



DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.ssh.3436.2038>

SỬ DỤNG CÔNG CỤ AI THIẾT KẾ HỌC LIỆU SỐ HỖ TRỢ DẠY HỌC PHÂN HÓA TRONG DẠY HỌC MÔN KHOA HỌC LỚP 4 THEO MÔ HÌNH VARK

Nguyễn Minh Giang^{1*}, Trịnh Thị Hồng Nhung²,
Cao Xuân Hiếu² và Huỳnh Nhạc Bảo Châu²

¹Khoa Giáo dục Tiểu học, Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Sinh viên Khoa Giáo dục Tiểu học, Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ, Email: giangnm@hcmue.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 21/5/2026; Ngày nhận chỉnh sửa: 07/8/2026; Ngày duyệt đăng: 25/8/2026

Tóm tắt

Nghiên cứu sử dụng các công cụ AI để xây dựng học liệu số hỗ trợ giáo viên tổ chức dạy học phân hóa trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK nhằm phát triển năng lực khoa học tự nhiên cho học sinh. Sử dụng phương pháp nghiên cứu lý luận để xây dựng cơ sở lý thuyết, phương pháp khảo nghiệm, phương pháp thống kê để đánh giá tính phù hợp và hiệu quả sử dụng bộ học liệu số đã thiết kế. Dựa trên nguyên tắc và quy trình thiết kế, nghiên cứu đã xây dựng và thiết kế bộ học liệu số theo 3 chủ đề trong môn Khoa học 4. Mỗi chủ đề đều bao gồm 4 loại hình học liệu tương ứng với từng phong cách V-A-R-K, nhằm hỗ trợ giáo viên triển khai dạy học phân hóa một cách khoa học và hiệu quả theo nhu cầu tiếp nhận thông tin đa dạng của học sinh. Kết quả cho thấy sản phẩm có tính đầy đủ, hữu dụng, thẩm mỹ, là nguồn công cụ hỗ trợ tích cực giúp giáo viên thiết kế bài dạy đáp ứng nhiều phong cách học tập khác nhau.

Từ khóa: AI, Dạy học phân hóa, học liệu số, giáo dục tiểu học, Khoa học lớp 4, VARK

Trích dẫn: Nguyễn, M. G., Trịnh, T. H. N., Cao, X. H., & Huỳnh, N. B. C. (2026). Sử dụng công cụ AI thiết kế học liệu số hỗ trợ dạy học phân hóa trong dạy học môn Khoa học lớp 4 theo mô hình Vark. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp - Chuyên san Khoa học Xã hội và Nhân văn, Online First*, 1-14. <https://doi.org/10.52714/dthu.ssh.3436.2038>

Copyright © 2026 The author(s). This work is licensed under a CC BY-NC 4.0 License.

USING AI TO DESIGN DIGITAL LEARNING MATERIALS SUPPORTING DIFFERENTIATED INSTRUCTION IN GRADE 4 SCIENCE BASED ON THE VARK MODEL

**Nguyen Minh Giang^{1*}, Trinh Thi Hong Nhung²,
Cao Xuan Hieu², and Huynh Nhac Bao Chau²**

¹*Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam*

²*Faculty of Primary Education, Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam*

**Corresponding author, Email: giangnm@hcmue.edu.vn*

Article history

Received: 21/5/2026; Received in revised form: 07/8/2026; Accepted: 25/8/2026

Abstract

This study examines the use of AI tools to design digital learning materials supporting teachers in organizing differentiated instruction in Grade 4 Science based on the VARK model, while also contributing to the development of students' natural science competencies. The research methods included theoretical research to build the theoretical foundation, practical research and mathematical statistics to establish the practical basis and evaluate the product. Based on the principles and design process, the study has designed and developed a set of digital learning materials for three topics in Grade 4 Science. Each set includes four types of learning resources corresponding to the V-A-R-K learning styles, which will support teachers in implementing differentiated instruction in a scientific and effective way, tailored to the diverse information reception needs of students. The results show that the product is comprehensive, useful, and aesthetically pleasing, serving as a positive support tool that helps teachers design lessons to meet diverse learning styles.

Keywords: *AI, differentiated instruction, digital learning materials, primary education, Grade 4 science, VARK.*

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh chuyển đổi số đang diễn ra mạnh mẽ, việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong giáo dục trở thành một xu hướng tất yếu nhằm nâng cao chất lượng và hiệu quả dạy học. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã khai thác mối quan hệ đồng thiết kế giữa con người và AI trong dạy học nhằm giảm tải khối lượng công việc của giáo viên (GV) cũng như đổi mới sáng tạo trong giáo dục. Tổng hợp và phân tích 28 nghiên cứu thực nghiệm được công bố từ năm 2015 đến 2025, Wang và cộng sự (2026) chỉ ra rằng AI tạo sinh (GenAI) hiện đóng vai trò chủ đạo trong việc hỗ trợ GV lập kế hoạch bài dạy, tạo câu lệnh và phát triển ý tưởng dạy học. Kết quả này giúp tối ưu hóa hiệu quả, sự sáng tạo, sự phản hồi linh hoạt và tính công bằng trong giáo dục. Tương tự, Kibar (2026) khi phân tích 28 nghiên cứu từ 2020 đến 2025 cũng khẳng định vai trò AI góp phần tăng hiệu suất, tăng tính sáng tạo trong quá trình thiết kế bài dạy, hỗ trợ điều chỉnh chiến lược dựa trên hiệu suất đồng thời giúp GV có cái nhìn đa chiều và toàn diện hơn trong khi quyền kiểm soát cuối cùng vẫn thuộc về họ.

Dạy học phân hóa (DHPH) đã được triển khai ở nhiều quốc gia trên thế giới. Tổng hợp số liệu từ 14 quốc gia thuộc 5 châu lục khẳng định DHPH đã vượt ra khỏi phạm vi lý thuyết để trở thành một chiến lược giảng dạy toàn diện có giá trị toàn cầu (Letzel-Alt, 2022). Ở Việt Nam, DHPH ở tiểu học nhằm góp phần nâng cao hiệu quả dạy và học cũng đã được khẳng định thông qua các công trình nghiên cứu trong môn Toán (Lê, 2012) và môn Khoa học lớp 4 (Trần, 2016). Tuy nhiên, việc triển khai DHPH ở Việt Nam hiện nay vẫn còn những hạn chế nhất định đòi hỏi GV không những phải có sự am hiểu về phương pháp dạy học mà còn phải có kỹ năng thiết kế dạy, kiểm tra, đánh giá đáp ứng sự đa dạng của học sinh (HS) trong dạy học. Bên cạnh đó, sự thiếu hụt về cơ sở vật chất và nguồn lực, đặc biệt là những vùng nông thôn hay khu vực kinh tế khó khăn, cũng là những rào cản để triển khai dạy học phân hóa theo nhu cầu của HS trong thực tiễn (Vũ, 2024).

Mô hình VARK (viết tắt của các từ Visual (Thị giác) - Auditory (Thính giác) - Read/Write (Đọc/viết) - Kinesthetic (Vận động)) được phát triển bởi Fleming là mô hình xác định phong cách học tập đặc trưng của từng HS (Fleming, 2001). Khi áp dụng mô hình VARK trong dạy học, GV sẽ tìm ra được phong cách học tập đặc trưng của từng HS, từ đó thiết kế các hoạt động dạy học một cách linh hoạt để khơi gợi hứng thú, tăng cường sự tham gia chủ động của HS và góp phần nâng cao chất lượng dạy học (Phạm, 2024). Để tối ưu hóa khả năng tiếp thu tri thức của nhiều phong cách học tập ở HS theo mô hình VARK, GV cần phải có sử dụng các phương pháp dạy học và học liệu phù hợp khi triển khai dạy học. Đặc biệt, từng HS sẽ phát triển tối ưu khả năng lĩnh hội kiến thức một cách toàn diện phù hợp với phong cách học tập thông qua quan sát, nghe, đọc/viết hay vận động từ nhiều loại học liệu phù hợp. Do đó, muốn triển khai DHPH theo mô hình VARK một cách hiệu quả, GV cần chuẩn bị nhiều loại học liệu phù hợp với phong cách học tập khác nhau của HS trong một hoạt động dạy học.

Với sự phát triển của công nghệ thông tin hiện nay, đặc biệt là sự ra đời của trí tuệ nhân tạo (AI) giúp GV có thể tạo ra nhiều loại học liệu số (HLS) cho một hoạt động dạy học phù hợp với nhiều phong cách học tập của HS. HLS đóng vai trò vô cùng quan trọng trong việc trực quan hóa kiến thức (Nguyễn & cs., 2025), khắc phục những hạn chế về không gian và thời gian thực hành, nâng cao hiệu quả giảng dạy và góp phần tạo hứng thú cho HS (Phan & cs., 2025) và phát triển toàn diện các năng lực và phẩm chất của HS (Phạm & cs., 2024).

Theo Chương trình Giáo dục phổ thông 2018, môn Khoa học lớp 4 giúp hình thành và phát triển ở HS năng lực khoa học tự nhiên gồm: Nội dung môn học gắn liền là các sự vật, hiện tượng, các quá trình, quy luật xảy ra trong tự nhiên (Bộ Giáo dục và Đào tạo, 2018b). Do đó, để giúp cho việc tổ chức các hoạt động dạy học tốt nhất, phù hợp với từng phong cách học tập của HS theo mô hình VARK, GV cần xây dựng và sử dụng các học liệu như

hình ảnh, sơ đồ, video, thí nghiệm, văn bản đọc,... Tuy nhiên, việc xây dựng và ứng dụng HLS của GV cũng gặp một số thách thức như hạn chế về kỹ năng công nghệ thông tin, cơ sở vật chất và sự đa dạng của nguồn tài liệu (Phan & cs., 2025). Do đó, nghiên cứu “Sử dụng công cụ AI thiết kế HLS hỗ trợ DHPH trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK” sẽ cung cấp nguồn học liệu dạy học hỗ trợ GV thực hiện DHPH một cách hiệu quả đáp ứng yêu cầu phát triển năng lực khoa học cho HS.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp nghiên cứu lý luận

Nghiên cứu tiến hành thu thập, phân tích, tổng hợp các tài liệu, sách, bài báo khoa học,... trong và ngoài nước có liên quan đến DHPH, mô hình VARK, thiết kế HLS, năng lực khoa học tự nhiên, chương trình môn Khoa học,... để xây dựng cơ sở lý luận cho thiết kế HLS hỗ trợ DHPH trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK.

2.2. Phương pháp tham vấn chuyên gia

Để xác định sự phù hợp, tính khả thi và hiệu quả của bộ HLS đã thiết kế cho 3 chủ đề: Nấm và Vi khuẩn; Con người và sức khỏe; Sinh vật và môi trường trong môn Khoa học lớp 4, nghiên cứu tiến hành tham vấn 50 GV tiểu học đang dạy lớp 4 tại Thành phố Hồ Chí Minh. Trong đó, có 23 GV có kinh nghiệm trên 10 năm, 19 GV có kinh nghiệm từ 5 đến 10 năm và 8 GV có kinh nghiệm dưới 5 năm. Ý kiến của GV tiểu học được thu thập bằng cách cung cấp cho GV đường link về bộ HLS đã thiết kế kèm hướng dẫn sử dụng. Sau khi GV nghiên cứu bộ HLS cho từng bài sẽ trả lời các câu hỏi khảo sát qua Google Forms và phiếu giấy về tính đầy đủ, tính hữu dụng, tính thẩm mỹ và tính hiệu quả để có thể sử dụng thường xuyên trong thực tế.

2.3. Phương pháp thống kê

Để xử lý và phân tích kết quả định lượng, nghiên cứu tiến hành tính tỉ lệ phần trăm, tính điểm trung bình (ĐTB), độ lệch chuẩn (ĐLC) bằng phần mềm Microsoft Excel. Thang đo được sử dụng là thang đo Likert với 5 mức độ. Quy ước ĐTB thành các mức độ ý kiến như sau: Từ 1,0 đến 1,8: Rất không đồng ý (RKĐY)/Không bao giờ (KBG); Từ trên 1,8 đến 2,6: Không đồng ý (KĐY)/Thỉnh thoảng (TT); Từ trên 2,6 đến 3,4: Trung lập (TL)/Bình thường (BT); Từ 3,4 đến 4,2: Đồng ý (ĐY)/Thường xuyên (TX); Từ trên 4,2 đến 5,0: Rất đồng ý (RĐY)/Rất thường xuyên (RTX). ĐLC được sử dụng để đánh giá mức độ biến động về sự lựa chọn đáp án của GV.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Một số khái niệm

3.1.1. Học liệu số

Theo Bộ Giáo dục và Đào tạo (2017), HLS bao gồm tập hợp các giáo trình, sách giáo khoa điện tử, bản trình chiếu, tệp âm thanh, video, thí nghiệm mô phỏng và các ứng dụng số hóa khác. HLS được phân chia thành nhiều loại hình như: dạng tài liệu, dạng trực quan, dạng âm thanh, dạng tương tác, dạng câu hỏi đánh giá, dạng tích hợp. Ưu thế nổi bật của HLS là khả năng truyền tải kiến thức sinh động, hấp dẫn, hỗ trợ HS tự học và thúc đẩy đổi mới phương pháp dạy học theo hướng cá nhân hóa. Trong nghiên cứu này, HLS được xác định là tập hợp các phương tiện điện tử hỗ trợ DHPH trong môn Khoa học 4, bám sát các yêu cầu cần đạt của Chương trình Giáo dục phổ thông 2018.

3.1.2. Mô hình VARK

Mô hình VARK là mô hình phong cách học tập được Neil Fleming đề xuất và phát triển từ những năm 1980. Đó là một khung lý thuyết giúp nhận diện và lý giải sự đa dạng trong phương thức tiếp nhận cũng như xử lý thông tin của người học. Dựa trên nền tảng Lý thuyết Đa trí tuệ của Howard Gardner (1993), mô hình này khẳng định trong mỗi cá nhân đều tồn tại nhiều loại hình trí thông minh khác nhau, dẫn đến sự khác biệt về xu hướng tiếp thu tri thức. VARK là viết tắt của bốn xu hướng tiếp thu chủ đạo theo phong cách đặc trưng ở người học: Thị giác (Visual - V) tập trung vào hình ảnh, sơ đồ,...; Thính giác (Auditory - A) ưu tiên lời giảng và thảo luận,...; Đọc/Viết (Read/Write - R) chú trọng văn bản và ghi chép,... và Vận động (Kinesthetic - K) đạt hiệu quả cao nhất qua trải nghiệm thực hành,...

3.1.3. Dạy học phân hóa theo mô hình VARK

Theo Chương trình Giáo dục phổ thông 2018, DHPH là định hướng dạy học phù hợp với các đối tượng HS khác nhau, nhằm phát triển tối đa tiềm năng vốn có dựa vào đặc điểm tâm - sinh lý, khả năng, nhu cầu, hứng thú và định hướng nghề nghiệp khác nhau của mỗi HS (Bộ Giáo dục và Đào tạo, 2018a). DHPH theo mô hình VARK là phương pháp tổ chức dạy học dựa trên bốn phương thức tương tác chủ đạo do Neil Fleming đề xuất, cho phép HS chiếm lĩnh tri thức thông qua phương thức ưu thế nhất của bản thân mà vẫn đảm bảo đạt được các yêu cầu cần đạt chung của chương trình. Cụ thể là dạy học dựa trên việc nhận diện và đáp ứng các phương thức tiếp nhận, xử lý thông tin đặc trưng của người học thông qua bốn giác quan chính: Thị giác (Visual), Thính giác (Auditory), Đọc/Viết (Read/Write) và Vận động (Kinesthetic).

Cách thức triển khai dạy học phân hóa theo mô hình VARK được các tác giả Phạm (2024), Lê và Nguyễn (2026) thực hiện theo quy trình cơ bản gồm 4 bước: 1 - Nhận diện và phân loại học sinh theo phong cách học tập, 2 - Thiết kế hoạt động học tập tương ứng, 3 - Tổ chức dạy học, 4 - Đánh giá và điều chỉnh.

3.2. Thiết kế học liệu số dạy học phân hóa trong môn Khoa học lớp 4 có sự hỗ trợ của AI

3.2.1. Nguyên tắc thiết kế học liệu số

Sử dụng các công cụ AI để thiết kế HLS phải đảm bảo các nguyên tắc về học liệu dạy học và các nguyên tắc về sử dụng AI trong giáo dục. Các nguyên tắc thiết kế bám sát vào nền tảng lý thuyết phong cách học tập VARK, giúp HS tiếp nhận tri thức qua kênh giác quan một cách tối ưu. Đồng thời, khi thiết kế HLS vận dụng thuyết phát triển nhận thức của Piaget (1952) về sự phát triển tư duy thao tác cụ thể của học sinh tiểu học đòi hỏi các học liệu dạy học phải trực quan, gắn với thực tiễn để phát triển năng lực khoa học. Bên cạnh đó, các HLS được thiết kế bám sát vào định hướng tích hợp công nghệ dựa trên quan điểm AI là công cụ hỗ trợ, trong khi việc quản lý và kiểm soát nội dung hoàn toàn thuộc về người sử dụng. Trong nghiên cứu này, HLS được thực hiện dựa trên các nguyên tắc sau:

- Về hình thức: HLS cần được thiết kế một cách trực quan, sinh động, phù hợp với tâm lý HS lớp 4. Từng loại HLS phù hợp với phong cách theo mô hình VARK phải đảm bảo các yêu cầu đặc trưng cho từng loại học liệu. Ví dụ, HLS phù hợp với phong cách V phải đảm bảo hình ảnh đẹp, đúng với thực tế, màu sắc tươi sáng và hài hòa,...

- Về nội dung: HLS phải đảm bảo tính chính xác, khoa học và bám sát yêu cầu về phát triển các năng lực khoa học thành phần theo yêu cầu cần đạt của môn Khoa học lớp 5 gồm: Năng lực nhận thức khoa học tự nhiên; tìm hiểu môi trường tự nhiên xung quanh; vận dụng kiến thức, kỹ năng đã học.

- Về tính ứng dụng: HLS phải được thiết kế để HS dễ sử dụng và GV khai thác linh hoạt khi xây dựng các hoạt động dạy học. Các dạng học liệu thiết kế phải tương ứng với

phong cách học tập của từng nhóm HS để kích thích được trí tò mò, nhu cầu khám phá và tích cực tham gia các hoạt động học tập khi môn Khoa học lớp 5.

- Về sử dụng công cụ số: AI đóng vai trò hỗ trợ thiết kế học liệu về mặt hình thức, nhưng nội dung HLS phải được kiểm soát bởi nghiên cứu biên soạn. Đồng thời, phải rà soát, chỉnh sửa các lỗi của sản phẩm số nhằm đảm bảo tính bản quyền, tính sư phạm và thực tế.

3.2.2. Quy trình thiết kế học liệu số có sự hỗ trợ của AI

Căn cứ vào nguyên tắc đã xây dựng, đồng thời kế thừa các nghiên cứu trước về thiết kế, xây dựng học liệu trong dạy học như của Phan và cộng sự (2024), cùng với quy trình sử dụng công cụ AI trong thiết kế học liệu điện tử của Lã và cộng sự (2025), nghiên cứu triển khai thiết kế HLS hỗ trợ DPHP trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK như sau:

Bước 1. Xác định mục tiêu của HLS: Các HLS phải hỗ trợ GV triển khai DPHP theo mô hình VARK trong môn Khoa học lớp 4 nhằm phát triển các thành phần năng lực khoa học tự nhiên trong từng hoạt động dạy học trong kế hoạch bài dạy.

Bước 2. Xây dựng nội dung HLS: Căn cứ vào chương trình môn Khoa học lớp 4, tham khảo ngữ liệu của sách giáo khoa để xây dựng kịch bản HLS tương ứng với mỗi loại sản phẩm V-A-R-K kèm theo phiếu hướng dẫn sử dụng và phiếu phân loại HS theo mô hình VARK.

Bước 3. Lập kế hoạch thiết kế HLS: Sau khi xác định được mục tiêu và nội dung sẽ lên kế hoạch chi tiết để xây dựng HLS, bao gồm: tìm hiểu các công cụ AI, xây dựng kịch bản, tham khảo các đề xuất từ GV.

Bước 4. Thiết kế hình thức, cấu trúc của HLS: Từ kịch bản các loại HLS, lựa chọn các công cụ AI như Chat GPT, Gemini, Flow, NotebookLM, Suno AI,... và các ứng dụng số như Canva để xây dựng và chỉnh sửa sản phẩm.

Bước 5. Tham vấn chuyên gia: Các sản phẩm HLS đã thiết kế sẽ được gửi đến GV lớp 4 đang trực tiếp dạy học môn Khoa học để đánh giá tính khoa học, tính phù hợp và tính hiệu quả. Đồng thời, thu thập ý kiến, nhận xét từ GV về những hạn chế của HLS để điều chỉnh sản phẩm phù hợp với thực tế dạy học.

3.2.3. Nội dung học liệu số trong môn Khoa học 4

Nhóm nghiên cứu đã ứng dụng các công cụ AI phục vụ cho việc thiết kế HLS như sau: ChatGPT, Gemini tạo hình ảnh, lời bài hát, xây dựng kịch bản video; NotebookLM tạo sơ đồ, hình ảnh; SunoAI tạo bài hát; Flow tạo video; Canva, Vbee AI: lồng tiếng cho video.

Hình thức và nội dung HLS được thiết kế dựa trên mô hình VARK về phong cách học tập của Neil Fleming và đặc điểm tâm lý HS tiểu học. Nghiên cứu đã xây dựng bộ HLS cho 3 chủ đề: Nấm và Vi khuẩn; Con người và sức khỏe; Sinh vật và môi trường trong môn Khoa học lớp 4. Mỗi bài học gồm đủ 4 loại học liệu cho 4 nhóm VARK, cụ thể: video AI (Nhóm V - Visual - Thị giác), bài hát (Nhóm A - Auditory - Thính giác), infographic (Nhóm R - Read/Write - Đọc/Viết), infographic thực hành (Nhóm K - Kinesthetic - Vận động). Tác giả Huỳnh và cộng sự (2012) đã đưa ra nhận định về đặc điểm nhận thức của HS lớp 4 như sau: tri giác mang tính xúc cảm và có chủ định; có khả năng tổ chức, điều chỉnh sự chú ý của mình nhưng dễ bị phân tán nếu nội dung học quá dài hoặc đơn điệu; hiệu quả ghi nhớ phụ thuộc vào sức hấp dẫn của nội dung, yếu tố tâm lý, tình cảm hay hứng thú,... Do đó, HLS cần cung cấp đầy đủ, trực quan, sinh động và dung lượng vừa đủ thông tin các phần của bài học. Nội dung HLS được thể hiện trong bảng 1 kèm theo mã QR để xem chi tiết.

Bảng 1. Nội dung HLS hỗ trợ DPHP trong theo mô hình VARK

Bài học	Mục tiêu	Nội dung	Mô tả
Chủ đề: Nấm và Vi khuẩn - Bài 19: Đặc điểm chung của nấm	- Nhận ra được nấm có hình dạng, kích thước, màu sắc và nơi sống rất khác nhau qua quan sát tranh ảnh và (hoặc) video. - Vẽ được sơ đồ (hoặc sử dụng sơ đồ đã cho) và ghi chú được tên một số bộ phận của những loại nấm thường sử dụng trong đời sống.	Sự đa dạng về màu sắc, kích thước, hình dạng của thể giới nấm, cấu tạo cũng như môi trường sống của nấm và một số lưu ý đặc biệt khác.	* Video AI (nhóm Visual) - Dung lượng: 3 phút; Hình thức: Hoạt hình 3D dễ thương, màu sắc hài hòa và độ sáng ấm. * Bài hát (nhóm Auditory) - Dung lượng: 3 phút; Lời bài hát: rõ ràng, dễ nghe. Đoạn điệp khúc là sự khái quát lại thông tin toàn bài giúp HS ghi nhớ lâu hơn; Giai điệu: vui tươi, trong sáng. * Infographic nội dung (nhóm Read/Write) - Bố cục rõ ràng từng phần nội dung; màu sắc tươi sáng, hài hòa; hình ảnh minh họa dễ thương, sinh động. Nội dung: Lời hướng dẫn về các bước nhận đất sét hình nấm với nội dung được cung cấp, cụ thể: sự đa dạng về màu sắc, kích thước, hình dạng của thể giới nấm, cấu tạo cũng như môi trường sống của nấm và một số lưu ý đặc biệt khác. Kèm theo đó là hình ảnh minh họa cho từng hoạt động giúp HS dễ dàng hình dung hơn. * Infographic hướng dẫn thực hành (nhóm Kinesthetic) - Hình thức: Các bước được phân bố cục rõ ràng. Mỗi bước bao gồm: lời hướng dẫn ngắn gọn kết hợp với việc cung cấp kiến thức để hiểu và hình ảnh minh họa. Màu sắc tươi sáng, hình ảnh sinh động, trực quan.
Chủ đề: Con người và sức khỏe - Bài 24: Chế độ ăn uống cân bằng	- Trình bày được sự cần thiết phải ăn phối hợp nhiều loại thức ăn, ăn nhiều rau, hoa quả và uống đủ nước mỗi ngày. - Nêu được ở mức độ đơn giản về chế độ ăn uống cân bằng. - Nhận xét được bữa ăn cân bằng, lành mạnh	Nhu cầu ăn phối hợp nhiều loại thức ăn, ăn uống cân bằng (Tháp dinh dưỡng) và một số lưu ý đặc biệt cho một số	* Video AI (nhóm Visual) - Dung lượng: 3 phút; Hình thức: Hoạt hình 3D dễ thương, màu sắc hài hòa và độ sáng ấm. * Bài hát (nhóm Auditory) - Dung lượng: 3 phút; Lời bài hát: rõ ràng, dễ nghe, cung cấp đầy đủ nội dung bài học. Đoạn điệp khúc là sự khái quát thông tin về Tháp dinh dưỡng giúp HS ghi nhớ lâu hơn; Giai điệu: vui tươi, trong sáng. * Infographic nội dung (nhóm Read/Write) - Bố cục rõ ràng từng phần nội dung; màu sắc tươi sáng, hài hòa; hình ảnh minh họa dễ thương, sinh động; chứa thông điệp về ăn uống cân bằng và phối hợp cũng như nhu cầu về nước và vận động của cơ thể. * Infographic hướng dẫn thực hành (nhóm Kinesthetic) - Nội dung: Lời hướng dẫn về 3 hoạt động liên hoàn: Nhóm chat nào đây?, Tháp dinh dưỡng và Bữa ăn cân

	dựa vào Tháp dinh dưỡng của trẻ em và đối chiếu với thực tế bữa ăn trong ngày ở nhà, ở trường.	loại thực phẩm.	bằng. Kèm theo đó là hình ảnh minh họa cho từng hoạt động giúp HS dễ dàng hình dung hơn. - Hình thức: 3 hoạt động được phân bố cục rõ ràng. Mỗi hoạt động gồm: tên hoạt động, lời hướng dẫn ngắn gọn nhưng dễ hiểu và hình ảnh minh họa. Màu sắc tươi sáng, hình ảnh sinh động, trực quan.
Chủ đề: Sinh vật và môi trường - Bài 29: Chuỗi thức ăn trong tự nhiên	- Trình bày được mối liên hệ giữa các sinh vật trong tự nhiên thông qua chuỗi thức ăn. - Nêu được ví dụ về chuỗi thức ăn. - Sử dụng được sơ đồ đơn giản để mô tả sinh vật này là thức ăn của sinh vật khác trong tự nhiên.	Khái niệm chuỗi thức ăn, quy tắc biểu diễn sơ đồ chuỗi thức ăn, giới thiệu một số chuỗi thức ăn khác nhau và một số lưu ý.	* Video AI (nhóm Visual) - Dung lượng: 2 phút; Hình thức: Hoạt hình 3D dễ thương, màu sắc hài hòa và độ sáng ấm. * Bài hát (nhóm Auditory) - Dung lượng: 3 phút; Lời bài hát: rõ ràng, dễ nghe, cung cấp đầy đủ nội dung bài học. Đoạn điệp khúc là quy tắc biểu diễn chuỗi thức ăn được lặp lại nhiều lần giúp HS ghi nhớ lâu hơn. Giai điệu: vui tươi, trong sáng. * Infographic nội dung (nhóm Read/Write) - Bố cục rõ ràng từng phần nội dung; màu sắc tươi sáng, hài hòa; hình ảnh minh họa sinh động. * Infographic hướng dẫn thực hành (nhóm Kinesthetic) - Nội dung: Lời hướng dẫn về 5 thử thách liên hoàn: Ghép thẻ chuỗi thức ăn theo mẫu; Sắp xếp chuỗi thức ăn; Sắp xếp nhiều chuỗi thức ăn hợp lý khác nhau; Mối liên hệ giữa các chuỗi thức ăn; Tự khám phá. Kèm theo đó là hình ảnh minh họa cho từng hoạt động giúp HS dễ dàng hình dung hơn. - Hình thức: 5 thử thách được trình bày rõ ràng, gồm: tên hoạt động, lời hướng dẫn ngắn gọn. Màu sắc, hình ảnh sinh động, trực quan.
 Mã QR bộ HLS hỗ trợ DPH trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK.			

3.2.4. Định hướng sử dụng học liệu số trong dạy học môn Khoa học 4

Các bước sử dụng bộ HLS hỗ trợ DPH trong môn Khoa học 4 theo mô hình VARK cụ thể như sau:

Bước 1. Phân loại HS theo phong cách học tập: GV cần xác định phong cách học tập chủ đạo của từng HS bằng bộ câu hỏi trắc nghiệm được thiết kế dựa trên bộ câu hỏi từ trang web chính thức của Neil Fleming (truy cập tại <https://vark-learn.com/the-vark-questionnaire/>) và kết hợp với sự quan sát HS trong quá trình dạy học. Số HS được chia thành các nhóm có số lượng thành viên xấp xỉ nhau theo 4 phong cách học tập. Chú ý: một

HS có thể tồn tại nhiều phong cách học khác nhau nên có thể linh hoạt để chia thành các nhóm đồng đều về số lượng.

Bước 2. Chuẩn bị không gian và thiết bị: GV bố trí không gian phòng học theo mô hình dạy học góc tương ứng với bốn nhóm: Nhìn; Nghe; Đọc/Viết; Vận động. Mỗi góc cần được trang bị thiết bị công nghệ như máy tính, loa hoặc tivi phù hợp với HLS đã thiết kế sẵn.

Bước 3. Triển khai dạy học (theo góc): Các nhóm HS sau khi được phân loại theo VARK sẽ khám phá tri thức thông qua HLS tương ứng mà GV đã chuẩn bị ở các góc. HS thực hiện nhiệm vụ điền phiếu học tập hoặc giải quyết các nhiệm vụ cụ thể ở từng góc trong quá trình khám phá tri thức với các loại HLS. GV đóng vai trò là người hướng dẫn, quan sát, hỗ trợ kĩ thuật cho HS.

Bước 4. Đánh giá và củng cố: HS tự nhận xét về hiệu quả của việc sử dụng HLS đối với quá trình học tập của bản thân. GV sử dụng các bài kiểm tra đánh giá hoặc bài thu hoạch nhỏ để kiểm tra mức độ đạt được các yêu cầu cần đạt của HS.

3.3. Kết quả tham vấn chuyên gia về học liệu số đã thiết kế trong dạy học môn Khoa học 4

Bảng 2. Kết quả khảo sát GV về tính đầy đủ của HLS hỗ trợ DPHP trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK

Nội dung	Số lượng GV lựa chọn (%)					ĐTB	ĐLC
	RKĐY	KĐY	TL	ĐY	RĐY		
HLS có nội dung phù hợp với mục tiêu của môn Khoa học lớp 4	0	0	4.0	48.0	48.0	4.44	0.58
HLS đã bao quát đầy đủ các yêu cầu về kiến thức, kĩ năng trong chương trình môn Khoa học lớp 4	0	0	4.0	66.0	30.0	4.26	0.53
HLS đã cung cấp đầy đủ nội dung và hoạt động học tập cho ba chủ đề: nắm, tháp dinh dưỡng của con người và chuỗi thức ăn của động vật, đáp ứng yêu cầu phân hóa theo mô hình VARK	0	0	2.0	56.0	42.0	4.40	0.54
HLS có đủ hình ảnh, sơ đồ, video minh họa cho HS theo kênh Visual (Thị giác)	0	2.0	0	56.0	42.0	4.38	0.60
HLS có đủ tài liệu âm thanh cho HS theo kênh Auditory	0	2.0	0	50.0	48.0	4.44	0.61

HLS có đủ văn bản, tài liệu đọc/viết cho HS theo kênh Reading/Writing	0	0	0	60.0	40.0	4.40	0.49
HLS có đủ hoạt động thực hành, trò chơi tương tác cho HS theo kênh Kinesthetic	0	2.0	6.0	56.0	36.0	4.26	0.66
HLS có phân hướng dẫn sử dụng chi tiết giúp GV dễ hiểu, dễ thực hiện	0	0	8.0	52.0	40.0	4.32	0.62

Kết quả khảo sát GV về tính đầy đủ của HLS hỗ trợ DPHP trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK trong bảng 2 cho thấy: GV đều rất đồng ý với tính phù hợp và tính đầy đủ của học liệu, với ĐTB từ 4.26 đến 4.44 và DLC thấp từ 0.49 đến 0.66. Cụ thể, HLS được đánh giá là có nội dung phù hợp với mục tiêu của môn Khoa học, với ĐTB 4.44 và DLC 0.58, bao quát các yêu cầu về kiến thức, kỹ năng của môn Khoa học với ĐTB là 4.26 và DLC là 0.53. Đồng thời, GV rất đồng ý với khả năng đáp ứng được về nội dung, cấu trúc sản phẩm cho từng nhóm HS: Thị giác (ĐTB: 4.38), Thính giác (ĐTB: 4.44), Đọc/Viết (ĐTB: 4.4) và (Vận động) (ĐTB: 4.26). Nhóm học liệu số Vận động chịu ảnh hưởng bởi điều kiện tổ chức như cơ sở vật chất và thời gian triển khai, đặc biệt là không gian lớp học phải đủ rộng mới tổ chức hiệu quả các hoạt động thực hành trải nghiệm. Trong thực tế, ở hầu hết các trường tiểu học trung tâm của Thành phố Hồ Chí Minh bị hạn chế về không gian để có thể tổ chức dạy học hiệu quả có thể là lí do GV đánh giá với điểm thấp hơn so với các nhóm còn lại. Các HLS có phân hướng dẫn sử dụng rõ ràng, chi tiết (ĐTB là 4.32 và DLC là 0.62) để GV thuận tiện trong xây dựng kế hoạch bài giảng có ứng dụng HLS trong DPHP trong theo mô hình VARK. Như vậy, HLS đã đáp ứng tính phù hợp và tính đầy đủ cho cả 4 phong cách học tập của HS và giúp GV dễ dàng sử dụng để xây dựng kế hoạch bài dạy và tổ chức DPHP theo mô hình VARK.

Bảng 3. Kết quả khảo sát GV về tính hữu dụng của HLS hỗ trợ DPHP trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK

Nội dung	Số lượng GV lựa chọn (%)					ĐTB	DLC
	RKĐY	KĐY	TL	ĐY	RĐY		
1. Học liệu video AI dành cho nhóm HS Visual (Thị giác) cung cấp hình ảnh, kiến thức một cách trực quan, sinh động	0	0	2	54	44	4.42	0.538
2. Bài hát về các nhóm chủ đề dành cho HS Aural (Thính giác) có giai điệu hay, dễ nghe giúp HS nhớ bài tốt hơn	0	0	6	60	34	4.28	0.573

3. Infographic dành cho HS Read/Write (Đọc/Viết) màu sắc tươi sáng, hài hòa về hình ảnh và lí thuyết cô đọng giúp HS nắm bài tốt hơn	0	0	4	56	40	4.36	0.563
4. Các hoạt động dành cho HS Kinesthetic (Vận động) kích thích sự hứng thú, tích cực của các em trong quá trình học	0	0	10	62	28	4.18	0.596
5. Bộ học liệu giúp GV dễ dàng lựa chọn các nhiệm vụ học tập khác nhau phù hợp cho từng nhóm HS	0	0	2	58	40	4.38	0.530
6. Nội dung trong các HLS được mô tả chính xác, khoa học theo nội dung bài học	0	0	2	68	30	4.28	0.497
7. Các HLS hỗ trợ HS hình thành các 3 năng lực thành phần: Năng lực nhận thức khoa học tự nhiên, tìm hiểu môi trường xung quanh và vận dụng kiến thức, kĩ năng	0	0	2	64	34	4.32	0.513
8. Từ các HLS, GV có định hướng lên ý tưởng, sáng tạo các hoạt động dạy học	0	0	2	64	34	4.32	0.513

Kết quả trong bảng 3 cho thấy GV rất đồng ý và đồng ý về tính hữu dụng của HLS đã thiết kế hỗ trợ DHPH theo mô hình VARK với ĐTB cao từ 4.18 đến 4.42 và ĐLC thấp. GV ghi nhận các HLS vừa đảm bảo tính chính xác, khoa học của nội dung bài học vừa có tính thực quan, sinh động về hình thức. Từ đó, HLS thu hút được sự chú ý, tạo cơ sở cho sự chủ động tìm tòi, lĩnh hội kiến thức và định hướng cho HS phát triển 3 năng lực thành phần trong môn Khoa học. Ngoài ra, HLS là nguồn tư liệu giúp GV dễ dàng hình thành các ý tưởng cho các hoạt động giáo dục có tính cá nhân hóa (tiêu chí 5 có ĐTB là 4.38). GV cũng cho rằng sử dụng bộ HLS này sẽ hỗ trợ cho GV sáng tạo trong thiết kế kế hoạch bài dạy và tổ chức dạy học.

Bảng 4. Kết quả khảo sát GV về tính thẩm mỹ của HLS hỗ trợ DHPH trong môn Khoa học lớp 4 theo mô hình VARK

Tiêu chí	Tỉ lệ GV lựa chọn (%)					ĐTB	ĐLC
	RKĐY	KĐY	TL	ĐY	RĐY		
Giao diện của bộ HLS được thiết kế khoa học, đơn giản và dễ dàng sử	0	0	8	66	26	4.18	0.56

dụng.							
Màu sắc chủ đạo và các hình ảnh minh họa trong bộ học liệu sinh động, tươi sáng, phù hợp với tâm sinh lý lứa tuổi HS lớp 4.	0	0	8	58	34	4.26	0.6
Cách sắp xếp bố cục các học liệu đảm bảo tính cân đối, dễ nhìn và dễ theo dõi nội dung kiến thức.	0	0	6	62	32	4.26	0.565
Sự kết hợp giữa các yếu tố công nghệ (hiệu ứng, chuyển động) và nội dung học tập tạo nên sự hấp dẫn, chuyên nghiệp cho học liệu dạng video.	0	0	10	56	34	4.24	0.625
Các tệp infographic, video và âm thanh có chất lượng kỹ thuật và thẩm mỹ tốt (hình ảnh sắc nét, âm thanh rõ ràng).	0	0	6	64	30	4.24	0.555

Kết quả trong bảng 4 cho thấy GV đồng thuận rất cao và ổn định về tính thẩm mỹ của HLS đã thiết kế. Cụ thể, tỉ lệ GV đồng ý và rất đồng ý dao động từ 92% đến 94% với các tiêu chí về màu sắc chủ đạo, hình ảnh minh họa và cách sắp xếp bố cục (ĐTB là 4.26). Điều này minh chứng nghiên cứu đã vận dụng hiệu quả các nguyên tắc thiết kế trực quan, sinh động và phù hợp với đặc điểm tâm sinh lý của HS tiểu học. Thêm vào đó, các yếu tố về kỹ thuật và công nghệ cũng nhận được đánh giá tích cực với ĐTB là 4.24, khẳng định chất lượng hình ảnh sắc nét, âm thanh rõ ràng và có các hiệu ứng sinh động ở nội dung học tập dạng video. Các tiêu chí về giao diện khoa học, dễ sử dụng đạt mức ĐTB là 4.18 thấp hơn các tiêu chí khác. Đáng chú ý, DLC của tất cả các tiêu chí chỉ dao động từ 0.555 đến 0.625, thể hiện sự nhất quán cao của GV về tính thẩm mỹ của bộ HLS. Tuy nhiên, tỉ lệ 6% đến 10% ý kiến ở mức độ trung lập, cho thấy sản phẩm đã đảm bảo tính đơn giản trong thao tác và phù hợp với năng lực công nghệ của đa số GV hiện nay nhưng vẫn cần có những điều chỉnh thêm để phù hợp với tất cả GV.

Bảng 5. Kết quả khảo sát GV về ý định sử dụng HLS hỗ trợ DPHP trong môn Khoa học lớp 4 theo VARK trong thực tế

Tiêu chí	Tỉ lệ GV lựa chọn (%)					ĐTB	ĐLC
	KBG	TT	BT	TX	RTX		
Ý định sử dụng HLS hỗ trợ	0	10	32	52	6	3.54	0.762

DPHP trong môn Khoa học lớp 5 theo VARK trong thực tế							
---	--	--	--	--	--	--	--

Số liệu từ bảng 5 chỉ ra đa số GV đã có tâm thế đón nhận và sẵn sàng sử dụng bộ HLS trong giảng dạy, nhưng vẫn có sự không đồng đều giữa các ý kiến. Cụ thể, có 58% GV sẽ sử dụng ở mức độ "Thường xuyên" và "Rất thường xuyên", với ĐTB là 3.54. Đáng chú ý, tỉ lệ 0% cho lựa chọn "Không bao giờ" minh chứng bộ HLS hoàn toàn phù hợp với nhu cầu đổi mới giáo dục hiện nay. Tuy nhiên, tỉ lệ 32% ý kiến trung lập và 10% chọn sử dụng ở mức "Thỉnh thoảng" chỉ ra sự cân nhắc và do dự của khá nhiều GV. Sự thận trọng này có mối liên hệ mật thiết với các rào cản thực tế đã được nhận diện như: sĩ số lớp đông, áp lực về không gian, thời gian và cơ sở vật chất chưa đồng bộ. Do đó, để nâng cao khả năng ứng dụng lâu dài, cần có sự phối hợp giữa việc cung cấp hệ thống học liệu chất lượng và lộ trình cải thiện cơ sở vật chất tại các trường học.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã sử dụng các công cụ AI xây dựng HLS hỗ trợ DPHP theo các phong cách học tập của HS phù hợp với mô hình VARK. Dựa trên nguyên tắc và quy trình 5 bước, nghiên cứu đã thiết kế được HLS minh họa cho 3 chủ đề Nấm và vi khuẩn, Con người và sức khỏe, Sinh vật và môi trường của môn Khoa học 4 phù hợp với các phong cách học tập của HS. Kết quả khảo nghiệm 50 GV về bộ HLS đã thiết kế cho thấy phần lớn GV đánh giá cao tính ứng dụng của HLS và xem đó như một nguồn tài liệu hữu ích. Đặc biệt, nhiều GV bày tỏ mong muốn thường xuyên sử dụng HLS trong dạy học theo định hướng dạy học phân hóa. Nghiên cứu này mới chỉ dừng lại ở việc khảo sát ý kiến của GV, do đó cần thực nghiệm đối chứng trên các lớp học để khẳng định tính hiệu quả về sự phát triển năng lực khoa học tự nhiên cho HS.

Kết quả của nghiên cứu này là căn cứ để GV có thể sử dụng nguyên tắc và quy trình để thiết kế HLS cho các chủ đề trong dạy học môn Khoa học lớp 4 cũng như các môn học khác ở tiểu học. Đồng thời, việc ứng dụng AI để xây dựng video, hình ảnh và mô phỏng trong nghiên cứu này không chỉ giúp giảm sự phụ thuộc vào các thiết bị thí nghiệm mà còn mở rộng cơ hội tiếp cận học liệu số, góp phần thu hẹp khoảng cách số trong giáo dục.

Tài liệu tham khảo

- Bộ Giáo dục và Đào tạo. (2017). Thông tư số 21/2017/TT-BGDĐT ngày 06 tháng 9 năm 2017 quy định ứng dụng công nghệ thông tin trong hoạt động bồi dưỡng, tập huấn qua mạng Internet cho giáo viên, nhân viên và cán bộ quản lý giáo dục.
- Bộ Giáo dục và Đào tạo. (2018a). Chương trình Giáo dục phổ thông tổng thể (Ban hành kèm theo thông tư số 32/2018/TT-BGDĐT ngày 26 tháng 12 năm 2018 của Bộ Giáo dục và Đào tạo).
- Bộ Giáo dục và Đào tạo. (2018b). Chương trình giáo dục phổ thông môn Khoa học (Ban hành kèm theo thông tư số 32/2018/TT-BGDĐT ngày 26 tháng 12 năm 2018 của Bộ Giáo dục và Đào tạo).
- Flemming, N. (2001). Teaching and Learning Styles: VARK Strategies. Neil D. Fleming.
- Gardner, H. (1993). Multiple Intelligences: The Theory In Practice, A Reader. Basic Books.
- Huỳnh, V. S., Lê, T. H., Trần, T. T. M., & Nguyễn, T. U. T. (2012). Giáo trình Tâm lý học đại cương. NXB Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh.

- Kibar, P. N., & Ilgaz, H. (2026). The intersection of artificial intelligence and instructional design practice: a systematic review. *Educational technology research and development*. <https://doi.org/10.1007/s11423-026-10624-z>.
- Lã, P. T., Hoàng, T. H., Trần, Đ. M., & Trần, T. T. (2025). Sử dụng công cụ trí tuệ nhân tạo (AI) thiết kế học liệu điện tử trong dạy học kỹ năng sống cho học sinh phổ thông. *Tạp chí Tâm lý - Giáo dục*, 31(4), 15-19.
- Lê, T. P., & Nguyễn, Q. H. (2026). Vận dụng phương pháp dạy học phân hóa phong cách học tập “VARK” trong dạy học chủ đề “Trao đổi nước và khoáng ở thực vật” cho học sinh lớp 11. *Journal of Education Management*, 18(6), 30-34. <https://doi.org/10.53750/jem26.v18.n6.30>.
- Lê, T. T. H. (2012). Dạy học phân hóa ở tiểu học nhằm góp phần nâng cao hiệu quả dạy và học môn Toán, Luận án Tiến sĩ Giáo dục học. Viện Khoa Học Giáo dục Việt Nam.
- Letzel-Alt, V., & Pozas, M. (2023). Differentiated instruction around the world: A global inclusive insight. Waxmann.
- Nguyễn, M. G., & Lê, T. H. T. (2025). Khai thác và sử dụng HLS Mozaik 3D dạy học chủ đề con người và sức khỏe, môn Tự nhiên và Xã hội lớp 3. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 61(5), 196–204. <https://doi.org/10.22144/ctujos.2025.152>.
- Phan, A. T., Lê, A. Y. T., Nguyễn, T. A. T., Nguyễn, T. H., Trần, T. H. P., Hồ, V. P. L., & Bùi, T. H. T. (2025). Xây dựng kho HLS hỗ trợ dạy học môn Lịch sử và Địa lí ở tiểu học. *Tạp chí Tâm lý - Giáo dục*, 31(4).
- Phan, T. T. H., Nguyễn, T. K. T., & Nguyễn, M. T. (2024). Xây dựng và sử dụng bộ HLS trong dạy học mạch nội dung “Sinh trưởng và phát triển ở sinh vật” - Khoa học tự nhiên 7. *Tạp chí Giáo dục*, 24(6), 28–34.
- Phạm, V. Q. (2024). Instruction based on the VARK learning styles of primary students in science. *HNUE Journal of Science*, 69(3), 119-128.
- Piaget, J. (1952). The origins of intelligence in children. International Universities Press.
- Trần, T. B. H. (2016). Dạy học phân hóa dựa vào phong cách học tập của học sinh trong môn Khoa học lớp 4. *Tạp chí Khoa học Giáo dục Việt Nam*(132), 72-75.
- Vũ, V C (2024). Dạy học phân hóa kết hợp với phương pháp dạy học dự án trong môn Toán. *Journal of educational equipment*, 2(327), 215.
- Wang, Z., Liu, M., & Islam, A. A. (2026). Reimagining teacher-AI co-design in learning task design: trends and perspectives. *Humanities & Social Sciences Communications*, 13(757). <https://doi.org/10.1057/s41599-026-06981-y>.