
TÁC ĐỘNG CỦA CHUYỂN ĐỔI SỐ LÊN PHÁT THẢI CO₂: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM TẠI CHÂU Á VÀ HÀM Ý CHÍNH SÁCH CHO VIỆT NAM

Mạc Thị Hải Yến

Khoa Khoa học quản lý, Đại học Kinh tế Quốc dân

Email: yenmh@neu.edu.vn

Mã bài báo: JED-2907

Ngày nhận: 03/02/2026

Ngày nhận bản sửa: 27/03/2026

Ngày duyệt đăng: 19/04/2026

DOI: 10.33301/JED.VI.2907

Tóm tắt

Phát thải CO₂ tại châu Á gia tăng nhanh trong bối cảnh tăng trưởng kinh tế, công nghiệp hóa và chuyển đổi số diễn ra mạnh mẽ. Tuy nhiên, tác động môi trường của chuyển đổi số vẫn còn nhiều tranh luận trong thực nghiệm. Nghiên cứu này phân tích tác động của tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số và tiêu thụ năng lượng đến phát thải CO₂ tại 35 quốc gia châu Á giai đoạn 2012-2023 trong khuôn khổ Đường cong Kuznets Môi trường (EKC) mở rộng. Nghiên cứu sử dụng mô hình hồi quy dữ liệu bảng tác động cố định kết hợp sai số chuẩn Driscoll-Kraay. Kết quả cho thấy tồn tại mối quan hệ phi tuyến giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂, đồng thời khẳng định vai trò chi phối của tiêu thụ năng lượng đối với áp lực phát thải. Các khía cạnh khác nhau của chuyển đổi số tạo ra tác động môi trường không đồng nhất. Từ đó, nghiên cứu đề xuất hàm ý chính sách về chuyển đổi số xanh và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng tại Việt Nam.

Từ khóa: Phát thải CO₂, chuyển đổi số, tăng trưởng kinh tế, tiêu thụ năng lượng, GDP.

Mã JEL: O33, O44, Q56.

The impact of digital transformation on CO₂ emissions: Empirical evidence from Asia and implications for Vietnam

Abstract

CO₂ emissions in Asia have increased rapidly amid accelerating economic growth, industrialization, and digital transformation. However, the environmental effects of digital transformation remain inconclusive in empirical literature. This research examines the impacts of economic growth, digital transformation, and energy consumption on CO₂ emissions across 35 Asian countries during the period 2012-2023 within an extended Environmental Kuznets Curve framework. The study employs a fixed-effects panel regression model with Driscoll-Kraay standard errors. The results reveal a nonlinear relationship between economic growth and CO₂ emissions, while confirming the dominant role of energy consumption in driving emission pressures. Different dimensions of digital transformation also generate heterogeneous environmental effects. Based on the findings, several policy implications are proposed for promoting green digital transformation and improving energy-use efficiency in Vietnam.

Keywords: CO₂ emissions, digital transformation, economic growth, energy consumption, GDP.

JEL Codes: O33, O44, Q56.

1. Giới thiệu

Phát thải carbon dioxide (CO₂) là nguyên nhân chủ yếu của biến đổi khí hậu toàn cầu, gây gia tăng nhiệt độ, biến động khí hậu và mực nước biển, từ đó gây ra những hệ lụy nghiêm trọng đối với môi trường, kinh tế và xã hội (Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu - IPCC, 2021). Tại các nền kinh tế đang phát triển, phát thải CO₂ từ sử dụng năng lượng chiếm tỷ trọng lớn trong tổng lượng khí nhà kính, khiến việc cân bằng giữa tăng trưởng kinh tế và kiểm soát phát thải trở thành một thách thức trung tâm của phát triển bền vững (Cơ quan Năng lượng Quốc tế - IEA, 2023).

Châu Á hiện là khu vực phát thải CO₂ lớn nhất thế giới, chiếm khoảng một nửa tổng phát thải toàn cầu (Ritchie & cộng sự, 2024). Đồng thời, đây cũng là một trong những khu vực số hóa năng động nhất, với khoảng 66% dân số châu Á - Thái Bình Dương sử dụng Internet vào năm 2023 và xuất khẩu các dịch vụ có thể cung cấp dưới dạng số đạt khoảng 958 tỷ USD vào năm 2022 (Liên minh Viễn thông Quốc tế - ITU, 2023; Hội nghị Liên Hợp Quốc về Thương mại và Phát triển - UNCTAD, 2024). Tuy nhiên, sự khác biệt về trình độ phát triển, mức độ số hóa và cơ cấu năng lượng giữa các quốc gia khiến tác động môi trường của chuyển đổi số chưa đồng nhất. Điều này làm nổi bật tính cần thiết của việc xem xét mối quan hệ giữa số hóa và phát thải CO₂ tại châu Á.

Từ góc độ kinh tế, tăng trưởng nhanh thường đi kèm với gia tăng tiêu thụ năng lượng và phát thải CO₂, đặc biệt trong các ngành công nghiệp và hạ tầng sử dụng nhiều năng lượng (Acheampong, 2018). Giả thuyết Đường cong Kuznets môi trường (Environmental Kuznets Curve - EKC) cho rằng mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và suy thoái môi trường có thể mang dạng phi tuyến hình chữ U ngược, trong đó suy thoái môi trường thường được đo lường thông qua các chỉ tiêu ô nhiễm không khí cục bộ như SO₂, khói bụi hoặc chất lượng nước (Grossman & Krueger, 1991, 1995). Tuy nhiên, khả năng áp dụng giả thuyết này đối với các chất ô nhiễm mang tính tích lũy toàn cầu như CO₂ vẫn là vấn đề gây tranh luận trong thực nghiệm. Nguyên nhân là phát thải CO₂ không nhất thiết giảm khi thu nhập gia tăng và có thể phụ thuộc vào cơ cấu năng lượng, công nghệ và thể chế môi trường của từng quốc gia (Stern, 2017; Shahbaz & cộng sự, 2019).

Cùng với tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số đang chuyển đổi phương thức sản xuất, tiêu dùng và thương mại. Mặc dù số hóa được kỳ vọng nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và giảm phụ thuộc vào các hoạt động vật chất, việc mở rộng hạ tầng số và trung tâm dữ liệu cũng có thể làm gia tăng nhu cầu điện năng và phát thải CO₂ nếu cơ cấu năng lượng chưa được xanh hóa (Belkhir & Elmeligi, 2018). Do đó, tác động môi trường của chuyển đổi số được xem là không đồng nhất và phụ thuộc vào cấu trúc của quá trình số hóa.

Trong bối cảnh châu Á, nơi các quốc gia đồng thời thúc đẩy tăng trưởng và chuyển đổi số nhưng vẫn chịu áp lực lớn từ tiêu thụ năng lượng, vai trò của chuyển đổi số đối với phát thải CO₂ còn nhiều tranh luận. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này phân tích mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số, tiêu thụ năng lượng và phát thải CO₂ tại 35 quốc gia châu Á trong giai đoạn 2012-2023, nhằm trả lời hai câu hỏi: i) Tăng trưởng kinh tế tác động như thế nào đến phát thải CO₂?; ii) Các khía cạnh khác nhau của chuyển đổi số ảnh hưởng như thế nào đến phát thải CO₂ trong bối cảnh tiêu thụ năng lượng gia tăng? Nghiên cứu gồm các phần: giới thiệu, cơ sở lý thuyết và tổng quan nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu, kết quả và thảo luận, kết luận và hàm ý chính sách.

2. Tổng quan nghiên cứu và cơ sở lý thuyết

2.1. Tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂

Mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và suy thoái môi trường là vấn đề trọng tâm trong kinh tế học môi trường kể từ khi giả thuyết Đường cong Kuznets môi trường được đề xuất. Kế thừa ý tưởng ban đầu của Kuznets (1955), Grossman & Krueger (1991, 1995) cho rằng mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và suy thoái môi trường có thể mang tính phi tuyến dạng chữ U ngược. Trong đó, ô nhiễm môi trường có xu hướng gia tăng ở giai đoạn đầu của phát triển kinh tế nhưng có thể giảm dần khi thu nhập đạt đến một ngưỡng nhất định. Tuy nhiên, đối với các chất ô nhiễm mang tính tích lũy toàn cầu như CO₂, bằng chứng thực nghiệm vẫn chưa thống nhất và kết quả có thể phụ thuộc vào cơ cấu năng lượng, trình độ công nghệ và thể chế môi trường của từng quốc gia (Stern, 2017; Shahbaz & cộng sự, 2019; Destek & Sinha, 2020).

Bên cạnh đó, một số nghiên cứu gần đây cho rằng mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂ có thể không tuân theo dạng chữ U ngược truyền thống mà có xu hướng mang dạng chữ N hoặc không ổn định giữa các nhóm quốc gia, phản ánh sự khác biệt về cơ cấu năng lượng, trình độ công nghệ và thể chế

môi trường (Allard & cộng sự, 2018). Điều này cho thấy việc áp dụng giả thuyết EKC đối với phát thải CO₂ vẫn còn nhiều tranh luận trong thực nghiệm.

Trong nghiên cứu này, tăng trưởng kinh tế được tiếp cận theo nghĩa hẹp là sự gia tăng thu nhập bình quân đầu người và được phản ánh bằng GDP bình quân đầu người và bình phương của biến này nhằm kiểm định mối quan hệ phi tuyến giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂ theo giả thuyết EKC. Đối với châu Á, việc kiểm định EKC có ý nghĩa đặc biệt do sự khác biệt lớn giữa các quốc gia về trình độ phát triển, cơ cấu năng lượng và mức độ công nghiệp hóa. Nhiều nền kinh tế trong khu vực vẫn tăng trưởng phụ thuộc nhiều vào tiêu thụ năng lượng và mở rộng sản xuất công nghiệp, khiến tăng trưởng thường đi kèm với áp lực phát thải CO₂ gia tăng (Shahbaz & cộng sự, 2019). Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất giả thuyết:

H1: Tăng trưởng kinh tế tác động đến phát thải CO₂ theo mối quan hệ phi tuyến dạng chữ U ngược tại các quốc gia châu Á.

2.2. Chuyển đổi số và phát thải CO₂

Chuyển đổi số ngày càng được xem là một động lực quan trọng của tăng trưởng kinh tế, song tác động của quá trình này đến phát thải CO₂ vẫn còn nhiều tranh luận. Tổ chức Hợp tác và Phát triển Kinh tế - OECD (2019) cho rằng chuyển đổi số là một quá trình đa chiều, cần được đo lường thông qua nhiều nhóm chỉ báo như kết nối số, sử dụng công nghệ số và các hoạt động kinh tế số. Trong các nghiên cứu thực nghiệm, chuyển đổi số thường được lượng hóa thông qua các biến như mức độ sử dụng Internet, mức độ thâm nhập băng rộng và xuất khẩu dịch vụ ICT (Salahuddin & cộng sự, 2016; Quaglionone & cộng sự, 2023; Kashif & cộng sự, 2024). Trên cơ sở đó, nghiên cứu này không đo lường chuyển đổi số bằng một chỉ số tổng hợp duy nhất mà sử dụng một nhóm biến đại diện cho một số khía cạnh quan sát được của quá trình số hóa ở cấp quốc gia.

Tác động môi trường của chuyển đổi số có thể có tính hai mặt. Một mặt, mở rộng tiếp cận Internet và đầu tư vào hạ tầng số có thể làm gia tăng phát thải CO₂ do kéo theo nhu cầu điện năng lớn hơn cho thiết bị số, trung tâm dữ liệu và mạng lưới viễn thông, đặc biệt tại các quốc gia còn phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch (Salahuddin & cộng sự, 2016; Asongu & cộng sự, 2020). Mặt khác, khi gắn với nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và thúc đẩy các dịch vụ có thể cung cấp hoàn toàn dưới dạng số, chuyển đổi số có thể góp phần giảm sự phụ thuộc vào sản xuất và vận tải truyền thống, từ đó làm giảm cường độ carbon của nền kinh tế (Li & cộng sự, 2021; Ma & cộng sự, 2022). Các bằng chứng thực nghiệm hiện có cũng cho thấy tác động của chuyển đổi số là không đồng nhất. Một số nghiên cứu ghi nhận vai trò làm giảm phát thải của các dịch vụ số, trong khi các nghiên cứu khác chỉ ra mối liên hệ tích cực giữa hạ tầng công nghệ, các hoạt động ICT truyền thống và phát thải CO₂ (Zhang & cộng sự, 2023; Khan & cộng sự, 2023). Từ các lập luận trên, nghiên cứu đề xuất các giả thuyết:

H2: Chuyển đổi số gắn với mở rộng tiếp cận Internet và hạ tầng băng rộng làm gia tăng phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á.

H3: Chuyển đổi số gắn với các dịch vụ có thể số hóa làm giảm phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á.

2.3. Phát triển kinh tế, tiêu thụ năng lượng và chuyển đổi số

Bên cạnh tăng trưởng kinh tế và chuyển đổi số, tiêu thụ năng lượng là một kênh tác động trực tiếp và quan trọng đến phát thải CO₂. Trong nghiên cứu này, tiêu thụ năng lượng được phản ánh bằng cường độ tiêu thụ năng lượng, tức lượng năng lượng cần thiết để tạo ra một đơn vị GDP (World Bank, n.d.). Nhiều nghiên cứu cho thấy tiêu thụ năng lượng có mối quan hệ chặt chẽ với phát thải CO₂, đặc biệt tại các nền kinh tế đang phát triển, nơi năng lượng hóa thạch vẫn chiếm tỷ trọng lớn trong cơ cấu cung năng lượng (Shahbaz & cộng sự, 2019). Đồng thời, tác động của chuyển đổi số đến phát thải CO₂ cũng chịu sự chi phối của trình độ phát triển kinh tế và mức tiêu thụ năng lượng: ở các nền kinh tế thu nhập thấp và trung bình, số hóa thường gắn liền với mở rộng công nghiệp và nhu cầu năng lượng gia tăng, trong khi ở các quốc gia có thu nhập cao hơn, chuyển đổi số có thể góp phần thúc đẩy tăng trưởng xanh thông qua nâng cao hiệu quả năng lượng và giảm cường độ carbon (Acheampong, 2018; Usman & cộng sự, 2022). Trong khung EKC mở rộng, chuyển đổi số và tiêu thụ năng lượng có thể tương tác với tăng trưởng kinh tế trong việc định hình quỹ đạo phát thải CO₂. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất giả thuyết:

H4: Gia tăng tiêu thụ năng lượng làm gia tăng phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á.

Từ tổng quan nghiên cứu có thể xác định ba khoảng trống chính. Thứ nhất, nhiều nghiên cứu trước đây

thường xem xét tác động của chuyển đổi số đến phát thải CO₂ thông qua từng chỉ báo riêng lẻ, như sử dụng Internet, băng rộng hay dịch vụ ICT nên chưa phản ánh đầy đủ tính đa chiều của chuyển đổi số. OECD cũng nhấn mạnh rằng chuyển đổi số cần được đo lường qua nhiều nhóm chỉ báo khác nhau thay vì một thước đo đơn nhất. Thứ hai, bằng chứng thực nghiệm cho khu vực châu Á còn tương đối hạn chế, trong khi đây là khu vực có sự khác biệt lớn giữa các quốc gia về trình độ phát triển, cơ cấu năng lượng và mức độ số hóa. Thứ ba, chưa nhiều nghiên cứu đặt đồng thời các khía cạnh khác nhau của chuyển đổi số trong cùng một khung EKC mở rộng để xem xét vai trò của tăng trưởng kinh tế, tiêu thụ năng lượng và số hóa đối với phát thải CO₂. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đóng góp ở hai điểm: (i) tiếp cận chuyển đổi số theo hướng đa chiều thông qua nhiều biến đại diện thay vì một chỉ báo đơn lẻ và (ii) làm rõ sự khác biệt trong tác động môi trường giữa các khía cạnh khác nhau của quá trình số hóa trong khuôn khổ EKC mở rộng.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phương pháp nghiên cứu và thu thập dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp định lượng nhằm kiểm định mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số và phát thải CO₂ trong khuôn khổ lý thuyết Đường cong Kuznets môi trường (EKC). Trên cơ sở dữ liệu bảng giai đoạn 2012-2023, mô hình tác động cố định được ước lượng với sai số chuẩn Driscoll-Kraay (Driscoll & Kraay, 1998) nhằm xử lý hiện tượng phương sai sai số thay đổi, tự tương quan và phụ thuộc chéo.

Do hạn chế về tính đầy đủ của dữ liệu, đặc biệt đối với các chỉ tiêu phản ánh chuyển đổi số, nghiên cứu lựa chọn mẫu gồm 35 quốc gia châu Á có dữ liệu tương đối đầy đủ và liên tục trong giai đoạn nghiên cứu. Biến phụ thuộc là phát thải CO₂ bình quân đầu người. Các biến giải thích bao gồm nhóm biến đại diện cho một số khía cạnh quan sát được của chuyển đổi số ở cấp quốc gia, gồm tỷ lệ người sử dụng Internet, mật độ thuê bao băng rộng cố định, xuất khẩu dịch vụ ICT và xuất khẩu dịch vụ có thể số hóa, cùng các biến kiểm soát là GDP bình quân đầu người, GDP bình quân đầu người bình phương và cường độ tiêu thụ năng lượng.

Dữ liệu được thu thập từ Our World in Data, Ngân hàng Thế giới và UNCTADstat; toàn bộ các biến được chuyển sang dạng logarit tự nhiên nhằm hỗ trợ diễn giải kết quả và cải thiện đặc tính phân phối.

3.2. Mô hình nghiên cứu và mô tả các biến

Dựa trên khung lý thuyết EKC mở rộng và các nghiên cứu liên quan, nghiên cứu xây dựng mô hình hồi quy nhằm phân tích tác động của tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số và tiêu thụ năng lượng đến phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á. Mô hình tổng quát được biểu diễn như sau:

$$ED_{i,t} = \alpha + \beta_1 GDP_{i,t} + \beta_2 GDP_{i,t}^2 + \beta_3 M_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

Trong đó, là mức độ suy thoái môi trường, được đo bằng phát thải CO₂ bình quân đầu người; và phản ánh tác động phi tuyến của tăng trưởng kinh tế theo giả thuyết EKC; là nhóm biến bổ sung gồm các biến chuyển đổi số và năng lượng; là sai số ngẫu nhiên.

Sau khi chuyển toàn bộ các biến sang logarit tự nhiên, mô hình nghiên cứu được cụ thể hóa như sau:

$$\ln CO2_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln ITU_{i,t} + \beta_2 \ln FBB_{i,t} + \beta_3 \ln ICTSERVICE_{i,t} + \beta_4 \ln DIGIEXPORT_{i,t} + \beta_5 \ln GDP_{i,t} + \beta_6 (\ln GDP_{i,t})^2 + \beta_7 \ln ENERGY_INTENSITY_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

Trong mô hình này, biến phụ thuộc $\ln CO2_{i,t}$ là phát thải CO₂ bình quân đầu người của quốc gia i tại thời điểm t . Nhóm biến đại diện cho chuyển đổi số không nhằm đo lường toàn diện quá trình chuyển đổi số ở cấp quốc gia mà phản ánh một số khía cạnh quan sát được của quá trình số hóa ở cấp quốc gia, gồm: $\ln ITU_{i,t}$ là tỷ lệ người sử dụng Internet; $\ln FBB_{i,t}$ là mật độ thuê bao băng rộng cố định; $\ln ICTSERVICE_{i,t}$ là kim ngạch xuất khẩu dịch vụ công nghệ thông tin và truyền thông; và $\ln DIGIEXPORT_{i,t}$ là giá trị xuất khẩu các dịch vụ có thể cung cấp dưới dạng số.

Nhóm biến kiểm soát bao gồm $\ln GDP_{i,t}$

$\ln GDP_{i,t}$ và $(\ln GDP_{i,t})^2$, được sử dụng nhằm kiểm định mối quan hệ phi tuyến giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂ theo giả thuyết EKC; $\ln ENERGY_INTENSITY_{i,t}$ là cường độ tiêu thụ năng lượng, phản ánh mức năng lượng tiêu hao tương đối so với quy mô kinh tế. Mô tả chi tiết các biến được trình bày ở Bảng 1.

3.3. Phương pháp phân tích dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng hồi quy dữ liệu bảng để phân tích tác động của tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số

Bảng 1. Mô tả biến nghiên cứu

Biến	Mô tả	Đo lường	Nguồn
lnCO ₂	Phát thải CO ₂ bình quân đầu người	Tấn bình quân đầu người	OurWorldin Data
lnITU	Tỷ lệ người sử dụng Internet	Phần trăm dân số (%).	World Bank (WB)
lnFBB	Mật độ thuê bao băng rộng cố định	Số thuê bao băng rộng cố định trên 100 dân, bao gồm DSL, cáp và cáp quang.	WB
lnICTSERVICE	Kim ngạch xuất khẩu các sản phẩm công nghệ thông tin và truyền thông (ICT)	Giá trị xuất khẩu các dịch vụ công nghệ thông tin và truyền thông, đo bằng tỷ trọng trong tổng kim ngạch dịch vụ thương mại (%).	WB
lnDIGIEXPORT	Xuất khẩu dịch vụ có thể số hóa	Giá trị xuất khẩu các dịch vụ có thể cung cấp ở dạng số đo bằng triệu USD	UNCTAD stat
lnGDP	GDP bình quân đầu người	GDP bình quân đầu người theo giá cố định quốc tế năm 2011, điều chỉnh PPP	OurWorldin Data
lnGDP ²	GDP bình quân đầu người bình phương	GDP bình quân đầu người theo giá cố định quốc tế năm 2011, điều chỉnh PPP bình phương	Tác giả tự tính
lnENERGY_INTENSITY	Cường độ tiêu thụ năng lượng	Lượng năng lượng sử dụng trên một đơn vị GDP	WB

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

và tiêu thụ năng lượng đến phát thải CO₂ tại 35 quốc gia châu Á trong giai đoạn 2012-2023. Trước khi ước lượng mô hình, nghiên cứu thực hiện các kiểm định chẩn đoán nhằm kiểm định phương sai sai số thay đổi, tự tương quan và phụ thuộc chéo giữa các đơn vị quan sát.

Kết quả cho thấy mô hình tồn tại hiện tượng phương sai thay đổi và tự tương quan. Trên cơ sở đó, nghiên cứu sử dụng mô hình tác động cố định kết hợp với sai số chuẩn Driscoll-Kraay nhằm khắc phục các khuyết tật kinh tế lượng và bảo đảm độ tin cậy của suy luận thống kê.

Quy trình phân tích được triển khai qua ba bước: (i) thống kê mô tả; (ii) kiểm định chẩn đoán dữ liệu bảng; và (iii) ước lượng mô hình tác động cố định với sai số chuẩn Driscoll-Kraay.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Thống kê mô tả

Bảng 2. Thống kê mô tả các biến

Biến	Số quan sát (N)	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất
lnCO ₂	420	1,149	1,289	-1,616	3,895
lnITU	420	3,877	0,717	1,597	4,606
lnFBB	420	13,586	2,890	4,248	20,271
lnICTSERVICE	420	7,199	2,864	0,000	12,494
lnDIGIEXPORT	420	1,635	1,374	-5,805	4,135
lnGDP	420	9,722	1,002	7,592	11,876
lnGDP ²	420	95,511	19,679	57,634	141,048
lnENERGY_INTENSITY	420	-0,078	0,559	-1,598	1,073

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Kết quả thống kê mô tả các biến phân tích được trình bày trong Bảng 2, bao gồm phát thải CO₂ bình quân đầu người, các biến đại diện cho một số khía cạnh của chuyển đổi số, tăng trưởng kinh tế và tiêu thụ năng lượng, với 420 quan sát từ 35 quốc gia châu Á giai đoạn 2012-2023.

4.2. Kết quả hồi quy

Trước khi ước lượng mô hình, nghiên cứu kiểm tra tương quan cặp, đa cộng tuyến và tính dừng của các biến. Kết quả cho thấy phát thải CO₂ bình quân đầu người có tương quan dương với GDP bình quân đầu người, GDP bình quân đầu người bình phương và cường độ tiêu thụ năng lượng, với hệ số tương quan lần lượt là 0,893; 0,887 và 0,780. Điều này phù hợp với kỳ vọng về mối liên hệ giữa tăng trưởng kinh tế, sử dụng năng lượng và phát thải. Đối với nhóm biến chuyển đổi số, các hệ số tương quan với phát thải CO₂ khác nhau về chiều và mức độ, gồm $\ln ITU = 0,729$; $\ln FBB = 0,273$; $\ln ICTSERVICE = -0,145$ và $\ln DIGIEXPORT = 0,308$, gợi ý khả năng tác động không đồng nhất giữa các khía cạnh của chuyển đổi số.

Mặc dù một số cặp biến độc lập có tương quan cao, đặc biệt giữa GDP bình quân đầu người và biến bình phương của GDP do đặc tả kiểm định EKC, kết quả kiểm định VIF đối với các biến giải thích cho thấy đa cộng tuyến không nghiêm trọng, với VIF dao động từ 1,67 đến 4,64 và VIF trung bình bằng 2,80. Đối với tính dừng của dữ liệu, kiểm định Levin-Lin-Chu cho thấy sáu biến gồm $\ln CO_2$, $\ln ITU$, $\ln FBB$, $\ln ICTSERVICE$, $\ln GDP$ và $\ln ENERGY_INTENSITY$ đều bác bỏ giả thuyết có nghiệm đơn vị ở mức ý nghĩa 1%, với thống kê t điều chỉnh lần lượt là -9,755; -4,464; -2,737; -5,021; -3,396 và -4,368. Riêng biến $\ln DIGIEXPORT$ chưa bác bỏ giả thuyết có nghiệm đơn vị, với thống kê t điều chỉnh bằng 0,534 và p-value bằng 0,703.

Do đó, nghiên cứu tiếp tục sử dụng các kiểm định đồng liên kết bảng theo Kao và Pedroni nhằm kiểm tra tính ổn định của mối quan hệ giữa các biến trong mô hình. Kết quả ở Bảng 3 cho thấy giả thuyết không tồn tại đồng liên kết bị bác bỏ ở các mức ý nghĩa thống kê thông thường, qua đó hạn chế nguy cơ hồi quy giả mạo.

Bảng 3. Kết quả kiểm định đồng liên kết của Kao và Pedroni

Kiểm định	Thống kê	P-value	Kết luận
Kao test			
ADF t	-2,057	0,020**	Có đồng liên kết
DF t	-1,884	0,030**	Có đồng liên kết
Unadjusted DF t	-3,398	0,000***	Có đồng liên kết
Pedroni test			
Modified Phillips–Perron t	10,121	0,000***	Có đồng liên kết
Phillips–Perron t	-28,963	0,000***	Có đồng liên kết
Augmented Dickey–Fuller t	-19,314	0,000***	Có đồng liên kết

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Các kiểm định chẩn đoán ở Bảng 4 cho thấy mô hình tồn tại phương sai thay đổi và tự tương quan, trong khi không có bằng chứng thống kê về phụ thuộc chéo. Trên cơ sở đó, mô hình tác động cố định kết hợp sai số chuẩn Driscoll-Kraay được sử dụng nhằm nâng cao độ tin cậy của suy luận thống kê.

Bảng 4. Các kiểm định chẩn đoán cho đặc tính dữ liệu bảng

Kiểm định	Thống kê	P-value	Kết luận
Phương sai thay đổi (Modified Wald test)	$\chi^2(35) = 14781,600$	0,000***	Có phương sai thay đổi
Tự tương quan (Wooldridge test)	$F(1,34) = 50,973$	0,000***	Có tự tương quan
Phụ thuộc chéo (Pesaran CD test)	$z = 1,288$	0,198	Không có phụ thuộc chéo

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Kết quả ước lượng mô hình hồi quy tác động cố định với sai số chuẩn Driscoll-Kraay được trình bày trong Bảng 5.

Kết quả hồi quy thể hiện tăng trưởng kinh tế, chuyển đổi số và cường độ tiêu thụ năng lượng đều có có ý nghĩa thống kê với phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á trong giai đoạn nghiên cứu. Trong nhóm biến đại diện cho chuyển đổi số, $\ln ITU$ có hệ số âm và có ý nghĩa thống kê ở mức 10%, trong khi $\ln FBB$ và $\ln ICTSERVICE$ có hệ số dương và có ý nghĩa thống kê. Ngược lại, $\ln DIGIEXPORT$ có tác động âm và có ý nghĩa thống kê cao, hàm ý rằng tác động môi trường của chuyển đổi số là không đồng nhất giữa các chiều cạnh khác nhau. Điều này cho thấy quá trình chuyển đổi số tại nhiều quốc gia châu Á vẫn gắn với mức tiêu thụ năng lượng lớn, đặc biệt trong bối cảnh phụ thuộc đáng kể vào năng lượng hóa thạch.

Bảng 5. Kết quả hồi quy FE với sai số chuẩn Driscoll-Kraay

Biến phụ thuộc: Phát thải CO₂ bình quân đầu người					
Biến	Hệ số	Sai số chuẩn	Thống kê t	P-value	Khoảng tin cậy 95%
lnITU	-0,040	0,018	-2,170	0,052*	[-0,081 ; 0,000]
lnFBB	0,082	0,019	4,260	0,001***	[0,039 ; 0,124]
lnICTSERVICE	0,028	0,010	2,920	0,014**	[0,007 ; 0,049]
lnDIGIEXPORT	-0,072	0,013	-5,490	0,000***	[-0,101 ; -0,043]
lnGDP	3,545	0,547	6,480	0,000***	[2,341 ; 4,750]
lnGDP ²	-0,132	0,026	-5,160	0,000***	[-0,188 ; -0,076]
lnENERGY_INTENSITY	0,659	0,092	7,190	0,000***	[0,457 ; 0,861]
Hằng số	-21,161	2,754	-7,680	0,000***	[-27,223 ; -15,099]

Ghi chú: *, ** và *** lần lượt biểu thị mức ý nghĩa thống kê 10%, 5% và 1%.

Nguồn: Tác giả tổng hợp.

Đối với các biến kiểm soát, lnGDP có hệ số dương còn lnGDP² có hệ số âm và đều có ý nghĩa thống kê cao, xác nhận sự tồn tại của mối quan hệ phi tuyến dạng chữ U ngược giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂ theo giả thuyết EKC. Kết quả này phản ánh thực tế nhiều nền kinh tế châu Á vẫn phụ thuộc đáng kể vào các ngành sử dụng nhiều năng lượng trong quá trình tăng trưởng kinh tế, trong khi tác động của EKC có thể khác biệt giữa các quốc gia tùy thuộc vào cơ cấu năng lượng và mức độ phát triển kinh tế. Đồng thời, lnENERGY_INTENSITY có tác động dương mạnh mẽ đến phát thải CO₂, chỉ ra cường độ tiêu thụ năng lượng vẫn là yếu tố chi phối quan trọng đối với áp lực môi trường tại khu vực châu Á.

Nhìn chung, các kết quả hồi quy cung cấp bằng chứng thực nghiệm gợi ý sự tồn tại của mối quan hệ phi tuyến giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂, đồng thời cho thấy tác động không đồng nhất của các khía cạnh chuyển đổi số và vai trò chi phối của tiêu thụ năng lượng trong việc định hình kết quả môi trường tại các quốc gia châu Á.

4.3. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂ tại các quốc gia châu Á mang dạng phi tuyến chữ hình U ngược, thể hiện qua hệ số dương của lnGDP và hệ số âm của lnGDP². Phát hiện này phù hợp với lập luận của giả thuyết EKC và tương đồng với một số nghiên cứu thực nghiệm gần đây về phát thải CO₂ của Grossman & Krueger (1991, 1995) và Stern (2017). Kết quả này cho thấy tác động môi trường của tăng trưởng kinh tế phụ thuộc vào cơ cấu năng lượng và trình độ phát triển của từng quốc gia.

Bên cạnh đó, cường độ tiêu thụ năng lượng (lnENERGY_INTENSITY) có tác động dương và có ý nghĩa thống kê cao đối với phát thải CO₂, cho thấy năng lượng vẫn là kênh truyền dẫn quan trọng nhất của áp lực môi trường trong khu vực. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước nhấn mạnh mối liên hệ chặt chẽ giữa tiêu thụ năng lượng và phát thải CO₂ tại các nền kinh tế đang phát triển, đặc biệt khi cơ cấu năng lượng còn phụ thuộc lớn vào nhiên liệu hóa thạch (Shahbaz & cộng sự, 2019; Usman & cộng sự, 2022).

Đối với các biến đại diện cho chuyển đổi số, kết quả cho thấy tác động môi trường của số hóa là không đồng nhất giữa các chiều cạnh khác nhau. Tỷ lệ người sử dụng Internet (lnITU) có hệ số âm và có ý nghĩa thống kê ở mức 10%, gợi ý rằng việc mở rộng tiếp cận Internet có thể góp phần giảm phát thải CO₂ thông qua các kênh như giảm chi phí giao dịch, hỗ trợ các hoạt động trực tuyến và cải thiện hiệu quả phân bổ nguồn lực. Phát hiện này tương đồng với Salahuddin & cộng sự (2016) và Li & cộng sự (2021), những

nghiên cứu cho rằng số hóa có thể tạo ra các hiệu ứng tiết kiệm tài nguyên và thúc đẩy các hoạt động kinh tế ít carbon hơn. Tác động này phụ thuộc vào bối cảnh năng lượng và trình độ công nghệ của từng nền kinh tế.

Ngược lại, mật độ thuê bao băng rộng cố định (InFBB) có hệ số dương và có ý nghĩa thống kê cao, cho thấy mở rộng hạ tầng băng rộng có thể gắn liền với gia tăng phát thải CO₂. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu của Asongu & cộng sự (2020) và Zhang & cộng sự (2023), khi cho rằng phát triển hạ tầng số trong giai đoạn đầu của quá trình số hóa thường làm tăng nhu cầu điện năng cho thiết bị mạng, trung tâm dữ liệu và hệ thống truyền dẫn. Điều đó cho thấy tác động môi trường của hạ tầng số phụ thuộc vào mức độ xanh hóa của hệ thống điện.

Một kết quả đáng chú ý khác là sự phân hóa giữa hai biến phản ánh hoạt động dịch vụ số. Biến xuất khẩu dịch vụ ICT (InICTSERVICE) có tác động dương đến phát thải CO₂, trong khi biến xuất khẩu các dịch vụ có thể cung cấp dưới dạng số (InDIGIEXPORT) lại có tác động âm và có ý nghĩa thống kê cao. Kết quả này phù hợp với lập luận rằng không phải mọi hoạt động số hóa đều tạo ra hiệu ứng môi trường giống nhau. Trong khi dịch vụ ICT có thể gắn với vận hành hạ tầng, xử lý dữ liệu và nhu cầu điện năng lớn hơn (Khan & cộng sự, 2023; Kashif & cộng sự, 2024), thì các dịch vụ có thể số hóa phản ánh mức độ phi vật chất hóa cao hơn, qua đó góp phần giảm nhu cầu vận tải, lưu kho và các hoạt động vật chất tiêu tốn nhiều năng lượng (Li & cộng sự, 2021).

5. Kết luận và hàm ý chính sách

Nghiên cứu phân tích tác động của chuyển đổi số, tăng trưởng kinh tế và tiêu thụ năng lượng đến phát thải CO₂ tại 35 quốc gia châu Á trong giai đoạn 2012-2023 trên cơ sở khung lý thuyết Đường cong Kuznets môi trường (EKC) mở rộng. Kết quả thực nghiệm cho thấy tồn tại mối quan hệ phi tuyến giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂, đồng thời cho thấy vai trò chi phối của tiêu thụ năng lượng đối với phát thải trong khu vực. Đáng chú ý, các khía cạnh khác nhau của chuyển đổi số có tác động không đồng nhất đến phát thải CO₂. Cụ thể, mở rộng tiếp cận Internet và phát triển các dịch vụ có thể cung cấp dưới dạng số gắn với xu hướng giảm phát thải, trong khi mở rộng hạ tầng băng rộng cố định và một số hoạt động dịch vụ ICT lại đi kèm xu hướng gia tăng phát thải trong bối cảnh cơ cấu năng lượng chưa được xanh hóa. Kết quả cho thấy tác động môi trường của chuyển đổi số phụ thuộc vào cấu trúc số hóa và điều kiện năng lượng quốc gia.

Về mặt lý luận, nghiên cứu có hai đóng góp chính. Thứ nhất, nghiên cứu tiếp cận chuyển đổi số theo hướng đa chiều thông qua nhiều biến đại diện thay vì sử dụng một chỉ báo đơn lẻ, qua đó phản ánh rõ hơn tính không đồng nhất của quá trình số hóa. Thứ hai, nghiên cứu gợi ý rằng việc mở rộng khung EKC trong bối cảnh chuyển đổi số cần xem xét tính không đồng nhất giữa các chiều cạnh của quá trình số hóa thay vì tiếp cận chuyển đổi số như một khái niệm đồng nhất. Kết quả này góp phần bổ sung góc nhìn lý luận về vai trò của chuyển đổi số trong mối quan hệ giữa tăng trưởng kinh tế và phát thải CO₂.

Hàm ý chính sách đối với Việt Nam

Mặc dù kết quả nghiên cứu phản ánh xu hướng trung bình của khu vực châu Á, các phát hiện vẫn gợi mở một số hàm ý chính sách tham khảo đối với Việt Nam. Trước hết, quá trình chuyển đổi số cần được triển khai đồng bộ với chuyển dịch năng lượng theo hướng xanh hơn, bởi nếu hạ tầng số mở rộng trong khi cơ cấu điện năng vẫn phụ thuộc lớn vào nhiên liệu hóa thạch thì số hóa có thể đi kèm với gia tăng phát thải. Bên cạnh đó, Việt Nam cần ưu tiên thúc đẩy các lĩnh vực dịch vụ có thể số hóa và các hoạt động số có hàm lượng phi vật chất hóa cao, qua đó khai thác tốt hơn các lợi ích môi trường của chuyển đổi số. Đồng thời, các chính sách thúc đẩy hạ tầng số cũng cần đi kèm với yêu cầu nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, phát triển trung tâm dữ liệu xanh và khuyến khích doanh nghiệp áp dụng công nghệ tiết kiệm năng lượng.

Tuy nhiên, do dữ liệu nghiên cứu mang tính khu vực và chưa phản ánh đầy đủ đặc điểm riêng của từng quốc gia, các hàm ý trên chỉ nên được xem là gợi mở chính sách ở cấp độ tham khảo. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần có thêm các phân tích chuyên sâu cho từng quốc gia để đưa ra các khuyến nghị chính sách có mức độ đặc thù và khả thi cao hơn.

Hạn chế và hướng nghiên cứu tương lai

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu cấp quốc gia nên chưa phản ánh đầy đủ sự khác biệt giữa các ngành và khu vực trong từng quốc gia. Ngoài ra, các yếu tố thể chế và chính sách khí hậu cụ thể chưa được xem xét trực

tiếp trong mô hình. Bên cạnh đó, nghiên cứu chưa xác định cụ thể điểm uốn thu nhập của đường EKC và chưa phân tích sâu sự khác biệt về tác động của tăng trưởng kinh tế và chuyển đổi số đến phát thải CO₂ giữa các nhóm quốc gia có trình độ phát triển khác nhau ở châu Á. Các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng phân tích ở cấp độ ngành hoặc doanh nghiệp, đồng thời xem xét vai trò của chính sách năng lượng và công nghệ trong mối quan hệ giữa chuyển đổi số và phát thải CO₂.

Tài liệu tham khảo

- Acheampong, A.O. (2018), 'Economic growth, CO₂ emissions and energy consumption: What causes what and where?', *Energy Economics*, 74, 677-692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.022>
- Allard, A., Takman, J., Uddin, G.S. & Ahmed, A. (2018). The N-shaped environmental Kuznets curve: An empirical evaluation using a panel quantile regression approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5848-5861. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0907-0>
- Asongu, S.A., Le Roux, S. & Biekpe, N. (2020), 'Enhancing ICT for environmental sustainability in sub-Saharan Africa', *Technological Forecasting and Social Change*, 155, 119938. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119938>.
- Belkhir, L. & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Destek, M.A. & Sinha, A. (2020). Renewable and non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from OECD countries. *Renewable Energy*, 153, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.016>.
- Driscoll, J.C. & Kraay, A.C. (1998). Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data. *Review of Economics and Statistics*, 80(4), 549-560. <https://doi.org/10.1162/003465398557825>.
- Grossman, G.M. & Krueger, A.B. (1991). *Environmental impacts of a North American free trade agreement* (Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G.M. & Krueger, A.B. (1995). Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- IEA (2023). *CO₂ emissions in 2023*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- ITU (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/wp-content/uploads/sites/5/2023/11/Measuring-digital-development-Facts-and-figures-2023-E.pdf>.
- Kashif, U., Shi, J., Naseem, S., Dou, S. & Zahid, Z. (2024). ICT service exports and CO₂ emissions in OECD countries: The moderating effect of regulatory quality. *Economic Change and Restructuring*, 57(3). <https://doi.org/10.1007/s10644-024-09685-y>.
- Khan, I., Hou, F. & Le, H.P. (2023). The impact of digitalization on carbon emissions: Evidence from developing economies. *Technological Forecasting and Social Change*, 185, 122053. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122053>.
- Kuznets, S. (1955). International differences in capital formation and financing. In *Capital formation and economic growth* (pp. 19-111). Princeton University Press.
- Li, Z., Wang, J. & Che, S. (2021). Digital economy and carbon emission reduction: Evidence from China. *Energy Policy*, 153, 112279. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112279>.
- OECD (2019). *Measuring the digital transformation: A roadmap for the future*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264311992-en>.

-
- Quagliione, D., D'Ingiullo, D. & Meleo, L. (2023). Fixed and mobile broadband penetration and CO₂ emissions: Evidence from OECD countries. *Economia Politica*, 40(3), 795-816. <https://doi.org/10.1007/s40888-023-00307-w>.
- Ritchie, H., Rosado, P. & Roser, M. (2024). *Who emits the most CO₂ today? Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>.
- Salahuddin, M., Alam, K. & Ozturk, I. (2016). The effects of Internet usage and economic growth on CO₂ emissions in OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1226-1235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.018>.
- Shahbaz, M., Nasir, M.A. & Roubaud, D. (2019). Environmental degradation in France: The effects of FDI, financial development, and energy innovations. *Energy Economics*, 84, 104506. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104506>.
- Stern, D.I. (2017). The environmental Kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19(1), 7-28. <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>.
- UNCTAD (2024). *Making e-commerce and the digital economy work for all*. <https://unctad.org/news/making-e-commerce-and-digital-economy-work-all>.
- Usman, M., Jahanger, A. & Makhdam, M.S.A. (2022). How do financial development, energy consumption, and technological innovation affect environmental quality?. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 24540-24555. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18054-5>.
- World Bank (n.d.). *Energy intensity level of primary energy (MJ/\$2021 PPP GDP)*. World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/>
- Zhang, C., Liu, C. & Bae, J. (2023). Digitalization, energy efficiency and carbon emissions: Evidence from panel data. *Energy Policy*, 173, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113429>.