm ô nhiễm môi trường nhờ cải thiện hiệu quả năng lượng (Lee & cộng sự, 2023), thay đổi cách làm việc sang môi trường số giúp giảm nhu cầu đi lại và tiêu thụ năng lượng hóa thạch (Briglaue & cộng sự, 2023), cũng như tăng khả năng ứng dụng các công nghệ xanh (Magazzino & cộng sự, 2021). Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất giả thuyết nghiên cứu sau:

Giả thuyết H1: ICT có tác động làm giảm phát thải CO₂ trong ngắn hạn nhờ nâng cao hiệu quả năng lượng và tối ưu hóa hoạt động kinh tế.

Ngược lại, một số nghiên cứu cho rằng tác động của ICT tới phát thải CO₂ không tuyến tính theo thời gian mà có sự không đồng nhất trong ngắn hạn và dài hạn. Wen & cộng sự (2022) chỉ ra rằng việc sản xuất và vận hành các cấu phần của hệ thống ICT như trung tâm dữ liệu, thiết bị viễn thông dẫn tới sự gia tăng của nhu cầu điện năng và nguyên liệu, từ đó trực tiếp làm tăng phát thải CO₂. Jin & Yu (2022) chỉ ra rằng ICT có tác động tiêu cực tới ô nhiễm môi trường tại Trung Quốc do các ngành công nghiệp thâm dụng năng lượng mở rộng sản xuất nhờ những cải tiến trong hiệu quả sản xuất. Tương tự, Peng & Qin (2024) cho rằng số hóa nhờ ICT làm tăng hiệu ứng phản hồi ở việc gia tăng năng lượng đồng thời, và hiệu ứng này có xu hướng gia tăng theo thời gian. Bên cạnh đó, hiệu ứng phản hồi cũng có thể làm đảo ngược lợi ích môi trường của ICT khi hiệu suất năng lượng gia tăng kèm theo giảm chi phí sử dụng, khiến người dùng có xu hướng tăng cường hoạt động tiêu dùng và làm gia tăng nhu cầu năng lượng (Jin & Yu, 2022). Ví dụ, theo Gillingham & cộng sự (2016), cải tiến hiệu suất do ICT mang lại sẽ kích thích người dân đi lại thường xuyên hơn, làm giảm phần tiết kiệm năng lượng ròng. Briglauer & cộng sự (2023) cũng nhấn mạnh rằng các sản phẩm số với vòng đời ngắn khi ICT phát triển nhanh có thể tạo ra hiệu ứng lỗi thời, làm gia tăng phát thải từ khâu xử lý rác thải điện tử cũng như sản xuất sản phẩm thay thế. Từ những lập luận trên, nghiên cứu đề xuất giả thuyết nghiên cứu sau:

Giả thuyết H2: ICT có tác động làm tăng phát thải CO₂ trong dài hạn, do hiệu ứng quy mô và hiệu ứng phản hồi/hạ tầng số lấn át lợi ích hiệu quả ban đầu.

Nghiên cứu này sẽ đóng góp thêm bằng chứng thực nghiệm về tác động của ICT tới ô nhiễm môi trường, sử dụng dữ liệu từ 99 quốc gia giai đoạn 1990-2023 trong cả ngắn hạn và dài hạn. Đặc biệt, thay vì sử dụng các chỉ số thành phần ICT như các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu này xây dựng một chỉ số ICT tổng hợp bằng phân tích thành phần chính (PCA) nhằm tổng hợp thông tin từ nhiều biến quan sát và giảm chiều dữ liệu. Đồng thời, để đánh giá sự khác biệt tiềm tàng trong mối quan hệ của ICT với các quốc gia, nghiên cứu thực hiện phân tích riêng biệt cho nhóm quốc gia có mức độ phát thải CO₂ khác nhau.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Mô hình hồi quy

Tác động của ICT đến phát thải CO₂ được đánh giá thông qua mô hình sau:

$$CO_{2it} = \alpha_i + X'_{it}\beta + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Trong đó: CO₂ là giá trị logarithm của lượng phát thải CO₂ trên đầu người của từng quốc gia; β là các hệ số hồi quy, α_i là biến hiệu ứng cố định theo quốc gia, ε_{it} là phần dư của mô hình; và X_{it} là vector các biến giải thích.

Biến giải thích chính của mô hình này là biến ICT, được xây dựng từ phương pháp phân tích thành phần chính (PCA) từ bốn thành phần của ICT, kế thừa từ nghiên cứu của Pu & cộng sự (2024), bao gồm: tỷ lệ người dùng Internet (%), số thuê bao băng thông rộng cố định (trên 100 người), số thuê bao di động cố định (trên 100 người) và tỷ lệ hàng hóa ICT trên tổng hàng hóa nhập khẩu (%). Việc sử dụng PCA giúp tổng hợp thông tin chung từ các biến thành phần của ICT và giảm chiều dữ liệu trong phân tích thực nghiệm. Ngoài ra, nghiên cứu bổ sung một nhóm các biến kiểm soát. Thứ nhất là thu nhập bình quân đầu người (GDPpc), đại diện cho tăng trưởng kinh tế và phản ánh hiệu ứng quy mô của hoạt động kinh tế đối với phát thải CO₂. Sự gia tăng thu nhập có thể đi kèm với mở rộng sản xuất, gia tăng nhu cầu năng lượng và phát thải. Bên cạnh đó, thu nhập tăng cũng có thể tạo điều kiện cho đổi mới công nghệ và cải thiện hiệu quả môi trường, từ đó giúp giảm phát thải CO₂. Thứ hai là tỷ lệ tín dụng nội địa trên GDP, thể hiện cho độ sâu của hệ thống tài chính quốc gia, phản ánh nguồn lực tài chính mà hệ thống tài chính cung ứng cho khu vực tư nhân, đại diện cho mức độ phát triển tài chính (FD) (Petrović & Lobanov, 2022). Trong khi, Lv & Li (2021) tìm thấy bằng chứng cho thấy mức độ phát triển tài chính đóng vai trò quan trọng giúp giảm thiểu CO₂ không chỉ tại quốc gia đó mà cả quốc gia lân cận. Tuy nhiên, Jiang & Ma (2019) lại tìm thấy bằng chứng cho thấy phát triển tài

chính làm gia tăng phát thải CO₂ do hiệu ứng mở rộng sản xuất nhờ khả năng tiếp cận tài chính. Thứ ba là độ mở thương mại (TRADE), đo lường thông qua kim ngạch xuất nhập khẩu trên GDP. Nghiên cứu của Dauda & cộng sự (2021) cho thấy mở rộng thương mại giúp cải thiện quá trình chuyển giao các công nghệ thân thiện với môi trường, nhưng cũng có thể làm tăng ô nhiễm nếu các quốc gia có quy định môi trường lỏng lẻo, thu hút các công ty gây ô nhiễm. Cuối cùng là chỉ số mật độ dân số (POPI), xác định số người trên mỗi km² diện tích đất. Abdouli & cộng sự (2018) nhận định mật độ dân số cao ban đầu có xu hướng làm gia tăng phát thải CO₂, tuy nhiên tác động này suy giảm sau khi vượt qua một ngưỡng nhất định, cho thấy mối quan hệ chữ U ngược khi áp lực đô thị hóa buộc chính phủ thực hiện cơ chế hiệu quả đô thị và bảo vệ môi trường.

3.2. Mô hình nghiên cứu

Trong bối cảnh bộ dữ liệu bao quát giai đoạn dài 1990-2023, nhiều cú sốc lớn mang tính toàn cầu như các cuộc khủng hoảng kinh tế và đại dịch COVID-19 có thể đồng thời ảnh hưởng tới nhiều quốc gia, qua đó tạo ra hiện tượng phụ thuộc chéo trong dữ liệu bảng. Do đó, để phát hiện các cú sốc chung không quan sát được giữa các quốc gia, nghiên cứu thực hiện đánh giá sự phụ thuộc chéo thông qua kiểm định của Pesaran (2015). Kiểm định này được xác định thông qua trung bình các hệ số tương quan cặp giữa phần dư từ hồi quy Augmented Dickey-Fuller (ADF) riêng cho từng đơn vị chéo:

$$CD = \frac{\sqrt{2T}}{\sqrt{N(N-1)}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \widehat{\rho}_{ij} \right) \rightarrow Norm(0,1) \quad (2)$$

Trong đó:

$\widehat{\rho}_{ij}$ là hệ số tương quan phần dư giữa hai đơn vị i và j ;

T là chiều thời gian và N là chiều không gian của bộ dữ liệu bảng.

Tiếp theo, nghiên cứu sử dụng kiểm định nghiệm đơn vị thế hệ thứ hai CIPS của Pesaran (2007) với các biến trong bối cảnh tồn tại phụ thuộc chéo giữa các quốc gia trong bộ dữ liệu. Phương pháp này dựa trên việc mở rộng kiểm định ADF truyền thống thông qua quy trình hồi quy CADF (Cross-sectionally Augmented Dickey-Fuller), bằng cách bổ sung trung bình chéo của các biến ở dạng trễ và sai phân bậc nhất để kiểm soát các yếu tố chung không quan sát được:

$$\Delta y_{i,t} = \alpha_i + \rho_i y_{i,t-1} + \beta_i \bar{y}_{t-1} + d_i \Delta \bar{y}_t + \sum_{j=1}^k \delta_{i,j} \Delta y_{i,t-1} + \sum_{j=0}^k \gamma_{i,j} \Delta \bar{y}_{t-j} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Trong đó:

$\bar{y}_t$ và $\Delta \bar{y}_t$ là trung bình chéo của biến trễ và sai phân trễ của tất cả các đơn vị tại thời điểm t ;

k là độ trễ tối ưu được xác định theo tiêu chuẩn AIC

Giá trị thống kê CIPS tổng hợp cho toàn bộ bảng dữ liệu được tính như sau:

$$\widehat{CIPS} = N^{-1} \sum_{i=1}^N CADF_i \quad (4)$$

Trong đó:

$CADF_i$ là thống kê t tương ứng với hệ số ρ_i từ phương trình (3).

Tiếp theo, nghiên cứu áp dụng kiểm định đồng liên kết dựa trên mô hình hiệu chỉnh sai số (ECM) của Westerlund (2007) để xác định mối quan hệ dài hạn giữa các biến dựa trên mô hình hiệu chỉnh sai số (ECM) như sau:

$$\Delta Y_{i,t} = \alpha_i + \delta_i t + \phi_i (Y_{i,t-1} - \beta_i X_{i,t-1}) + \sum_{j=1}^{p_i} \gamma_{i,j} \Delta Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q_i} \theta_{i,j} \Delta X_{i,t-j} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

Trong đó:

ϕ_i là hệ số phản ánh tốc độ điều chỉnh; nếu $\phi_i < 0$ và có ý nghĩa thống kê thì mô hình tồn tại đồng liên kết giữa các biến;

β_i là vector tham số phản ánh mối quan hệ dài hạn giữa Y và X

Để phân tích tác động trong ngắn hạn và dài hạn của ICT đến phát thải CO₂, nghiên cứu sử dụng mô hình CS-ARDL (Cross-Sectionally Augmented ARDL) được phát triển bởi Chudik & Pesaran (2015). Phương pháp này bổ sung các trung bình chéo của biến phụ thuộc và các biến giải thích nhằm hấp thụ các nhân tố chung không quan sát được và giảm thiểu sai lệch ước lượng do các cú sốc lan tỏa toàn cầu, qua đó đảm bảo tính vững đối với dữ liệu dạng bảng tồn tại hiện tượng phụ thuộc chéo và tính không đồng nhất giữa các đơn vị quan sát. Đồng thời, cấu trúc CS-ARDL cho phép ước lượng các hệ số trong ngắn hạn và dài hạn một cách nhất quán ngay cả khi các biến có bậc tích hợp khác nhau (hỗn hợp I(0) và I(1)). Dạng tổng quát của mô hình CS-ARDL được Chudik & Pesaran (2015) phát triển có dạng như sau:

$$\Delta Y_{i,t} = \varphi_i(Y_{i,t-1} - \theta_i' X_{i,t-1}) + \sum_{j=1}^{p-1} \lambda_{i,j} \Delta Y_{i,t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta_{i,j}' \Delta X_{i,t-j} + \sum_{j=0}^m \psi_{i,j}' \Delta \bar{Z}_{t-j} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

Trong đó:

Y_{it} là biến phụ thuộc phát thải CO₂;

X_{it} là vector các biến giải thích và biến kiểm soát;

$\bar{Z}_{t-j} = (\bar{Y}_{t-j}, \bar{X}_{t-j})'$ là vector chứa trung bình chéo của biến phụ thuộc và các biến giải thích tại thời điểm t-j;

φ_i là hệ số hiệu chỉnh sai số

p, q là độ trễ của biến phụ thuộc và biến giải thích

Từ phương trình (6), tác động ngắn hạn của ICT được xác định thông qua các hệ số đi kèm với biến ICT ở dạng sai phân bậc nhất, tức $\Delta \text{ICT}_{i,t-j}$. Các hệ số này phản ánh mức thay đổi tức thời của phát thải CO₂ khi ICT biến động trong ngắn hạn. Trong khi đó, tác động dài hạn của ICT được phản ánh bởi hệ số θ_i' trong thành phần hiệu chỉnh sai số ($Y_{i,t-1} - \theta_i' X_{i,t-1}$), thể hiện mối quan hệ cân bằng dài hạn giữa phát thải CO₂ và các biến giải thích. Do đó, nghiên cứu này sử dụng mô hình CS-ARDL để nhận diện sự khác biệt giữa tác động ngắn hạn và dài hạn của ICT đối với phát thải CO₂.

4. Kết quả nghiên cứu

4.1. Dữ liệu nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu bảng từ 99 quốc gia trên thế giới giai đoạn 1990-2023. Việc lựa chọn các quốc gia được thực hiện dựa trên mức độ sẵn có của dữ liệu. Các biến sử dụng trong mô hình đều được thu thập từ cơ sở dữ liệu WDI (World Development Indicators). Thống kê mô tả của các biến trình bày trong Bảng 1 cho thấy tính không đồng nhất lớn giữa các quốc gia. Cụ thể, mức độ phát thải CO₂ bình quân ở mức 0,881 và có biên độ dao động lớn giữa các quốc gia với giá trị nhỏ nhất là -3,829 và giá trị lớn nhất là 5,899. Tương tự, biến ICT cũng có mức độ biến động cao với giá trị độ lệch chuẩn ở mức 1,609. Các biến kiểm soát cũng cho thấy giá trị phân tán giữa các quốc gia. Đồng thời, giá trị hệ số bất đối xứng và độ nhọn trong phân phối cho thấy các biến trong mô hình đều không tuân theo phân phối chuẩn.

Bảng 2 thể hiện kết quả kiểm định phụ thuộc chéo theo kiểm định của Pesaran (2015). Giả thuyết H₀ bị

Bảng 1. Thống kê mô tả

Biến	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất	Độ chệch	Độ nhọn
lnCO ₂	0,881	1,609	-3,829	5,899	-0,684	2,785
ICT	0,000	1,609	-1,587	5,090	0,655	2,054
lnGDP	9,575	1,222	6,236	11,889	-0,422	2,227
lnFD	3,694	0,933	0,756	5,719	-0,383	2,474
lnTRADE	4,261	0,565	2,621	6,093	0,338	3,415
lnPOPI	4,361	1,485	0,639	9,017	0,048	3,678

Nguồn: Tính toán của nhóm tác giả.

Bảng 2. Kiểm định phụ thuộc chéo và tính dừng của dữ liệu

Variable	Cross-sectional Dependence Test	CIPS Unit-root Test		
		Level	First Difference	Inference
lnCO ₂	19,54***	-2,459	-5,449***	I(1)
ICT	383,03***	-1,883	-4,175***	I(1)
lnGDP	273,18***	-2,504	-4,323***	I(1)
lnFD	129,49***	-2,392	-4,703***	I(1)
lnTRADE	106,07***	-2,779***	-5,134***	I(0)
lnPOPI	278,88***	-2,349	-3,064***	I(1)

CD là giá trị kiểm định phụ thuộc chéo của kiểm định Pesaran (2015); CIPS là giá trị của kiểm định tính dừng thể hệ thứ hai của Pesaran (2007). ***, ** và * thể hiện mức ý nghĩa thống kê lần lượt 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tính toán của nhóm tác giả.

Bảng 3. Kết quả kiểm định đồng liên kết của dữ liệu bảng

Kiểm định đồng liên kết ECM của Westerlund (2007)				
H_0 = Không tồn tại đồng liên kết				
Giá trị	$CO_2 = f(ICT, GDP, FD, TRADE, POPI)$			
	Giá trị kiểm định nhóm		Giá trị kiểm định bảng	
	G_t	G_a	P_t	P_a
Giá trị	-3,889	-9,503	-35,951	-10,848
Z-value	-9,454	10,535	-8,267	5,330
Robust P-value	0,000	1,000	0,000	1,000

G_t và G_a là giá trị kiểm định bình quân nhóm, P_t và P_a là giá trị bình quân bảng. Z-values là giá trị kiểm định chuẩn hóa. Robust P-value là giá trị p-value được tính toán bằng phương pháp bootstrapping. ***, ** và * thể hiện mức ý nghĩa thống kê lần lượt 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tính toán của nhóm tác giả.

bác bỏ ở tất cả các biến ở mức tin cậy 1%, cho thấy tồn tại phụ thuộc chéo trong dữ liệu. Điều này cho thấy sự cần thiết phải sử dụng kiểm định tính dừng thể hệ thứ hai của Pesaran (2007). Kết quả cho thấy ngoại trừ biến TRADE là chuỗi dừng ở bậc cơ sở I(0), các biến còn lại như CO₂, ICT, GDP, FD và POPI đều dừng ở bậc sai phân thứ nhất I(1).

Bảng 3 thể hiện kết quả kiểm định đồng liên kết của Westerlund (2007). Kết quả cho thấy các thống kê G_t và P_t có giá trị p-value cho phép bác bỏ giả thuyết H_0 ở mức ý nghĩa 1%, hàm ý rằng tồn tại mối quan hệ đồng liên kết dài hạn giữa CO₂ và các biến giải thích trong mô hình.

Bảng 4 trình bày kết quả mô hình đánh giá tác động của ICT tới phát thải CO₂ trong ngắn hạn (Bảng 4A) và dài hạn (Bảng 4B). Kết quả cho thấy ICT có tác động khác biệt giữa ngắn hạn và dài hạn đối với ô nhiễm không khí. Cụ thể, ICT giúp giảm phát thải CO₂ trong ngắn hạn nhưng lại làm gia tăng ô nhiễm không khí trong dài hạn. Về các biến kiểm soát, GDP và TRADE làm tăng phát thải CO₂ trong cả ngắn hạn và dài hạn, trong đó tác động của GDP có ý nghĩa thống kê cao, phản ánh sự thâm dụng năng lượng trong quá trình tăng trưởng tác động tiêu cực lên môi trường. Đáng chú ý, mặc dù POPI không có ý nghĩa trong ngắn hạn, biến này lại có tác động tiêu cực tới phát thải CO₂ trong dài hạn. Phát hiện này phù hợp với kết quả của Abdouli & cộng sự (2018) rằng sau giai đoạn đầu làm tăng nhu cầu tiêu dùng, mật độ dân số sẽ thúc đẩy các cơ chế bảo vệ môi trường và chuyển dịch cơ cấu theo hướng bền vững. Do giai đoạn nghiên cứu bao hàm nhiều

cú sốc toàn cầu lớn có thể ảnh hưởng tới phát thải CO₂ như như khủng hoảng tài chính toàn cầu và đại dịch COVID-19, nhóm tác giả thực hiện kiểm định tính vững bằng cách bổ sung các biến giả năm sự kiện cho khủng hoảng tài chính toàn cầu và đại dịch COVID-19 vào phương trình ngắn hạn của mô hình. Các biến này không được đưa vào quan hệ dài hạn vì phản ánh các cú sốc tạm thời theo thời kỳ. Kết quả chính không thay đổi về dấu và ý nghĩa trong tác động của ICT tới phát thải CO₂ trong ngắn hạn và dài hạn.¹

Bảng 4. Kết quả hồi quy mô hình CS-ARDL

Biến	Biến phụ thuộc: lnCO ₂	
	Hệ số hồi quy	Sai số chuẩn
Bảng 4A: Phương trình hồi quy ngắn hạn		
Δ ICT	-0,070**	0,032
Δ lnGDP	0,283***	0,088
Δ lnFD	-0,009	0,029
Δ lnTRADE	0,048*	0,026
Δ lnPOPI	3,234	2,200
Bảng 4B: Phương trình hồi quy dài hạn		
Hệ số hiệu chỉnh dài hạn	-1,842***	0,029
ICT	0,086***	0,028
lnGDP	0,199***	0,061
lnFD	0,005	0,020
lnTRADE	0,022	0,026
lnPOPI	-0,482**	0,227

Bảng thể hiện kết quả mô hình hồi quy CS-ARDL. Bảng A thể hiện các hệ số hồi quy cho tác động ngắn hạn, trong khi bảng B thể hiện các hệ số hồi quy của tác động dài hạn tới biến phụ thuộc. ***, ** và * thể hiện mức ý nghĩa thống kê lần lượt 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tính toán của tác giả.

Nhóm tác giả tiến hành phân tích nhóm quốc gia bằng việc chia mẫu nghiên cứu thành hai nhóm dựa trên phân vị mức phát thải CO₂ bình quân, bao gồm nhóm phát thải cao (30% cao nhất) và nhóm phát thải thấp (30% thấp nhất). Kết quả hồi quy ở Bảng 5 cho thấy các phát hiện tương đồng với ước lượng tại mô hình gốc ở nhóm quốc gia phát thải cao. Cụ thể, ICT có tác động âm tới phát thải CO₂ trong ngắn hạn nhưng lại góp phần gia tăng ô nhiễm trong dài hạn. Ngược lại, tại nhóm quốc gia phát thải thấp, các hệ số hồi quy của ICT đều không có ý nghĩa thống kê ở cả hai kỳ hạn. Kết quả này cho thấy mối quan hệ khác nhau trong ngắn hạn và dài hạn giữa ICT và CO₂ chỉ tồn tại ở các nền kinh tế có cường độ phát thải cao.

4.2. Thảo luận kết quả

Kết quả thực nghiệm cho thấy ICT có tác động khác biệt giữa ngắn hạn và dài hạn đối với phát thải CO₂. Cụ thể, ICT góp phần giảm phát thải CO₂ trong ngắn hạn, phù hợp với các bằng chứng gần đây của Li & cộng sự (2025). Kết quả này cho thấy trong ngắn hạn, hiệu ứng hiệu quả chiếm ưu thế khi ICT giúp tối ưu hóa hoạt động sản xuất và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng. Bên cạnh đó, phát triển ICT cũng giúp đẩy nhanh tiến trình số hóa trong hoạt động kinh doanh, thúc đẩy thay đổi hành vi sản xuất, nâng cao năng suất lao động (Li & cộng sự, 2022), giúp các doanh nghiệp cải thiện phân bổ nguồn lực và thúc đẩy hiệu quả sử dụng tài nguyên (Alsedrah, 2024) cũng như trực tiếp cắt giảm nhu cầu di chuyển và tiêu thụ vật liệu ở một số hoạt động kinh tế (Briglauer & cộng sự, 2023). Wang & Su (2019) chỉ ra rằng sự phát triển ICT có thể thúc đẩy đầu tư hạ tầng và đặc biệt là đổi mới công nghệ xanh, qua đó hỗ trợ xu hướng tách rời tăng trưởng khỏi phát thải trong ngắn hạn.

Tuy nhiên, trong dài hạn, ICT lại có xu hướng làm phát thải CO₂ gia tăng trở lại, cho thấy sự lấn át của hiệu ứng quy mô và hiệu ứng phản hồi đối với các lợi ích hiệu quả trong ngắn hạn. Sự phát triển của ICT giúp mở rộng sản xuất và tiêu dùng nhờ chi phí thông tin giảm và năng lực kết nối hạ tầng gia tăng, đồng thời cũng kéo theo sự gia tăng của nhu cầu năng lượng và mức độ phát thải CO₂ (Jin & Yu, 2022; Li & cộng sự, 2025). Đồng thời, sự phát triển ICT gắn với việc mở rộng hạ tầng số (mạng viễn thông, trung tâm dữ

Bảng 5. Kết quả hồi quy CS-ARDL mở rộng giữa các nhóm quốc gia

Biến phụ thuộc: $\ln CO_2$				
	Nhóm quốc gia phát thải cao		Nhóm quốc gia phát thải thấp	
Biến	Hệ số hồi quy	Sai số chuẩn	Hệ số hồi quy	Sai số chuẩn
Bảng A: Phương trình hồi quy ngắn hạn				
ΔICT	-0,120**	0,047	0,146	0,122
$\Delta \ln GDP$	-0,159	0,214	0,169	0,234
$\Delta \ln FD$	-0,041	0,135	-0,007	0,077
$\Delta \ln TRADE$	0,096	0,088	0,213*	0,115
$\Delta \ln POPI$	-0,270	2,255	2,456	7,172
Bảng B: Phương trình hồi quy dài hạn				
Hệ số hiệu chỉnh dài hạn	-1,843***	0,072	-1,838***	0,057
ICT	0,066**	0,033	0,028	0,123
$\ln GDP$	0,329**	0,134	0,189	0,209
$\ln FD$	0,025	0,070	0,010	0,056
$\ln TRADE$	-0,161**	0,060	-0,128*	0,075
$\ln POPI$	-1,102*	0,658	-0,001	0,264

Bảng thể hiện kết quả mô hình hồi quy CS-ARDL cho nhóm quốc gia có phát thải cao và phát thải thấp. Bảng A thể hiện các hệ số hồi quy cho tác động ngắn hạn, trong khi bảng B thể hiện các hệ số hồi quy của tác động dài hạn tới biến phụ thuộc. ***, ** và * thể hiện mức ý nghĩa thống kê lần lượt 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tính toán của nhóm tác giả.

liệu, thiết bị đầu cuối) và chu kỳ thay thế công nghệ nhanh, làm gia tăng tiêu thụ điện và phát thải gián tiếp (Briglaue & cộng sự, 2023). Ngoài ra, sự mở rộng của kinh tế số còn tiềm ẩn nguy cơ đẩy nhanh quá trình cạn kiệt các nguồn tài nguyên thiên nhiên vốn đã khan hiếm, tác động tiêu cực tới môi trường (Zia & cộng sự, 2024). Như vậy, ICT có thể tạo ra lợi ích môi trường trong giai đoạn đầu thông qua tối ưu hóa, nhưng về lâu dài lại làm tăng CO_2 khi hiệu ứng mở rộng quy mô và nhu cầu năng lượng của hệ sinh thái số trở nên chi phối.

Kết quả của mô hình hồi quy phân nhóm cho thấy tác động khác nhau trong ngắn hạn và dài hạn giữa ICT và CO_2 chỉ được ghi nhận tại nhóm quốc gia phát thải cao. Điều này củng cố nghiên cứu của Peng & Qin (2024), hàm ý tác động môi trường của ICT phụ thuộc vào điều kiện ban đầu và bối cảnh của mỗi quốc gia. Ở các quốc gia phát thải cao, thường là các nền kinh tế đang phát triển với mô hình kinh tế dựa nhiều trên sản xuất, công nghiệp và năng lượng hóa thạch, ICT có thể nhanh chóng mang lại hiệu ứng hiệu quả nhờ dự địa cải thiện hiệu quả ban đầu lớn, giúp giảm lãng phí năng lượng và tối ưu hóa vận hành. Tuy nhiên, trong dài hạn, sự phát triển của ICT thúc đẩy mở rộng các ngành tiêu thụ năng lượng cao và gia tăng nhu cầu điện cho hạ tầng số, khiến hiệu ứng quy mô và phản hồi lấn át lợi ích ban đầu. Ngược lại, ở các quốc gia phát thải thấp, là các quốc gia nơi hiệu quả năng lượng đã ở mức tương đối cao thì biên lợi ích giảm phát thải từ ICT bị hạn chế, dẫn đến tác động của ICT tới phát thải CO_2 không đáng kể.

5. Kết luận và khuyến nghị

Nghiên cứu này đánh giá tác động qua thời gian của công nghệ thông tin và truyền thông (ICT) tới phát thải CO_2 tại 99 quốc gia trong giai đoạn 1990-2023 thông qua mô hình CS-ARDL. Kết quả thực nghiệm cho thấy ICT có xu hướng làm giảm phát thải CO_2 trong ngắn hạn, thông qua việc tối ưu hóa quy trình vận hành, nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, phù hợp với giả thuyết “hiệu ứng hiệu quả” của sự phát triển công nghệ và số hóa hoạt động kinh tế. Tuy nhiên, trong dài hạn, ICT lại cho thấy tác động ngược chiều khi làm gia tăng phát thải CO_2 , hàm ý rằng lợi ích hiệu quả ban đầu bị lấn át bởi hiệu ứng quy mô và hiệu ứng phản hồi qua thời gian. Cụ thể, ICT thúc đẩy mở rộng hoạt động kinh tế, gia tăng nhu cầu tiêu dùng và sản xuất, qua đó làm tăng tiêu thụ điện năng và phát thải gián tiếp. Bên cạnh đó, tác động khác nhau trong ngắn hạn và dài hạn của ICT tới phát thải CO_2 chủ yếu xuất hiện ở nhóm quốc gia phát thải CO_2 cao. Kết quả này nhấn

manh sự khác biệt trong tác động của ICT tới phát thải CO₂ giữa các quốc gia với đặc điểm khác nhau. Tại các quốc gia phát thải cao với cơ cấu sản xuất thâm dụng năng lượng, ICT có thể nhanh chóng đem lại hiệu quả giảm phát thải trong ngắn hạn; song về dài hạn, nếu ICT phát triển đồng thời với mở rộng công nghiệp “nâu” và nhu cầu năng lượng tăng nhanh, hiệu ứng quy mô sẽ chi phối, khiến phát thải gia tăng trở lại.

Trên cơ sở các phát hiện nêu trên, nghiên cứu đề xuất một số hàm ý chính sách. Thứ nhất, các quốc gia cần gắn chiến lược phát triển ICT với mục tiêu giảm phát thải, thông qua tiêu chuẩn về hiệu suất năng lượng cho ICT. Thứ hai, các quốc gia cần chú trọng định hướng phát triển ICT đối với các lĩnh vực như tối ưu hệ thống năng lượng, sản xuất thông minh, logistics, đô thị thông minh. Đồng thời, các quốc gia kiểm soát rủi ro phát thải do mở rộng quy mô bằng cơ chế giám sát mức độ phát thải carbon cũng như cơ chế định giá carbon và thị trường tín chỉ carbon để đảm bảo việc mở rộng sản xuất đi kèm với tiêu chuẩn bền vững nền kinh tế. Thứ ba, đối với nhóm quốc gia phát thải cao, phát triển ICT cần kết hợp với chuyển dịch cơ cấu năng lượng, hạn chế mở rộng các ngành thâm dụng carbon, và thúc đẩy ứng dụng ICT trong nâng cao hiệu quả năng lượng của các ngành “nâu”. Những khuyến nghị trên có thể mang giá trị tham khảo đối với Việt Nam, một nền kinh tế đang phát triển có một số đặc điểm tương đồng với nhóm quốc gia phát thải cao, như cơ cấu sản xuất còn tương đối thâm dụng năng lượng và phụ thuộc đáng kể vào nhiên liệu hóa thạch. Theo đó, Việt Nam phát triển ICT cần gắn với mục tiêu nâng cao hiệu quả năng lượng, gắn với lộ trình, mục tiêu giảm phát thải và ổn định năng lượng trong các chiến lược dài hạn quốc gia như Quy hoạch điện VIII (PDP8, Quyết định 500/QĐ-TTg và các điều chỉnh 2025) và Chiến lược Tăng trưởng xanh (thể hiện qua QĐ 1658/2021/QĐ-TTg và Kế hoạch hành động QĐ 882/QĐ-TTg). Cụ thể, Việt Nam cần (i) tích hợp các chỉ tiêu định lượng về đóng góp của ICT vào tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải trong các chiến lược này; (ii) thiết lập cơ chế phối hợp liên ngành giữa lĩnh vực ICT và năng lượng trong triển khai chính sách; và (iii) xây dựng hệ thống giám sát, đánh giá dựa trên dữ liệu số để theo dõi hiệu quả thực thi. Điều này giúp đảm bảo ICT hỗ trợ mục tiêu trung hòa carbon thay vì bị “đào chiều” trong dài hạn do hiệu ứng quy mô, làm gia tăng cường độ phát thải CO₂.

Ghi chú:

1. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn ý kiến góp ý của phản biện về kiểm định này. Do giới hạn về độ dài của bài viết, kết quả của mô hình kiểm định tính vững này sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Tài liệu tham khảo

- Abdoul, M., Kamoun, O. & Hamdi, B. (2018). The impact of economic growth, population density, and FDI inflows on CO_2 emissions in BRICs countries: Does the Kuznets curve exist?. *Empirical Economics*, 54(4), 1717-1742. <https://doi.org/10.1007/s00181-017-1263-0>
- Alsedrah, I.T. (2024). Fintech and green finance revolutionizing carbon emission reduction through green energy projects in mineral-rich countries. *Resources Policy*, 94, 105064. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105064>
- Briglaue, W., Köppl-Turyna, M., Schwarzbauer, W. & Bittó, V. (2023). Evaluating the effects of ICT core elements on CO₂ emissions: Recent evidence from OECD countries. *Telecommunications Policy*, 47(8), 102581. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102581>
- Calvet, L., Gianfrate, G. & Uppal, R. (2022). The finance of climate change. *Journal of Corporate Finance*, 73, 102162. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2022.102162>
- Chudik, A. & Pesaran, M.H. (2015). Common correlated effects estimation of heterogeneous dynamic panel data models with weakly exogenous regressors. *Journal of Econometrics*, 188(2), 393-420. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.03.007>
- Dauda, L., Long, X., Mensah, C.N., Salman, M., Boamah, K.B., Ampon-Wireko, S. & Kofi Dogbe, C.S. (2021). Innovation, trade openness and CO₂ emissions in selected countries in Africa. *Journal of Cleaner Production*,

281, 125143. <https://doi.org/10.1016/j.jelepro.2020.125143>

- Dobrota, M., Veljko, J. & Aleksandar, M. (2012). A new perspective on the ICT Development Index. *Information Development*, 28(4), 271-280. <https://doi.org/10.1177/0266666912446497>
- Gillingham, K., Rapson, D. & Wagner, G. (2016). The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1). <https://doi.org/10.1093/reep/rev017>
- Iqbal, K., Hassan, S.T., Geng, Y. & Cai, C. (2024). Impact of Green Technological Innovations, ICT, and Renewable Energy on CO2 Emissions in Emerging Economies. *International Journal of Energy Research*, 2024(1), 5594324. <https://doi.org/10.1155/er/5594324>
- Jiang, C. & Ma, X. (2019). The Impact of Financial Development on Carbon Emissions: A Global Perspective. *Sustainability*, 11(19), 5241. <https://doi.org/10.3390/su11195241>
- Jin, X. & Yu, W. (2022). Information and communication technology and carbon emissions in China: The rebound effect of energy intensive industry. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 731-742. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.004>
- Lee, H., Tang, C., Yang, S.A. & Zhang, Y. (2023). Dynamic Trade Finance in the Presence of Information Frictions and FinTech. *Manufacturing & Service Operations Management*, 25(6), 2038-2055. <https://doi.org/10.1287/msom.2022.1102>
- Lê Hải Trung, Trần Trung Dũng, Lương Minh Hương & Lê Minh Thúy (2025). Tác động của chuyển đổi số tới tăng trưởng kinh tế địa phương tại Việt Nam. *Tạp chí Kinh tế và Phát triển*, 332, 22-31. <https://doi.org/10.33301/JED.VI.2045>
- Li, N., Wang, X., Wang, Z. & Luan, X. (2022). The impact of digital transformation on corporate total factor productivity. *Frontiers in Psychology*, 13, 1071986. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1071986>
- Li, R., Zhang, S., Wang, Q. & Hu, S. (2025). Fintech and urban environmental sustainability: Exploring the impact of financial technology on urban carbon emissions. *Sustainable Development*, 33(2), 2118-2136. <https://doi.org/10.1002/sd.3212>
- Lv, Z. & Li, S. (2021). How financial development affects CO2 emissions: A spatial econometric analysis. *Journal of Environmental Management*, 277, 111397. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111397>
- Magazzino, C., Porri, D., Fusco, G. & Schneider, N. (2021). Investigating the link among ICT, electricity consumption, air pollution, and economic growth in EU countries. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(11-12), 976-998. <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1868622>
- Malmödin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P. & Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 48(3), 102701. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102701>
- Peng, H.R. & Qin, X.F. (2024). Digitalization as a trigger for a rebound effect of electricity use. *Energy*, 300, 131585. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131585>
- Pesaran, M.H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of Applied Econometrics*, 22, 265-312. <https://doi.org/10.1002/jae.951>
- Pesaran, M.H. (2015). Testing Weak Cross-Sectional Dependence in Large Panels. *Econometric Reviews*, 34(6-10), 1089-1117. <https://doi.org/10.1080/07474938.2014.956623>
- Petrović, P. & Lobanov, M.M. (2022). Impact of financial development on CO2 emissions: Improved empirical results. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 6655-6675. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01721-5>
- Pu, G., Wong, W.K., Du, Q., Al Shraah, A., Alromaihi, A. & Muda, I. (2024). Asymmetric impact of natural resources, fintech, and digital banking on climate change and environmental sustainability in BRICS countries. *Resources Policy*, 91, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104872>
- Solow, R.M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <http://www.jstor.org/stable/1884513>
- Tudose, M.B., Georgescu, A. & Avasilcăi, S. (2023). Global Analysis Regarding the Impact of Digital Transformation on Macroeconomic Outcomes. *Sustainability*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15054583>
- Wang, Q. & Su, M. (2019). The effects of urbanization and industrialization on decoupling economic growth from carbon emission – A case study of China. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101758>

- Wang, Q., Sun, J., Pata, U.K., Li, R. & Kartal, M.T. (2024). Digital economy and carbon dioxide emissions: Examining the role of threshold variables. *Geoscience Frontiers*, 15(3), 101644. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101644>
- Wen, Y., Shabbir, M.S., Haseeb, M., Kamal, M., Anwar, A., Khan, M.F. & Malik, S. (2022). The dynamic effect of information and communication technology and renewable energy on CO2 emission: Fresh evidence from panel quantile regression. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 953035. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.953035>
- Westerlund, J. (2007). Testing for Error Correction in Panel Data. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 69(6), 709-748. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x>
- Yoo, I. & Yi, C.G. (2022). Economic Innovation Caused by Digital Transformation and Impact on Social Systems. *Sustainability*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052600>
- Zhao, M., Zhu, M., Chen, Y., Zhang, C. & Cai, W. (2024). The uneven impacts of climate change on China's labor productivity and economy. *Journal of Environmental Management*, 351, 119707. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119707>
- Zia, Z., Zhong, R. & Akbar, M.W. (2024). Analyzing the impact of fintech industry and green financing on energy poverty in the European countries. *Heliyon*, 10(6), e27532. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27532>

***Tác giả liên hệ: Lê Hải Trung. Email: trunglh@hvnh.edu.vn**