

## SỐ HOÁ VÀ VỐN NHÂN LỰC: ĐỘNG LỰC HAY RÀO CẢN CHO MÔI TRƯỜNG BỀN VỮNG Ở CÁC QUỐC GIA CHÂU Á?

Hồ Thị Lam<sup>1</sup>

*Trường Đại học Tài chính - Marketing, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

**Dương Thị Hồng Thắm**

*Trường Đại học Tài chính - Marketing, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

**Nguyễn Thảo Hương**

*Trường Đại học Tài chính - Marketing, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

**Trương Thiên Bảo**

*Trường Đại học Tài chính - Marketing, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

Ngày nhận: 08/10/2024; Ngày hoàn thành biên tập: 05/05/2025; Ngày duyệt đăng: 26/05/2025

DOI: <https://doi.org/10.38203/jiem.vi.102024.1192>

**Tóm tắt:** Bài viết phân tích vai trò của số hóa và vốn nhân lực đối với môi trường bền vững thông qua thước đo dấu chân sinh thái. Dữ liệu từ 23 quốc gia Châu Á trong giai đoạn 2000-2023 được phân tích bằng phương pháp hồi quy moment phân vị (MMQR). Kết quả cho thấy số hóa góp phần cải thiện chất lượng môi trường. Ngược lại, vốn nhân lực có xu hướng làm gia tăng áp lực lên môi trường do mở rộng các hoạt động sản xuất và tiêu dùng. Từ đó, nghiên cứu đưa ra các hàm ý chính sách nhằm tận dụng hiệu quả vai trò của số hóa và điều chỉnh định hướng phát triển vốn nhân lực, hướng tới một nền kinh tế cân bằng giữa tăng trưởng và bảo vệ môi trường, góp phần đạt được mục tiêu phát triển bền vững toàn diện.

**Từ khoá:** Môi trường bền vững, Dấu chân sinh thái, MMQR, S-GMM, Số hoá, Vốn nhân lực

### DIGITALIZATION AND HUMAN CAPITAL: DRIVERS OR BARRIERS TO SUSTAINABLE ENVIRONMENT IN ASIAN COUNTRIES?

**Abstract:** This study investigates the role of digitalization and human capital in shaping environmental sustainability, using ecological footprint as a key indicator. Panel data from 23 Asian countries during the period 2000-2023 are analyzed using the Method of Moments Quantile Regression (MMQR) technique. The findings

<sup>1</sup> Tác giả liên hệ, Email: [holam@ufm.edu.vn](mailto:holam@ufm.edu.vn)

indicate that digitalization contributes to environmental quality improvement. In contrast, human capital tends to exert greater pressure on the environment, largely due to the expansion of production and consumption activities. Based on these results, the study provides policy implications aimed at effectively leveraging the benefits of digitalization and reorienting human capital development strategies toward a balanced economy that harmonizes growth with environmental protection, thereby contributing to the achievement of comprehensive sustainable development goals.

**Keywords:** Environmental Sustainability, Ecological Footprint, MMQR, S-GMM, Digitalization, Human Capital

---

## 1. Giới thiệu

Châu Á hiện đang phải đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về biến đổi khí hậu và suy thoái môi trường, bắt nguồn từ tốc độ tăng trưởng kinh tế nhanh chóng (Hồ & cộng sự, 2024). OECD (2020) nhấn mạnh rằng các nền kinh tế lớn như Trung Quốc, Ấn Độ và nhiều quốc gia ASEAN dù đạt được những thành tựu kinh tế quan trọng nhưng cũng đồng thời gây ra hệ lụy nghiêm trọng đối với môi trường. Trung Quốc hiện là quốc gia phát thải carbon lớn nhất thế giới, chiếm tới 30% tổng phát thải toàn cầu (World Bank, 2021). Trong khi đó, Đông Nam Á đang vật lộn để cân bằng giữa duy trì tăng trưởng kinh tế và bảo vệ môi trường trong bối cảnh tài nguyên thiên nhiên dần cạn kiệt và nhu cầu năng lượng gia tăng (Shahbaz & cộng sự, 2020).

Trong bối cảnh này, số hóa và tăng trưởng vốn nhân lực nổi lên như các yếu tố quan trọng định hình quá trình phát triển bền vững tại khu vực. Số hóa - tức là việc ứng dụng công nghệ kỹ thuật số vào các lĩnh vực kinh tế - xã hội - có tiềm năng nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên, thúc đẩy công nghệ sạch và hỗ trợ quản lý môi trường hiệu quả hơn (Sui & Rejeski, 2002; Gu & cộng sự, 2017; Martynenko & Vershinia, 2018; Partel & cộng sự, 2019; Wen & cộng sự, 2018). Các dịch vụ số như thương mại điện tử hay ngân hàng điện tử giúp giảm phát thải thông qua việc cắt giảm nhu cầu đi lại (Kouladoun & cộng sự, 2022), trong khi email hay sách điện tử giảm tiêu thụ vật liệu (Ozcan & Apergis, 2018; Sui & Rejeski, 2002). Ngoài ra, số hóa còn giúp cải thiện giám sát môi trường và cung cấp dữ liệu hỗ trợ các chính sách kiểm soát phát thải (Jorisch & cộng sự, 2018). Tuy nhiên, mặt trái của số hóa cũng được ghi nhận. Một số nghiên cứu cảnh báo rằng số hóa có thể làm gia tăng nhu cầu năng lượng, phát thải khí nhà kính và rác thải điện tử, đặc biệt là khi hoạt động công nghiệp mở rộng (Park & cộng sự, 2018; Ulucak & cộng sự, 2020; Sun & cộng sự, 2023; Kouton, 2019; Marinko Skare & cộng sự, 2024; Aldakhil & cộng sự, 2019; Haftu, 2019; Raheem & cộng sự, 2020).

Cùng với số hóa, vốn nhân lực - bao gồm kiến thức, kỹ năng và kinh nghiệm - cũng có vai trò thiết yếu trong quá trình hướng đến phát triển bền vững (Sharma & cộng sự,

2021; Yao & cộng sự, 2020). Một lực lượng lao động chất lượng cao có khả năng tiếp thu và vận dụng công nghệ để giải quyết các vấn đề môi trường. Tuy nhiên, sự gia tăng thu nhập do cải thiện vốn nhân lực cũng có thể dẫn đến tiêu dùng cao hơn và kéo theo tăng phát thải (Schanes & cộng sự, 2016).

Trên cơ sở nhận thức ngày càng rõ về vai trò của số hóa và vốn nhân lực trong phát triển bền vững, nghiên cứu này tập trung phân tích tác động của hai yếu tố này đến môi trường bền vững tại 23 quốc gia Châu Á. Nghiên cứu này góp phần vào kho tàng kiến thức hiện có bằng ba điểm mới. Thứ nhất, nghiên cứu sử dụng dấu chân sinh thái (Ecological Footprint - EF) để đo lường môi trường bền vững. Không giống như phát thải CO<sub>2</sub> chỉ phản ánh ô nhiễm không khí, EF đo lường toàn diện mức độ tiêu thụ tài nguyên và khả năng phục hồi sinh thái của một quốc gia (Ahmed & cộng sự, 2021). EF bao gồm nhu cầu về nông sản, gỗ, không gian sống và năng lượng, đồng thời so sánh với khả năng cung ứng sinh thái như đất canh tác, rừng hấp thụ CO<sub>2</sub> và diện tích cho hạ tầng. Mức EF càng cao cho thấy mức độ mất cân bằng sinh thái và suy giảm bền vững môi trường càng nghiêm trọng. Thứ hai, nghiên cứu này cũng áp dụng phương pháp MMQR do Machado & Santos Silva (2019) đề xuất, cho phép đánh giá mối quan hệ giữa số hóa, vốn nhân lực và EF ở các phân vị khác nhau, từ đó phản ánh tốt hơn sự không đồng nhất trong tác động giữa các quốc gia. MMQR giúp phát hiện rõ hơn các cơ chế tác động tại từng mức độ áp lực môi trường, thay vì chỉ xem xét ảnh hưởng trung bình. Cuối cùng, đây là nghiên cứu đầu tiên tại Châu Á tập trung vào vai trò của số hóa và vốn nhân lực đối với dấu chân sinh thái trong bối cảnh phân vị. Việc hiểu rõ mối quan hệ giữa số hóa, vốn nhân lực và dấu chân sinh thái sẽ giúp thiết kế các chính sách thúc đẩy chuyển đổi số, đào tạo nhân lực và phát triển bền vững mà không làm trầm trọng thêm sức ép lên hệ sinh thái (OECD, 2020). Những phát hiện từ nghiên cứu kỳ vọng mang lại hàm ý chính sách hữu ích cho các quốc gia trong khu vực.

Cấu trúc bài viết gồm 5 phần. Sau phần giới thiệu, phần 2 trình bày tổng quan nghiên cứu. Tiếp đó, phần 3 trình bày về phương pháp nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu được trình bày ở phần 4. Cuối cùng, phần 5 đưa ra kết luận và hàm ý chính sách.

## **2. Tổng quan nghiên cứu**

### **2.1 Khung lý thuyết**

#### *2.1.1 Số hóa và môi trường bền vững*

Số hóa đang nổi lên như một nhân tố quan trọng thúc đẩy tăng trưởng kinh tế và nâng cao chất lượng môi trường. Theo lý thuyết đổi mới công nghệ (Schumpeter, 1942), công nghệ kỹ thuật số góp phần cải thiện hiệu quả sản xuất, giảm tiêu thụ tài nguyên và tối ưu hóa sử dụng năng lượng. Các nghiên cứu thực nghiệm gần đây đã chỉ ra rằng số

hóa hỗ trợ quản lý tài nguyên, tối ưu hóa quy trình công nghiệp và khuyến khích năng lượng sạch (Fareed & cộng sự, 2023).

Tuy nhiên, lý thuyết "Nghịch lý Jevons" (Jevons, 1865) cảnh báo rằng hiệu quả năng lượng cao hơn nhờ công nghệ có thể kích thích tiêu dùng năng lượng nhiều hơn, dẫn đến gia tăng tổng phát thải. Số hóa có thể làm tăng tiêu thụ điện và nguyên liệu, đặc biệt trong các nền công nghiệp đang phát triển (Usman & cộng sự, 2022; Adebayo & cộng sự, 2024). Do đó, tác động của số hóa đến môi trường có thể phi tuyến và bất đối xứng, tùy thuộc vào bối cảnh phát triển của từng quốc gia (Hosan & cộng sự, 2022).

### *2.1.2 Vốn nhân lực và môi trường bền vững*

Vốn nhân lực, theo lý thuyết tăng trưởng nội sinh (Lucas, 1988; Romer, 1990), là yếu tố then chốt thúc đẩy phát triển bền vững thông qua việc nâng cao năng suất lao động, đổi mới công nghệ và nhận thức môi trường. Nhân lực chất lượng cao thường có xu hướng ứng dụng công nghệ xanh, tối ưu hóa quản lý tài nguyên và khuyến khích đầu tư vào năng lượng sạch (Shahbaz & cộng sự, 2019; Pata & Unal, 2023).

Dựa trên giả thuyết đường cong Kuznets môi trường (EKC), trình độ học vấn tăng có thể giúp giảm tác động môi trường nhờ nâng cao nhận thức và hành vi sản xuất - tiêu dùng bền vững (Hò & cộng sự, 2024). Tuy nhiên, tăng vốn nhân lực cũng có thể dẫn đến mở rộng kinh tế, gia tăng tiêu dùng và sản xuất, từ đó làm tăng phát thải (Hao & cộng sự, 2023).

## **2.2 Bằng chứng thực nghiệm**

### *2.2.1 Số hóa và môi trường bền vững*

Từ thập niên 1990, sự phát triển của công nghệ thông tin và truyền thông (ICT) đã thúc đẩy quá trình số hóa toàn cầu, ảnh hưởng sâu rộng đến mọi mặt đời sống. Mặc dù số hóa mang lại cơ hội về tăng trưởng xanh, nhiều nghiên cứu lại ghi nhận những hệ quả môi trường đáng lo ngại.

Một nhóm nghiên cứu lạc quan cho rằng số hóa góp phần giảm phát thải qua tối ưu hóa quy trình và giảm tiêu hao tài nguyên. Mann & Kirkegaard (2006), Irtysheva (2021) và Aleksandova & cộng sự (2022) đều chỉ ra rằng công nghệ số giúp hiện đại hóa sản xuất, giảm chất thải. Đồng thời, số hóa khuyến khích chuyển đổi sang năng lượng tái tạo (Li & cộng sự, 2023; Gao, 2022). Ở cấp doanh nghiệp, Wen & cộng sự (2021) phát hiện rằng công nghệ số giúp giảm phát thải CO<sub>2</sub> thông qua quy trình sử dụng năng lượng hiệu quả hơn. Malmodin & Lunden (2018) cho thấy các quốc gia số hóa mạnh có mức phát thải thấp hơn. Danish (2019) cũng kết luận ICT giúp giảm khí thải tại 59 quốc gia thuộc sáng kiến "Vành đai và Con đường". Tại Châu Phi, Asongu

(2018) ghi nhận công nghệ số góp phần phi vật chất hóa sản phẩm, giảm sử dụng nguyên liệu truyền thống.

Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu cảnh báo mặt trái của số hóa. Dedrick (2010) cho rằng sản xuất thiết bị ICT đóng góp 2-3% lượng phát thải CO<sub>2</sub> toàn cầu. Quá trình số hóa, dù làm giảm giá thành, lại kích thích tiêu dùng và phát sinh nhiều nhu cầu năng lượng mới (Haftu, 2019). Hạ tầng số như máy chủ, trung tâm dữ liệu tiêu thụ lượng lớn điện và thải CO<sub>2</sub> (Chen & cộng sự, 2019). Ngoài ra, sản xuất và thải bỏ thiết bị điện tử tạo ra chất thải độc hại (Park & cộng sự, 2018; Ulucak & cộng sự, 2020; Sun, 2023; Kouton, 2019).

Tại Châu Á, mối quan hệ giữa số hóa và môi trường được ghi nhận là rất phức tạp. Ở một số nước tiên tiến, số hóa giúp tăng hiệu quả tài nguyên và đổi mới xanh (Huang & cộng sự, 2024), trong khi tại Đông Nam Á, số hóa lại đi kèm gia tăng phát thải trong nhiều lĩnh vực (Mohd Sidek & cộng sự, 2024). Chen & cộng sự (2020) cho rằng tác động môi trường từ số hóa mang tính hai mặt: cải thiện hiệu suất nhưng cũng tạo ra chất thải và tiêu hao năng lượng. Notley (2019) nhấn mạnh rằng dịch vụ số vẫn phụ thuộc vào tài nguyên thiên nhiên và gây áp lực môi trường lớn. Do đó, cần các chính sách tích hợp giữa số hóa và đổi mới xanh, cùng khung pháp lý để kiểm soát tác động môi trường từ nền kinh tế số.

### *2.2.2 Vốn nhân lực và môi trường bền vững*

Vốn nhân lực đóng vai trò thiết yếu trong việc thúc đẩy hành vi và chính sách bảo vệ môi trường. Khi có kiến thức về môi trường, người dân có xu hướng sử dụng năng lượng tái tạo, tham gia tái chế và giảm tiêu dùng không bền vững (Chankrajang & Muttarak, 2017; Mahmood & cộng sự, 2019). Desha & cộng sự (2015) và Ahmed & Wang (2019) cho rằng giáo dục nâng cao ý thức tuân thủ chính sách môi trường và giúp giảm dấu chân sinh thái. Xiang & cộng sự (2023) chỉ ra rằng nâng cao trình độ học vấn thúc đẩy hành vi thân thiện với môi trường như sử dụng sản phẩm sinh thái, tiết kiệm tài nguyên.

Ngoài ra, vốn nhân lực còn tạo điều kiện cho đổi mới công nghệ xanh. Khi có đủ kỹ năng và hiểu biết, lực lượng lao động có thể thúc đẩy sáng tạo trong lĩnh vực năng lượng tái tạo, quản lý rác thải và kiểm soát ô nhiễm (Shahbaz & cộng sự, 2019; Pata & Unal, 2023). Tuy nhiên, một số nghiên cứu như Hao & cộng sự (2023) cũng lưu ý rằng vốn nhân lực cao đi kèm mở rộng sản xuất và tiêu dùng, gây sức ép lên môi trường nếu không kiểm soát tốt. Do vậy, sự phát triển bền vững phụ thuộc không chỉ vào chất lượng nguồn nhân lực mà còn vào định hướng chính sách sử dụng nhân lực đó để phục vụ mục tiêu xanh.

Các nghiên cứu gần đây xem xét tác động của vốn con người đến chất lượng môi trường ở Châu Á. Phát triển vốn con người có thể cải thiện tính bền vững của môi trường (Esquivias & cộng sự, 2022) và tăng cường sự hội tụ về hiệu quả môi trường (Appiah-Twum & Long, 2023). Tuy nhiên, việc tăng đầu tư vào vốn con người cũng có thể làm trầm trọng thêm sự suy thoái môi trường (Tran & Nguyen, 2023). Mối quan hệ giữa vốn con người và chất lượng môi trường rất phức tạp, trong đó giáo dục đại học có khả năng giảm thiểu những tác động tiêu cực của bất bình đẳng thu nhập đối với lượng khí thải CO<sub>2</sub> (Tran & Nguyen, 2023). Tài nguyên thiên nhiên và vốn con người cùng nhau có thể thúc đẩy tính bền vững sinh thái ở Nam Á (Nazish Tariq & cộng sự, 2024). Những phát hiện này cho thấy các nhà hoạch định chính sách nên xem xét vai trò đa diện của nguồn nhân lực trong các chiến lược môi trường của các quốc gia Châu Á.

Bên cạnh số hóa và vốn công nghệ, các yếu tố như tiêu dùng năng lượng, công nghệ sinh thái và độ mở thương mại cũng được xem là ảnh hưởng đáng kể đến môi trường bền vững. Salahuddin & Gow (2014) cho rằng tiêu dùng năng lượng là nguyên nhân chính làm gia tăng phát thải CO<sub>2</sub> ở các nước đang phát triển, gây tác động tiêu cực đến bền vững môi trường. Trong khi đó, EU nhấn mạnh việc sử dụng năng lượng tái tạo để vừa giảm thiểu biến đổi khí hậu, vừa giảm phụ thuộc vào nhiên liệu nhập khẩu, qua đó thúc đẩy lợi ích kinh tế (Brozyna & cộng sự, 2017). Trái lại, công nghệ sinh thái được Panayotou (1993) đánh giá tích cực vì giúp nâng cao hiệu suất năng lượng và giảm ô nhiễm. Độ mở thương mại cũng đóng vai trò hỗ trợ phát triển bền vững thông qua tăng cường đầu tư, đổi mới công nghệ và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên (Weiss EB, 1992). Tuy nhiên, như Grossman & Krueger (1991) cảnh báo, nó có thể làm trầm trọng thêm áp lực môi trường ở các quốc gia có quy định yếu kém.

### **3. Phương pháp nghiên cứu**

#### **3.1 Dữ liệu**

Mục tiêu chính của nghiên cứu là xem xét sự tác động của số hóa và vốn nhân lực đến môi trường bền vững ở 23 quốc gia Châu Á, từ năm 2000 đến năm 2023, dựa trên tính khả dụng của dữ liệu. Danh sách các quốc gia trong mẫu nghiên cứu được trình bày ở Phụ lục 1. Biến phụ thuộc trong nghiên cứu là môi trường bền vững được đo lường thông qua dấu chân sinh thái (ef). Dấu chân sinh thái là một chỉ số đo lường tổng diện tích đất và nước cần thiết để cung cấp tài nguyên cho một cá nhân, cộng đồng hoặc quốc gia và để hấp thụ lượng chất thải mà họ sản xuất, trong đó bao gồm cả carbon từ việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Theo đó, dấu chân sinh thái càng lớn thì tính môi trường bền vững càng giảm. Các biến độc lập chính bao gồm số hóa (dig), vốn nhân lực (hdi) và các biến kiểm soát khác như công nghệ sinh thái (pet), độ mở thương mại (to), tiêu thụ năng lượng (ec) và giá trị gia tăng công nghiệp (iv). Để theo đuổi mục tiêu, nghiên cứu

đã tận dụng và tổng hợp được các biến trên từ nhiều nguồn dữ liệu khác nhau như World Development Indicators (WDI), Global Footprint Network và Tổ chức Hợp tác và Phát triển Kinh tế (OECD). Bảng 1 tóm tắt các biến của nghiên cứu này và các nguồn tương ứng của chúng.

**Bảng 1. Mô tả biến nghiên cứu**

Biến	Ký hiệu	Định nghĩa	Nguồn
Môi trường bền vững	ef	Dấu chân sinh thái bình quân đầu người (gha/người)	Global Footprint Network
Số hóa	dig	Phân tích PCA từ 3 chỉ số ict1 (% cá nhân sử dụng Internet), ict2 (% sử dụng thuê bao điện thoại cố định), ict3 (% sử dụng thuê bao di động)	WDI
	ict	Số lượng đăng ký băng thông rộng cố định trên 100 người	WDI
Vốn nhân lực	hdi	Chỉ số phát triển con người	WDI
Công nghệ sinh thái	pet	Logarit tự nhiên của Số lượng bằng sáng chế về công nghệ liên quan đến môi trường	OECD
Độ mở thương mại	to	Tổng kim ngạch thương mại tính theo % GDP	WDI
Tiêu thụ năng lượng	ec	Logarit tự nhiên của mức tiêu thụ năng lượng bình quân đầu người	WDI
Giá trị gia tăng công nghiệp	iv	Giá trị gia tăng công nghiệp tính theo % GDP	WDI

*Nguồn: Tổng hợp của nhóm tác giả*

### 3.2 Mô hình

Dựa theo các nghiên cứu trước (Ahmad & cộng sự, 2023; Yang & cộng sự, 2021), mô hình nghiên cứu được đề xuất như sau:

$$ef_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 dig_{i,t} + \alpha_2 hdi_{i,t} + \delta_{i,t} X_{i,t} + (\mu_i + \varepsilon_{i,t}) \quad (1)$$

trong đó,  $ef$  là biến phụ thuộc môi trường bền vững được đo lường bởi dấu chân sinh thái,  $dig$  và  $hdi$  lần lượt là các biến độc lập thể hiện số hoá và vốn nhân lực,  $X$  là tập hợp các biến kiểm soát,  $\mu$  là hiệu ứng cố định của mô hình và  $\varepsilon$  là sai số ước lượng của mô

hình, được giả định là độc lập, với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai không đổi  $\sigma^2$  ( $\varepsilon_{i,t} \sim i.i.d(0, \sigma_\varepsilon)$ ).

### 3.3 Phương pháp hồi quy phân vị moment (MMQR)

Mối quan hệ giữa số hóa, vốn nhân lực và môi trường bền vững có thể phi tuyến và thay đổi theo mức độ phát triển, do đó nghiên cứu áp dụng phương pháp hồi quy phân vị moment (MMQR) do Machado & Santos Silva (2019) đề xuất. MMQR cho phép phân tích toàn bộ phân phối của biến phụ thuộc, thay vì chỉ tập trung vào trung bình như OLS (Koenker & Hallock, 2001), nhờ đó nắm bắt tốt hơn sự khác biệt trong tác động của số hóa và vốn nhân lực đến dấu chân sinh thái. Phương pháp này đặc biệt phù hợp trong nghiên cứu môi trường vì có thể đánh giá tác động ở các mức độ bền vững khác nhau, đồng thời giảm thiểu sai số do biến bất định và vấn đề nội sinh - hạn chế phổ biến trong các nghiên cứu kinh tế - tài chính. MMQR giúp làm rõ sự khác biệt giữa các nhóm quốc gia, từ đó đưa ra khuyến nghị chính sách phù hợp theo từng mức độ phát triển (Usman & cộng sự, 2022). Nhờ vậy, phương pháp này mang lại đánh giá toàn diện và đáng tin cậy hơn so với OLS hay GMM, hỗ trợ hiệu quả cho mục tiêu phát triển bền vững.

Phương trình toán học trong MMQR như sau:

$$Y_{it} = \alpha_i + X'_{it}\beta + (\delta_i + Z'_{i,t}\gamma)U_{it} \quad (2)$$

trong đó, xác suất  $P\{\delta_i + Z'_{i,t} > 0\} = 1$ .  $(\alpha, \beta', \delta, \gamma)'$  phải được ước tính  $(\alpha_i, \delta_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , đại diện cho một hiệu ứng cố định thứ  $i$ ,  $Z$  đại diện cho một vector của các thừa số  $K$  đã biết của  $X$ , chúng là các phép biến đổi có thể phân biệt được và các phần tử  $l$  như sau:

$$Z_i = Z_i(X), l = 1, \dots, k. \quad (3)$$

Đối với mỗi  $l$  cố định,  $X'_{i,t}$  được phân bố đồng đều và độc lập trên tất cả các điểm thời gian ( $T$ ),  $U_{i,t}$  được phân bố đồng đều trên cá nhân  $i$  và thời gian theo cùng cách và trực giao với  $X_{i,t}$ . Các biến còn lại không nhất thiết phải hoàn toàn ngoại sinh và phương trình (9) có thể được biểu diễn như sau:

$$Q_y(X_{i,t}) = (\alpha_i + \delta_i(\tau)) + X'_{i,t}\beta + Z'_{i,t}\gamma q(\tau) \quad (4)$$

trong đó, vector biến giải thích được ký hiệu là  $X_{i,t}$ ,  $Q_y(X_{i,t})$  biểu thị vector biến giải thích.  $X'_{i,t} - \alpha_i(\tau) = \alpha_i + \delta_i q(\tau)$  biểu thị hệ số cô hướng chỉ ra rằng các hiệu ứng cố định lượng tử khác với các hiệu ứng cố định bình phương tối thiểu thông thường ở chỗ các hiệu ứng riêng lẻ không có sự dịch chuyển điểm. Các tham số này không phụ thuộc vào sự biến đổi theo thời gian và tác động không đồng nhất của chúng bị ảnh hưởng bởi

những thay đổi về lượng tử và phân bố có điều kiện khác nhau. Mẫu lượng tử thứ  $\tau$ , ký hiệu là  $q(\tau)$ , thu được bằng cách giải một bài toán tối ưu hóa vắn đề.

$$\min_q \sum_i \sum_t \rho \tau (R_{it} - (\delta_i + z'_{it} \gamma) q) \quad (5)$$

trong đó, hàm kiểm tra được ký hiệu là:  $\rho_\tau(A) = (\tau - 1)A I\{A \leq 0\} + T A I\{A > 0\}$ .

Tiếp theo, dựa trên mô hình đề xuất trong phương trình (1), nghiên cứu xây dựng lại mô hình bằng phương pháp MMQR bằng cách kết hợp các biến từ mô hình nghiên cứu. Chi tiết được trình bày trong phương trình (6):

$$ef_{i,t}[\alpha_i, X_{i,t}] = \alpha_{i,t} + \beta_{1\tau} dig_{i,t} + \beta_{2\tau} hdi_{i,t} + \beta_{3\tau} X_{i,t} + \varepsilon_{i,t}. \quad (6)$$

## 4. Kết quả và thảo luận

### 4.1 Thống kê mô tả

Bảng 2 cung cấp thống kê mô tả các biến nghiên cứu. Dấu chân sinh thái (ef) trung bình là 3,477 cho thấy mức tiêu thụ tài nguyên cao, tạo áp lực lớn lên hệ sinh thái. Độ lệch chuẩn của ef khá cao (2,591), dao động từ 0,44 đến 13,86, cho thấy sự không đồng nhất trong cách thức tiêu thụ tài nguyên và phát thải ô nhiễm, cũng như chính sách môi trường, công nghệ sản xuất, và thói quen tiêu dùng giữa các quốc gia Châu Á. Số hóa (dig) có mức trung bình 51,695 thể hiện mức độ số hoá khá cao trong các quốc gia nghiên cứu. Giá trị trung bình biến hdi là 0,746, với mức biến động từ 0,434 đến 0,949.

**Bảng 2. Thống kê mô tả**

Tên biến	Số quan sát	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Giá trị nhỏ nhất	Giá trị lớn nhất
ef	552	3,477	2,591	0,440	13,860
dig	552	51,695	29,187	0,214	112,85
hdi	552	0,746	0,113	0,434	0,949
pet	552	3,324	2,849	-1,609	9,823
to	552	91,301	69,652	19,560	437,327
ec	552	9,895	1,181	6,960	12,038
iv	540	34,811	12,407	16,878	74,812

*Nguồn: Tổng hợp của nhóm tác giả*

### 4.2 Kết quả hồi quy MMQR

Các kết quả từ ước tính MMQR trong Bảng 3 cho thấy những ảnh hưởng sâu sắc của số hóa và vốn nhân lực, cũng như các biến số kiểm soát đối với dấu chân sinh thái ở các nhóm phân vị khác nhau.

Số hóa cho thấy tác động tiêu cực đến dấu chân sinh thái, đặc biệt rõ rệt tại các phân vị cao từ Q70 đến Q90, hàm ý rằng số hóa có thể góp phần giảm ef thông qua việc hỗ trợ kiểm soát ô nhiễm và quản lý chất thải. Nhờ các tiến bộ công nghệ, hoạt động tái chế chất thải điện tử, tái sử dụng vật liệu và khuyến khích tiêu dùng bền vững được thúc đẩy mạnh mẽ, đồng thời làm gia tăng nhu cầu sử dụng nguyên liệu không hóa thạch trong xu thế toàn cầu hóa (Mansouri & Haseeb, 2020). Những phát hiện này phù hợp với các nghiên cứu trước (Irtysheva, 2021; Aleksandova & cộng sự, 2022; Hosan & cộng sự, 2022; Gu & cộng sự, 2017; Wen & cộng sự, 2018; Li & cộng sự, 2023). Thực tiễn từ Châu Á củng cố thêm bằng chứng cho tác động tích cực của số hóa đến phát triển bền vững. Hàn Quốc triển khai các hệ thống quản lý chất thải thông minh để theo dõi và tối ưu hóa quy trình tái chế. Tại Singapore, công nghệ ống khí nén tự động giúp vận chuyển rác đến trung tâm xử lý mà không cần xe thu gom, giảm phát thải và chi phí. Trung Quốc phát triển công nghệ điện phân chuyển carbon thành axit formic với hiệu suất cao, trong khi Nhật Bản áp dụng phân loại tự động và tái chế hiện đại để nâng cao hiệu quả và giảm khí nhà kính. Những minh chứng này cho thấy số hóa đóng vai trò thiết yếu trong quản lý chất thải, kiểm soát ô nhiễm và thúc đẩy các mô hình phát triển bền vững.

Ngược lại, vốn nhân lực lại có tác động cùng chiều với ef trên toàn bộ phân vị, nghĩa là làm gia tăng dấu chân sinh thái. Phát hiện này trái ngược với một số nghiên cứu trước, nhưng được ủng hộ bởi Hao & cộng sự (2023), Tran & Nguyen (2023) và Chen & cộng sự (2021). Tăng trưởng chỉ số hdi đi kèm với cải thiện y tế, giáo dục và thu nhập có thể làm gia tăng tiêu dùng và sản xuất, từ đó đẩy mạnh phát thải (Chen & cộng sự, 2021). Ngoài ra, các thay đổi trong lối sống, nhu cầu vận tải và tiêu dùng cao hơn trong môi trường hdi cao cũng góp phần làm tăng ef. Nếu thiếu vắng các chính sách bảo vệ môi trường nghiêm ngặt, sự phát triển vốn nhân lực có thể làm gia tăng khai thác tài nguyên và suy thoái hệ sinh thái.

**Bảng 3. Kết quả hồi quy MMQR**

Tên biến	Location	Scale	Q10	Q20	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q80	Q90
dig	-0,112 [0,0836]	-0,0368 [0,0638]	-0,0561 [0,156]	-0,0670 [0,140]	-0,0809 [0,120]	-0,0931 [0,104]	-0,106 [0,0889]	-0,118 [0,0785]	-0,131* [0,0726]	-0,151** [0,0761]	-0,173* [0,0962]
hdi	6,404*** [0,947]	1,080 [0,722]	4,778*** [1,773]	5,099*** [1,585]	5,504*** [1,359]	5,863*** [1,176]	6,241*** [1,009]	6,592*** [0,892]	6,961*** [0,825]	7,545*** [0,864]	8,204*** [1,094]
pet	-0,0011 [0,0000]	-0,004*** [0,0000]	0,005** [0,0000]	0,004* [0,0000]	0,0022 [0,0000]	0,001 [0,0000]	-0,0005 [0,0000]	-0,0018 [0,0000]	-0,003*** [0,0000]	-0,005*** [0,0000]	-0,008*** [0,0000]
to	-0,008*** [0,0016]	0,0004 [0,0012]	-0,0075*** [0,0029]	-0,0079*** [0,0026]	-0,0078*** [0,0022]	-0,0077*** [0,0019]	-0,0076*** [0,0016]	-0,007*** [0,0015]	-0,007*** [0,0013]	-0,007*** [0,0014]	-0,007*** [0,0018]
ec	0,005*** [0,0000]	0,001** [0,0000]	0,004*** [0,0000]	0,0045*** [0,0000]	0,0047*** [0,0000]	0,0049*** [0,0000]	0,0051*** [0,0000]	0,0053*** [0,0000]	0,0055*** [0,0000]	0,0058*** [0,0000]	0,006*** [0,0000]
iv	0,018*** [0,0058]	0,001 [0,0044]	0,0163 [0,0108]	0,0166* [0,0097]	0,0170** [0,0083]	0,0174** [0,0072]	0,0177*** [0,0062]	0,0181*** [0,0054]	0,0184*** [0,0050]	0,019*** [0,0053]	0,0196*** [0,0067]
Hàng số	-3,15*** [0,660]	-0,465 [0,503]	-2,445** [1,233]	-2,584** [1,103]	-2,758*** [0,946]	-2,913*** [0,818]	-3,075*** [0,702]	-3,226*** [0,620]	-3,385*** [0,574]	-3,636*** [0,601]	-3,92*** [0,76]

Chú thích: \*\*\*, \*\*, \* biểu thị mức ý nghĩa tương ứng 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tổng hợp của nhóm tác giả

**Bảng 4. Kết quả hồi quy MMQR với thước đo số hoá thay thế**

Tên biến	Location	Scale	Q10	Q20	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q80	Q90
ict	-0,034**	-0,0091	-0,0199	-0,0236	-0,0270	-0,0298*	-0,0327**	-0,0358**	-0,039***	-0,0428**	-0,0482**
	[0,0147]	[0,0135]	[0,0278]	[0,0233]	[0,0196]	[0,0170]	[0,0150]	[0,0141]	[0,0147]	[0,0172]	[0,0227]
hdi	7,357***	1,385	5,267**	5,828***	6,340***	6,774***	7,216***	7,684***	8,159***	8,767***	9,580***
	[1,230]	[1,130]	[2,326]	[1,950]	[1,640]	[1,419]	[1,257]	[1,182]	[1,227]	[1,440]	[1,903]
pet	0,003	-0,002	0,006	0,005	0,004	0,0035	0,003	0,002	0,001	0,0005	-0,0008
	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]
to	-0,01***	0,0003	-0,0074	-0,0074*	-0,0074**	-0,007***	-0,007***	-0,007***	-0,007***	-0,007***	-0,007**
	[0,0024]	[0,0022]	[0,0045]	[0,0038]	[0,0032]	[0,0028]	[0,0024]	[0,0023]	[0,0024]	[0,0028]	[0,0037]
ec	0,005***	0,0005	0,0044***	0,0046***	0,0048***	0,005***	0,0051***	0,0053***	0,0055***	0,0057***	0,006***
	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]	[0,0000]
iv	0,0122	-0,0034	0,0172	0,0159	0,0146	0,0136	0,0125	0,0114	0,0102	0,0088	0,0068
	[0,0090]	[0,0082]	[0,0170]	[0,0142]	[0,0120]	[0,0103]	[0,0092]	[0,0086]	[0,0089]	[0,0105]	[0,0138]
Hàng số	-3,37***	-0,419	-2,734**	-2,904**	-3,058***	-3,189***	-3,323***	-3,465***	-3,608***	-3,792***	-4,038***
	[0,733]	[0,673]	[1,394]	[1,168]	[0,982]	[0,850]	[0,752]	[0,707]	[0,734]	[0,862]	[1,136]

Chú thích: \*\*\*, \*\*, \* biểu thị mức ý nghĩa tương ứng 1%, 5% và 10%.

Nguồn: Tổng hợp của nhóm tác giả

Đối với các biến kiểm soát, phát triển công nghệ sinh thái có tác động ngược chiều đến ef, với ảnh hưởng khác nhau tùy thuộc vào phân vị. Tại các phân vị thấp như Q10 và Q20, tác động của pet có thể là cùng chiều ở mức thấp hoặc không rõ ràng, nhưng ở các phân vị cao như Q80 và Q90, pet có thể gây tác động ngược chiều đáng kể đến ef. Phù hợp với phát hiện của Zeng & cộng sự (2022) cho thấy rằng sự phát triển công nghệ có thể không đồng đều và phụ thuộc vào mức độ phát triển của từng quốc gia. Độ mở thương mại cũng cho thấy tác động ngược chiều đến ef, bởi nó cho phép tiếp thu công nghệ tiên tiến và thúc đẩy cạnh tranh nhằm đạt tiêu chuẩn môi trường (Khan & Ozturk, 2021). Ngược lại, tiêu dùng năng lượng và giá trị gia tăng công nghiệp có tác động cùng chiều mạnh mẽ đến ef. Điều này được khẳng định trong các nghiên cứu trước đây, rằng gia tăng công nghiệp và tiêu dùng năng lượng, đặc biệt là năng lượng không tái tạo, làm gia tăng tác động tiêu cực đến môi trường dẫn đến việc tăng ef (Ahmad & cộng sự, 2020).

### **4.3 Kiểm định tính vững**

#### *4.3.1 Kiểm định tính vững bằng cách thay thế thước đo số hóa*

Để kiểm tra tính vững của kết quả thu thập được, nghiên cứu tiến hành thay thế thước đo số hoá tổng hợp dig bằng thước đo số hoá ict (% đăng ký bằng thông rộng cố định) và ước lượng mô hình với MMQR. Bảng 4 trình bày kết quả ước lượng. Nhất quán với kết quả ban đầu, số hoá (ict) tác động ngược chiều đến dấu chân sinh thái. Cùng với đó, hdi có tác động cùng chiều mạnh mẽ đến ef. Những phát hiện về tác động của các biến kiểm soát tương đồng với ước tính trước đó, trong đó tiêu dùng năng lượng và giá trị gia tăng công nghiệp có tác động cùng chiều rõ ràng, độ mở thương mại có tác động ngược chiều đến dấu chân sinh thái.

#### *4.3.2 Kiểm định tính vững bằng phương pháp System GMM (S-GMM)*

Để kiểm tra tính chắc chắn của kết quả nghiên cứu từ ước tính MMQR và giải quyết các tiềm năng vấn đề nội sinh trong mô hình nghiên cứu, nghiên cứu áp dụng phương pháp S-GMM. Kết quả kiểm định tính vững sử dụng S-GMM được tóm tắt trong Bảng 5. Một lần nữa, nhất quán với kết quả từ các ước tính của MMQR, hdi có tác động cùng chiều mạnh mẽ đến ef. Ngược lại, dig lại có tác động ngược chiều đến ef. Những phát hiện về tác động của các biến kiểm soát hoàn toàn tương tự kết quả ước tính trước đó của MMQR, trong đó tiêu dùng năng lượng và giá trị gia tăng công nghiệp có tác động cùng chiều rõ ràng, độ mở thương mại và công nghệ sinh thái có tác động ngược chiều đến dấu chân sinh thái.

Các thử nghiệm AR (2) và thử nghiệm Hansen không cho thấy sự phản kháng mạnh mẽ đối với mô hình, ngụ ý rằng mô hình System GMM được xây dựng là phù hợp và có khả năng giải thích tốt mối quan hệ giữa biến độc lập và biến phụ thuộc.

**Bảng 5. Kiểm định tính vững với SGMM**

<b>Biến phụ thuộc:</b> Dầu chân sinh thái	<b>S-GMM</b>
ef (t-1)	0,8474***[88,28]
dig	-0,0615***[-6,71]
hdi	1,3480***[8,70]
pet	0,0003***[2,19]
to	-0,0010***[-6,77]
ec	0,007***[12,21]
iv	0,0052***[8,90]
Const	-0,8335***[8,90]
Số quan sát	518
AR (2) test (p-value)	0,92 (0,357)
Hansen test (p-value)	18,09 (0,998)

*Chú thích: Sai số chuẩn trong [], giá trị p trong (), \*\*\* biểu thị mức ý nghĩa 1%.*

*Nguồn: Tính toán của nhóm tác giả*

## **5. Hàm ý chính sách và kết luận**

Nghiên cứu này xem xét tác động của số hóa và vốn nhân lực đến môi trường bền vững tại 23 quốc gia Châu Á giai đoạn 2000-2023, sử dụng phương pháp MMQR và S-GMM để phân tích mối quan hệ thông qua thước đo dầu chân sinh thái. Kết quả từ mô hình MMQR cho thấy số hóa có tác động tiêu cực đến dầu chân sinh thái trên hầu hết các phân vị, hàm ý rằng số hóa đóng vai trò tích cực trong việc thúc đẩy môi trường bền vững. Ngược lại, vốn nhân lực lại có tác động tiêu cực đến môi trường bền vững do đi kèm với sự gia tăng tiêu dùng và sản xuất. Ngoài ra, phát triển công nghệ sinh thái và độ mở thương mại góp phần làm giảm dầu chân sinh thái ở các phân vị cao, trong khi tiêu thụ năng lượng và giá trị gia tăng công nghiệp lại làm gia tăng áp lực môi trường. Kết quả từ S-GMM nhất quán với MMQR, khẳng định tính dự đoán của các biến giải thích liên quan đến phát triển bền vững.

Dựa trên các phát hiện này, một số khuyến nghị được đề xuất cho các nhà hoạch định chính sách ở Châu Á. Thứ nhất, tuy HDI thường được xem là biểu hiện của chất lượng sống tốt hơn, nhưng nếu thiếu chính sách kiểm soát tác động môi trường, sự gia tăng HDI có thể kéo theo gia tăng dầu chân sinh thái, làm tổn hại đến hệ sinh thái và tài nguyên. Thứ hai, các chính phủ cần thúc đẩy quá trình số hóa gắn liền với phát triển công nghệ thân thiện môi trường, khuyến khích đổi mới sáng tạo và nâng cấp trang thiết

bị hiện đại, đặc biệt trong lĩnh vực năng lượng. Đồng thời, việc thiết lập các tiêu chuẩn nghiêm ngặt hơn trong quản lý môi trường doanh nghiệp là điều cần thiết.

Nghiên cứu đã đóng góp vào việc làm rõ vai trò của số hóa và vốn nhân lực đối với môi trường bền vững qua chỉ số EF. Tuy nhiên, do tính khả dụng của dữ liệu, phạm vi nghiên cứu chỉ giới hạn ở 23 quốc gia Châu Á, gợi mở hướng nghiên cứu tương lai về việc mở rộng dữ liệu quốc gia và xem xét thêm các chỉ số phát triển bền vững và vốn nhân lực chi tiết hơn nhằm hỗ trợ xây dựng chính sách tối ưu.

### **Tài liệu tham khảo**

- Aalbers, R., Dolfsma, W. & Koppius, O. (2013), "Individual connectedness in innovation networks: on the role of individual motivation", *Research Policy*, Vol. 42 No. 3, pp. 624-634.
- Adebayo, T.S., Meo, M.S., Eweade, B.S. & Özkan, O. (2024), "Analyzing the effects of solar energy innovations, digitalization, and economic globalization on environmental quality in the United States", *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 26, pp. 4157-4176.
- Ahmed, Z. & Le, H.P. (2020), "Linking Information Communication Technology, trade globalization index, and CO2 emissions: evidence from advanced panel techniques", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28 No. 7, pp. 8770-8781.
- Ahmed, Z., Nathaniel, S.P. & Shahbaz, M. (2021), "The criticality of information and communication technology and human capital in environmental sustainability: evidence from Latin American and Caribbean countries", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 286, 125529.
- Ahmed, Z. & Wang, Z. (2019), "Investigating the impact of human capital on the ecological footprint in India: An empirical analysis", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26 No. 26, pp. 26782-26796.
- Aldakhil, A.M., Zaheer, A., Younas, S., Nassani, A.A., Abro, M.M.Q. & Zaman, K. (2019), "Efficiently managing green information and communication technologies, high-technology exports, and research and development expenditures: a case study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 240, 118164.
- Aleksandrova, A., Truntsevsky, Y. & Polutova, M. (2022), "Digitalization and its impact on economic growth", *Brazilian Journal of Political Economy*, Vol. 42 No. 2, pp. 424-441.
- Appiah-Twum, F. & Long, X. (2023), "Human capital, trade competitiveness and environmental efficiency convergence across Asia Pacific Countries", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 85, pp. 109-132.
- Asongu, S.A., Le Roux, S. & Biekpe, N. (2018), "Enhancing ICT for environmental sustainability in sub-Saharan Africa", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 127, pp. 209-216.
- Bano, S., Zhao, Y., Ahmad, A., Wang, S. & Liu, Y. (2018), "Identifying the impacts of human capital on carbon emissions in Pakistan", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 183, pp. 1082-1092.

- Brozyna, J., Mentel, G. & Szetela, B. (2017), “Renewable energy and economic development in the European Union”, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 14 No. 7, pp. 11-34.
- Capozza, C. & Divella, M. (2019), “Human capital and firms’ innovation: evidence from emerging economies”, *Economics of Innovation and New Technology*, Vol. 28 No. 7, pp. 741-757.
- Chankrajang, T. & Muttarak, R. (2017), “Green returns to education: Does schooling contribute to pro-environmental behaviours? Evidence from Thailand”, *Ecological Economics*, Vol. 131, pp. 434-448.
- Chen, X., Despeisse, M. & Johansson, B. (2020), “Environmental sustainability of digitalization in manufacturing: a review”, *Sustainability*, Vol. 12 No. 24, pp. 1-33.
- Danish. (2019), “Effects of information and communication technology and real income on CO2 emissions: the experience of countries along Belt and Road”, *Telematics and Informatics*, Vol. 45, 101300.
- Dedrick, J. (2010), “Green IS: concepts and issues for information systems research”, *Communications of the Association for Information Systems*, Vol. 27, pp. 173-184.
- Desha, C., Robinson, D. & Sproul, A. (2015), “Working in partnership to develop engineering capability in energy efficiency”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 106, pp. 283-291.
- Esquivias, M.A., Sugiharti, L., Rohmawati, H., Rojas, O. & Sethi, N. (2022), “Nexus between technological innovation, renewable energy, and human capital on environmental sustainability in emerging Asian economies: a panel quantile regression approach”, *Energies*, Vol. 15 No. 7, 2451.
- Fareed, Z., Meo, M.S., Shahzad, F. & Goh, S.K. (2022), “Financial inclusion and environmental deterioration in the Eurozone: the moderating role of innovation activity”, *Technology in Society*, Vol. 68, 101901.
- Gao, D., Li, G. & Yu, J. (2022), “Does digitization improve green total factor energy efficiency? Evidence from Chinese 213 cities”, *Energy*, Vol. 247, 123395.
- Grossman, G. & Krueger, A. (1991), “Environmental impacts of a north american free trade agreement”, *National Bureau of Economic Research*, Working paper, No. 3914.
- Gu, F., Ma, B., Guo, J., Summers, P.A. & Hall, P. (2017), “Internet of things and Big Data as potential solutions to the problems in waste electrical and electronic equipment management: an exploratory study”, *Waste Management*, Vol. 68, pp. 434-448.
- Haftu, G.G. (2019), “Information communications technology and economic growth in Sub-Saharan Africa: a panel data approach”, *Telecommunications Policy*, Vol. 43 No. 1, pp. 88-99.
- Hao, X., Yang, X., Kou, K., Zhang, Y. & Guo, C. (2023), “Research on the Contribution Mechanism of Vocational HumanCapital Characteristics to Income”, *Education Sciences*, Vol. 13 No. 3, 246.
- Hosan, S., Karmaker, S.C., Rahman, M.M., Chapman, A.J. & Saha, B.B. (2022), “Dynamic links among the demographic dividend, digitalization, energy intensity and sustainable economic growth: empirical evidence from emerging economies”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 330, 129858.

- Hồ, T.L., Lê, H.N. & Nguyễn, M.H.T. (2024), “Tác động môi trường của tăng trưởng kinh tế: Tiếp cận bằng mô hình ngưỡng băng động”, *Tạp chí Khoa học và Đào tạo Ngân hàng*, Vol. 260+261, pp. 96-108.
- Huang, C., Wang, C. & Rehman, S.A.U. (2024), “Digitalization's role in shaping climate change, renewable energy, and technological innovation for achieving sustainable development in top Asian countries”, *Energy & Environment*, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0958305X241258799>, truy cập ngày 02/10/2024.
- Irtysheva, I., Stehnei, M., Cterheh, Mapiahha Ibahibha, Popadynet, N., Bogatyrev, K., Boiko, Y., Kramarenko, I., Senkevich, O., Hryshyna, N., Kozak, I. & Ishchenko, O. (2021), “The effect of digital technology development on economic growth”, *International Journal of Data and Network Science*, pp. 25-36.
- Jevons, W.S. (1865), *The Coal Question: an Inquiry Concerning the Progress of The Nation, and The Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, Macmillan.
- Jorisch, D., Malin, C., Accurso, M., Zaballos, A.G. & Rodríguez, E.I. (2018), *Tecnología Para La Acción Climática En América Latina Y El Caribe*, GSM Association.
- Khan, M. & Ozturk, I. (2021), “Examining the direct and indirect effects of financial development on CO2 emissions for 88 developing countries”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 293, 112812.
- Koengkan, T., Fuinhas, J.A., Auza, A. & Ursavaş, U. (2023), “The impact of energy efficiency regulations on energy poverty in residential dwellings in the lisbon metropolitan area: an empirical investigation”, *Sustainability*, Vol. 15 No. 5, pp. 4214-4214.
- Koenker, R. & Hallock, K. (2001), “Quantile regression”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 15, pp. 143-156.
- Kouladoun, J.C., Wirajing, M.A.K. & Nchofoung, T.N. (2022), “Digital technologies and financial inclusion in Sub-Saharan Africa”, *Telecommunications Policy*, 102387.
- Kouton, J. (2019), “Information communication technology development and energy demand in African countries”, *Energy*, Vol. 189, 116192.
- Kurniawan, T.A., Maiurova, A., Kustikova, M., Bykovskaia, E., Othman, M.H.D. & Goh, H.H. (2022), “Accelerating sustainability transition in St. Petersburg (Russia) through digitalization-based circular economy in waste recycling industry: a strategy to promote carbon neutrality in era of Industry 4.0”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 363, 132452.
- Li, W., Cao, N. & Xiang, Z. (2023), “Drivers of renewable energy transition: the role of ICT, human development, financialization, and R&D investment in China”, *Renewable Energy*, Vol. 206, pp. 441-450.
- Lucas, R.E. (1988), “On the mechanics of economic development”, *Journal of Monetary Economics*, Vol. 22 No. 1, pp. 3-42.
- Machado, J.A.F. & Santos Silva, J.M.C. (2019), “Quantiles via moments”, *Journal of Econometrics*, Vol. 213 No. 1, pp. 145-173.
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018), “The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010-2015”, *Sustainability*, Vol. 10 No. 9, 3027.

- Mann, C.L. & Kirkegaard, J.F. (2006), *Accelerating the Globalization of America: the Role of Information Technology*, Peterson Institute for International Economics.
- Martynenko, T.S. & Vershinina, I.A. (2018), “Digital economy: the possibility of sustainable development and overcoming social and environmental inequality in Russia”, *Revista ESPACIOS*, Vol. 39 No. 44, pp. 12-20.
- Tariq, N., Ali, M. & Usman, M. (2024), “Impact of human capital and natural resources on environmental quality in South Asia”, *Environment, Development and Sustainability*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-04930-w>, truy cập ngày 02/10/2024.
- Notley, T. (2019), “The environmental costs of the global digital economy in Asia and the urgent need for better policy”, *Media International Australia*, Vol. 173 No. 1, pp. 125-141.
- Ozcan, B. & Apergis, N. (2017), “The impact of internet use on air pollution: evidence from emerging countries”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25 No. 5, pp. 4174-4189.
- Panayotou, T. (1997), “Taking stock of trends in sustainable development finance since rio”, *Harvard Institute for International Development*, [https://www.academia.edu/69281352/Taking\\_stock\\_of\\_trends\\_in\\_sustainable\\_development\\_finance\\_since\\_Rio](https://www.academia.edu/69281352/Taking_stock_of_trends_in_sustainable_development_finance_since_Rio), truy cập ngày 02/10/2025.
- Park, Y., Meng, F. & Baloch, M.A. (2018), “The effect of ICT, financial development, growth, and trade openness on CO2 emissions: an empirical analysis”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25 No. 30, pp. 30708-30719.
- Partel, V., Charan Kakarla, S. & Ampatzidis, Y. (2019), “Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence”, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 157, pp. 339-350.
- Pata, U.K. & Unal, O. (2023), “Enhancing environmental quality in the United States by linking biomass energy consumption and load capacity factor”, *Geoscience Frontiers*, Vol. 14 No. 6, 101041.
- Payab, A.H., Kautish, P., Sharma, R., Siddiqui, A., Mehta, A. & Siddiqui, M. (2023), “Does human capital complement sustainable development goals? Evidence from leading carbon emitter countries”, *Utilities Policy*, Vol. 81, 101509.
- Raheem, I.D., Tiwari, A.K. & Balsalobre-Lorente, D. (2019), “The role of ICT and financial development in CO2 emissions and economic growth”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27 No. 2, pp. 1912-1922.
- Ulucak, R., Danish & Khan, S. (2020), “Does information and communication technology affect CO 2 mitigation under the pathway of sustainable development during the mode of globalization?”, *Sustainable Development*, Vol. 28 No. 4, pp. 857-867.
- Romer, P.M. (1990), “Endogenous technological change”, *Journal of Political Economy*, Vol. 98 No. 5 (Part 2), pp. S71-S102.
- Salahuddin, M. & Gow, J. (2014), “Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in Gulf Cooperation Council countries”, *Energy*, Vol. 73, pp. 44-58.
- Schanes, K., Giljum, S. & Hertwich, E. (2016), “Low carbon lifestyles: a framework to structure consumption strategies and options to reduce carbon footprints”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 139, pp. 1033-1043.

- Shabani, Z. & Shahnazi, R. (2019), “Energy consumption, carbon dioxide emissions, information and communications technology, and gross domestic product in Iranian economic sectors: a panel causality analysis”, *Energy*, Vol. 169, pp. 1064-1078.
- Shahbaz, M., Nasir, M.A., Hille, E. & Mahalik, M.K. (2020), “UK’s net-zero carbon emissions target: Investigating the potential role of economic growth, financial development, and R&D expenditures based on historical data (1870-2017)”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 161, 120255.
- Shahbaz, M., Dogan, E., Akkus, H.T. & Gursoy, S. (2019), “The effect of financial development and economic growth on ecological footprint: evidence from top 10 emitter countries”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26 No. 24, pp. 24612-24630.
- Sharma, R., Shahbaz, M., Kautish, P. & Vo, X.V. (2021), “Analyzing the impact of export diversification and technological innovation on renewable energy consumption: Evidences from BRICS nations”, *Renewable Energy*, Vol. 178, pp. 1034-1045.
- Sidek, N.M., Hasanah, A. & Othman, M.H. (2024), “Navigating the green frontier: the impact of digitalization on environmental pollution in selected South East Asian economies”, *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, Vol. 8 No. 10, pp. 2771-2783.
- Škare, M., Gavurova, B. & Porada-Rochon, M. (2024), “Digitalization and carbon footprint: Building a path to a sustainable economic growth”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 199, 123045.
- Sui, D.Z. & Rejeski, D.W. (2002), “Environmental Impacts of the Emerging Digital Economy: The E-for-Environment E-Commerce?”, *Environmental Management*, Vol. 29 No. 2, pp. 155-163.
- Sun, Q., Ma, R., Xi, Z., Wang, H., Jiang, C. & Chen, H. (2023), “Nonlinear impacts of energy consumption and globalization on ecological footprint: empirical research from BRICS countries”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 396, pp. 136488-136488.
- Sun, X., Xiao, S., Ren, X. & Xu, B. (2023), “Time-varying impact of information and communication technology on carbon emissions”, *Energy Economics*, Vol. 118, pp. 106492.
- Schumpeter, J.A. (1942), *Capitalism, Socialism, and Democracy*, Harper & Brothers.
- Tran, T.T.K. & Nguyen, T.H.H. (2023), “Impact of income inequality on climate change in Asia: the role of human capital”, *Humanities and Social Sciences Communications*, Vol. 10, 461.
- Usman, M., Ozturk, I. & Fareed, Z. (2022), “Digitalization and environmental sustainability: Does internet usage contribute to ecological footprints in G-7 countries?”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 347, 131281.
- Weiss, E.B. (1992), “Environment and trade as partners in sustainable development: a commentary”, *The American Journal of International Law*, Vol. 86 No. 4, 728.
- Wen, H., Lee, C.C. & Song, Z. (2021), “Digitalization and environment: how does ICT affect enterprise environmental performance?”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28 No. 39, pp. 54826-54841.

- Wen, Z., Hu, S., De Clercq, D., Beck, M.B., Zhang, H., Zhang, H., Fei, F. & Liu, J. (2018), “Design, implementation, and evaluation of an Internet of Things (IoT) network system for restaurant food waste management”, *Waste Management*, Vol. 73, pp. 26-38.
- World Bank (2021), “World Development Indicators”, <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=EN.GHG.CO2.PC.CE.AR5&country=>, truy cập ngày 05/10/2024.
- Yang, B., Usman, M. & jahanger, A. (2021), “Do industrialization, economic growth and globalization processes influence the ecological footprint and healthcare expenditures? Fresh insights based on the STIRPAT model for countries with the highest healthcare expenditures”, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 28, pp. 893-910.
- Yao, Y., Ivanovski, K., Inekwe, J. & Smyth, R. (2020), “Human capital and CO2 emissions in the long run”, *Energy Economics*, Vol. 91, 104907.