Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.214

KIẾN TRÚC THÍCH ỨNG TẦNG TRỆT MỞ: GIẢI PHÁP ỨNG PHÓ SỤT LÚN VÀ NGẬP LỤT TẠI THÀNH PHỐ CẦN THƠ

Huỳnh Lê Hoàn Vũ* và Trương Hoài Tây
Công ty cổ phần Tư Vấn - Thiết Kế - Xây Dựng Kiến Huỳnh, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): Hoanvukts@gmail.com*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 10/03/2026
Sửa bài (Revised): 10/04/2026
Duyệt đăng (Accepted): 28/09/2026

Title: *Adaptive architecture: Open ground floor solutions for subsidence and flooding in Can Tho city*

Author(s): *Huynh Le Hoan Vu* and Truong Hoai Tay*

Affiliation(s): *Kien Huynh Consultancy - Design - Construction JSC, Viet Nam*

TÓM TẮT

Trong bối cảnh sụt lún đất và nước biển dâng tại Đồng bằng sông Cửu Long, đặc biệt là thành phố Cần Thơ, nghiên cứu được thực hiện nhằm đề xuất giải pháp "Kiến trúc thích ứng" thông qua mô hình nhà phố tầng trệt mở. Thay thế các biện pháp chống đỡ thụ động, nghiên cứu tập trung vào việc quy hoạch không gian linh hoạt và thiết kế cốt nền dự phòng. Việc phân tích định lượng về biến đổi cốt nền được tiến hành bằng phương pháp khảo sát thực địa kết hợp đo đạc bằng máy cân bằng laser và thước laser tại 15 công trình điển hình tại Cần Thơ; đồng thời, mô hình Đánh giá chi phí vòng đời (LCCA) được sử dụng để kiểm chứng hiệu quả kinh tế. Kết quả cho thấy chiến lược "chiều cao dự phòng" kết hợp với "kết nối động" giúp công trình tự điều chỉnh trước sự thay đổi cao độ hạ tầng mà không cần can thiệp vào kết cấu chính. Kết quả phân tích kinh tế vòng đời chứng minh rằng dù chi phí đầu tư ban đầu tăng từ 10 đến 15%, giải pháp này giúp triệt tiêu hoàn toàn chi phí cải tạo nâng nền định kỳ, đảm bảo tính bền vững cho sinh kế cư dân đô thị.

Từ khóa: *Biến đổi khí hậu, Cần Thơ, hiệu quả kinh tế, kiến trúc thích ứng, tầng trệt mở*

ABSTRACT

In the context of land subsidence and sea-level rise in the Mekong Delta, particularly in Can Tho City, this study proposes an "Adaptive Architecture" solution through an open ground floor townhouse model. Shifting away from passive defence measures, the research focuses on flexible spatial planning and reserve floor level design. Utilizing field surveys combined with measurements using laser levels and laser distance meters at 15 typical buildings in Can Tho, the study conducts a quantitative analysis of floor level variations. Simultaneously, a Life Cycle Cost Analysis (LCCA) model is employed to verify economic efficiency. The results indicate that the "reserve height" strategy, combined with "dynamic connectivity," enables buildings to self-adjust to changes in infrastructure elevation without requiring interventions in the primary structure. Life cycle economic analysis demonstrates that despite an initial investment increase of 10-15%, this solution completely eliminates periodic floor-raising renovation costs, ensuring sustainable livelihoods for urban residents.

Keywords: *Climate change, Can Tho, economic efficiency, adaptive architecture, open ground floor*

1. GIỚI THIỆU

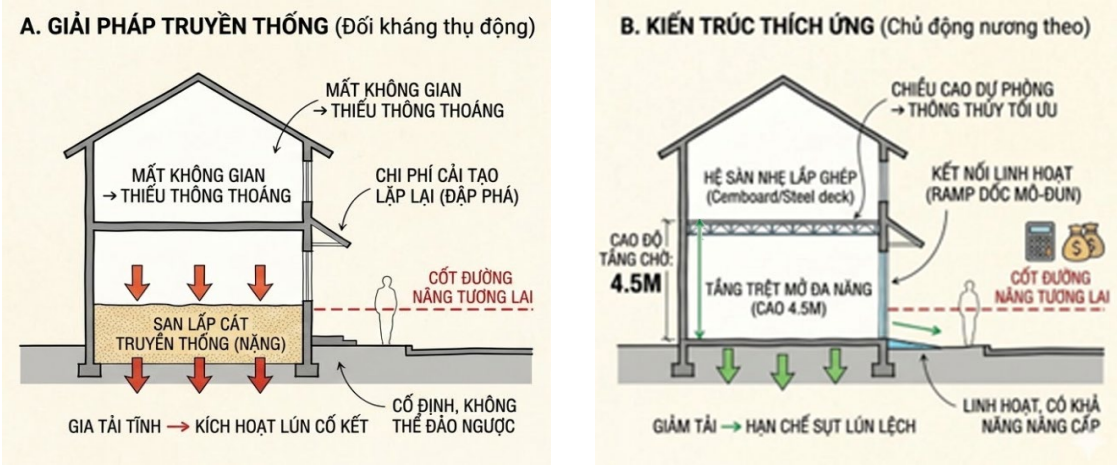
Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) hiện nay không chỉ đối mặt với biến đổi khí hậu toàn cầu mà còn chịu tác động nặng nề từ các hoạt động nhân sinh nội vùng. Trong các thách thức môi trường, sự kết hợp giữa nước biển dâng và sụt lún đất đang tạo ra áp lực chưa từng có lên hệ thống hạ tầng và cấu trúc nhà ở đô thị. Theo kịch bản của Bộ Tài nguyên và Môi trường (2016), mực nước biển có thể dâng cao thêm 100 cm vào cuối thế kỷ XXI; nếu kịch bản này xảy ra thì khoảng 39,1% diện tích ĐBSCL có nguy cơ bị ngập, đe dọa trực tiếp đến sinh kế của hàng triệu cư dân.

Tuy nhiên, các dữ liệu quan trắc thực tế cho thấy tốc độ sụt lún đất tại ĐBSCL đang diễn ra nhanh hơn đáng kể so với tốc độ nước biển dâng. Nghiên cứu của Erban et al. (2014) và Minderhoud (2017) đã xác nhận tốc độ sụt lún trung bình tại Cần Thơ đạt từ 1,1 cm đến 2,5 cm/năm, chủ yếu do hệ quả của việc khai thác nước ngầm quá mức làm nén chặt các tầng trầm tích yếu. Thực trạng này dẫn đến sự bất đồng bộ nghiêm trọng về cao độ giữa hạ tầng giao thông và nhà ở. Để duy trì khả năng lưu thông trong điều kiện ngập lụt, chính quyền đô thị thường xuyên thực hiện các dự án nâng cấp, tôn cao mặt đường. Điều này vô tình đẩy các công trình nhà phố liên kế vào nghịch lý "Đường nâng - Nhà thấp". Theo các đánh giá về quản lý cốt nền tại đô thị Cần Thơ (Tuấn & Minh, 2015), sau mỗi chu kỳ nâng cấp hạ tầng, cốt nền nhà dân thường thấp hơn mặt đường từ 0,5 m đến hơn 1,0 m, biến tầng trệt thành những vùng trũng thấp, ẩm ướt và suy giảm chất lượng vi khí hậu.



Hình 1. Nghịch lý "Đường nâng - Nhà thấp" và hệ lụy gián đoạn sinh kế tại đô thị Cần Thơ (Phương, 2023)

Vấn đề cốt lõi không chỉ nằm ở kỹ thuật thích ứng, mà còn nằm ở bài toán kinh tế sở hữu. Giải pháp truyền thống của cư dân hiện nay là nâng nền bằng vật liệu san lấp mỗi khi đường được tôn cao. Tuy nhiên, phương pháp này bộc lộ những khiếm khuyết lớn về mặt kinh tế vòng đời: (1) Chi phí cải tạo lặp đi lặp lại gây lãng phí nguồn lực tài chính; (2) việc nâng nền cưỡng bức làm giảm chiều cao thông thủy, trực tiếp làm suy giảm giá trị sử dụng và giá trị thương mại của bất động sản; (3) thời gian sửa chữa kéo dài gây gián đoạn các hoạt động sinh kế, đặc biệt là đối với loại hình nhà phố kết hợp kinh doanh.



Hình 2. Phân tích cơ chế thích ứng của tầng trệt mở qua các chu kỳ nâng đường

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm tập trung vào giải pháp "Kiến trúc Thích ứng" (Adaptive Architecture) với cấu trúc tầng trệt mở đa năng. Dựa trên khung lý thuyết của Schnädelbach (2010), kiến trúc thích ứng coi công trình là một thực thể có khả năng tự điều chỉnh thay vì các biện pháp chống đỡ thụ động. Giải pháp đề xuất thiết lập 'chiều cao dự phòng' lên mức 4,5 m – một con số được tính toán khoa học để bù đắp cao độ sụt lún trong 30 năm tới mà vẫn đảm bảo tuân thủ nghiêm ngặt QCVN 01:2021/BXD về quy hoạch và

TCVN 9411:2012 về tiêu chuẩn nhà liên kế. Bằng hệ thống 'kết nối động', giải pháp này hướng tới việc tối ưu hóa hiệu quả kinh tế dài hạn thông qua việc triệt tiêu chi phí cải tạo định kỳ, bảo toàn giá trị tài sản và duy trì sinh kế ổn định cho cư dân đô thị. Nghiên cứu kỳ vọng sẽ thiết lập một mô hình nhà ở bền vững, giúp cư dân bảo toàn giá trị tài sản và duy trì sinh kế ổn định trước những biến đổi khó lường của môi trường đô thị tại ĐBSCL.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, nhà phố liên kế (Townhouse) được lựa chọn làm đối tượng trọng tâm vì đây là thành phần cơ bản cấu thành nên diện mạo đô thị ĐBSCL. Đặc biệt, tại các đô thị loại I như Cần Thơ, nhà phố không chỉ là nơi ở mà còn là không gian sinh kế (kinh doanh, dịch vụ). Khi nghịch lý "đường nâng - nhà thấp" xảy ra, thiệt hại không chỉ dừng lại ở sự bất tiện trong sinh hoạt mà là sự sụt giảm trực tiếp về thu nhập và giá trị tài sản của hộ gia đình.

Phạm vi khảo sát: Nghiên được thực hiện cứu tập trung vào các tuyến đường có cốt nền biến động mạnh tại phường Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ, bao gồm: đường Mậu Thân, Nguyễn Trãi và Cách Mạng Tháng Tám. Đây là các khu vực đại diện cho sự xung đột cao độ giữa hạ tầng giao thông và nhà ở dân cư.

Mẫu nghiên cứu: Việc khảo sát điển hình trên 15 công trình (n = 15) có lịch sử cải tạo nâng nền ít nhất một lần đã được tiến hành. Việc lựa chọn khu vực và quy mô mẫu này nhằm thu thập dữ liệu "đối chứng" thực tế về mức chi phí, thời gian và các hệ lụy kỹ thuật mà cư dân đã phải trải qua trong các đợt nâng nền tự phát, từ đó làm cơ sở định lượng cho các phân tích hiệu quả kinh tế dài hạn.

2.2. Phương pháp thực hiện

2.2.1. Phương pháp phân tích hệ thống và dữ liệu thứ cấp

Cơ sở thực tiễn của kịch bản dịch chuyển cao độ tương đối (+0,50 m sau 10 năm và +1,10 m đến +1,20 m sau 20 năm) hoàn toàn không phải là các giả định mang tính chủ quan, mà là sự tích lũy tuyến tính từ hai chuỗi dữ liệu thực tế: tốc độ sụt lún cơ học địa hình và cao độ thiết kế quy hoạch tôn cao hạ tầng. Về phương diện trắc đạc địa chất, nghiên cứu viễn thám radar (InSAR) của Minderhoud et al. (2017) đã lượng hóa mức độ sụt lún nén chặt tự nhiên tại lõi đô thị Ninh Kiều dao động từ 1,5 đến 2,2 cm/năm, tương đương mức sụt hạ bề mặt địa hình từ 15 - 22 cm trong chu kỳ 10 năm và đạt 35 - 44 cm trong chu kỳ 20 năm. Về phương diện quản lý hạ tầng đô thị, theo Báo cáo thuyết minh *Dự án Phát triển thành phố Cần Thơ và Tăng cường khả năng thích ứng của đô thị* (Hợp phần 1 - Dự án cải tạo hệ thống chống ngập vùng lõi đô thị Ninh Kiều), cao độ thiết kế thảm nhựa tôn cao lộ giới tại các tuyến đường trục chính được xác định tăng trung bình từ +0,30 m đến +0,60 m để thích ứng với cao độ triều cường cực đoan (+2,25 m) (Ban Quản lý Dự án ODA thành phố Cần Thơ, 2019). Mối tương quan cộng dồn cơ học giữa sự sụt xuống của địa hình tự nhiên và sự nâng lên của cốt lộ giao thông chính là minh chứng khoa học thực tiễn định hình nên biên độ an toàn không gian 4,5 m của tầng trệt mở, hoàn toàn tương thích với các mô hình mô phỏng ngập lụt diện rộng do tác động kép tại vùng hạ lưu lưu vực sông Mê Kông của Zhu et al. (2020)

Bảng 1. Kịch bản biến động cao độ hạ tầng đô thị

Giai đoạn	Tác động thực tế	Cao độ đường nhựa	Yêu cầu thích ứng sàn nhà
Hiện trạng (2025)	Điểm mốc chuẩn	±0,00 m	Thiết lập tầng chờ 4.5 m
Chu kỳ 1 (10 năm)	Sụt lún (~20 cm) + Nâng lộ lần 1 (~30 cm)	+0,50 m	Nâng sàn lần 1
Chu kỳ 2 (20 năm)	Sụt lún (~40 cm) + Nâng lộ lần 2 (~60 cm)	+1,10 m đến +1,20 m	Nâng sàn lần 2

Để bài toán nghiên cứu có tính thực tiễn cao, các dữ liệu thô này được hệ thống hóa thành một kịch bản biến động cốt đường trong vòng đời 20 năm của công trình (Bảng 1). Đây chính là khung tham chiếu kỹ thuật cốt lõi để thiết kế các hệ số "chiều cao dự phòng" cho mô hình thích ứng.

Dựa trên bảng kịch bản này, kết quả nghiên cứu xác lập rằng một ngôi nhà phố cần có chiều cao tầng trệt tối thiểu 4,5 m để sau 20 năm, khi mặt đường nâng lên mức tối đa dự kiến (+1,20 m), không gian sinh hoạt vẫn bảo toàn được chiều cao thông thủy đạt chuẩn (khoảng 3,3 m), tránh rơi vào tình trạng "nhà lùn" như các mô hình truyền thống.

2.2.2. Phương pháp nghiên cứu điển hình (Case Study)

Để phục vụ cho tiến trình tính toán và mô phỏng, phương pháp chọn mẫu phi xác suất có chủ đích đã được áp dụng với cỡ mẫu gồm 15 công trình nhà phố liên kế (n = 15) tại lõi không gian phường Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ. Trong bối cảnh chuyển dịch sang mô hình chính quyền địa phương mới, không gian đô thị Ninh Kiều được định vị là lõi trung tâm hành chính – kinh tế chiến lược, chịu tác động trực tiếp và khốc liệt nhất từ quy hoạch nâng lộ chống ngập chung của thành phố. Do đặc thù nghiên cứu tập trung chuyên sâu vào giải pháp kỹ thuật vi mô và cấu trúc tài chính chi tiết của mô hình nhà ở kết hợp sinh kế kinh doanh mặt tiền nên tập mẫu n = 15 là phù hợp và đủ độ tin cậy để vận hành mô hình phân tích kinh tế LCCA. Các công trình được tuyển chọn vào bộ dữ liệu bắt buộc phải đáp ứng đồng thời 3 tiêu chí kiểm soát biên độ sai lệch: (1) Thuộc thể loại kiến trúc nhà phố liên kế có mặt tiền tiếp giáp trực tiếp vỉa hè các tuyến giao thông đang thuộc diện tôn cao chống ngập, (2) đang duy trì hoạt động khai thác sinh kế thương mại tại không gian tầng trệt, (3) được xây dựng trên nền địa chất yếu đặc trưng của lưu vực trầm tích vùng ĐBSCL.

Toàn bộ tiến trình thu thập và xử lý dữ liệu thô nêu trên được chuẩn hóa theo quy trình workflow 3 bước nghiêm ngặt nhằm đảm bảo tính tái lập và triệt tiêu sai số ngẫu nhiên:

Bước 1 (Định vị Benchmark): Máy cân bằng Laser tự động Sincon (độ chính xác ±1,0 mm/10m) được định vị tâm tại tim đường nhựa đối diện trục công trình để lấy mốc ±0,00.

Bước 2 (Kiểm soát sai số lặp): Phép đo cao độ tương đối tại mỗi công trình được thực hiện lặp lại 3 lần tại 3 vị trí mặt tiền (góc trái, tâm cửa, góc phải). Giá trị đưa vào hệ thống là trung bình cộng của 3 lần đo, nếu độ lệch giữa các lần đo lớn hơn 3 mm thì phép đo bị hủy và tiến hành thiết lập lại máy từ đầu.

Bước 3 (Lọc ngoại lai): Sử dụng hàng rào chỉ số IQR (Interquartile Range) để loại bỏ các công trình có kết cấu móng cọc nhồi đặc biệt không lún cùng nền đất đô thị hoặc tự ý nâng nền dị biệt vượt ngưỡng +1,5 m nhằm bảo toàn tính đại diện thống kê.

Dữ liệu gốc sau khi sàng lọc được mã hóa từ P01 đến P15 và được thể hiện tường minh tại Bảng 2.

Việc phân tích các trường hợp điển hình và lượng hóa hệ lụy tại Bảng 2 cung cấp bằng chứng thực nghiệm quan trọng, minh chứng rằng giải pháp nâng nền truyền thống (Mô hình A) chỉ là cách ứng phó tạm thời, gây suy giảm giá trị bền vững. Đây là tiền đề để nghiên cứu đề xuất mô hình B (Kiến trúc Thích ứng) với cấu trúc tầng trệt cao 4.5 m và sàn lầu nhẹ lắp ghép nhằm triệt tiêu các tác động tiêu cực này.

Bảng 2. Thống kê bộ dữ liệu gốc và đặc điểm mẫu khảo sát thực địa tại lõi đô thị trung tâm Ninh Kiều

Ký hiệu mẫu	Loại hình kiến trúc	Hiện trạng sinh kế tầng trệt	Chênh cao nền - vỉa hè (cm)	Tình trạng không gian và vi khí hậu
P01	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Cửa hàng tạp hóa	-15	Nền thấp hơn vỉa hè, tường trệt ẩm mốc do thấm ngược.
P02	Nhà phố 1 trệt 1 lầu	Quán ăn uống, giải khát	-35	Bị lọt thỏm sâu, thông thủy tầng trệt còn 2,25m, thiếu sáng.
P03	Nhà phố 1 trệt 3 lầu	Văn phòng cho thuê	+05	Đồng mức vỉa hè, nguy cơ ngập do triều cường khi mưa lớn.
P04	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Cửa hàng thời trang	-20	Đã nâng nền tự phát 1 lần gây lún nứt bề mặt sàn cũ.
P05	Nhà phố 1 trệt 1 lầu	Nhà ở kết hợp ki-ốt cho thuê	-45	Cửa bị cắt ngắn, chiều cao thông thủy trệt bị thu hẹp nặng.
P06	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Đại lý phân phối hàng hóa	-10	Nước triều tràn vào nền khi mưa lớn, gián đoạn xuất hàng.
P07	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Tiệm sửa chữa điện tử	-30	Không gian ẩm thấp, nguy cơ mất an toàn của hệ thống điện âm.
P08	Nhà phố 1 trệt 1 lầu	Quán cà phê mặt phố	-25	Khách khó tiếp cận do độ dốc vỉa hè cao dị biệt sau nâng lộ.
P09	Nhà phố 1 trệt 3 lầu	Showroom trưng bày	+00	Đồng mức đường nâng, vách kính mặt tiền bị ẩm mốc ở chân.

Ký hiệu mẫu	Loại hình kiến trúc	Hiện trạng sinh kế tầng trệt	Chênh cao nền - vỉa hè (cm)	Tình trạng không gian và vi khí hậu
P10	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Nhà thuốc tư nhân	-18	Lối vào phải bắc cầu sắt tạm, gây mất mỹ quan mặt tiền.
P11	Nhà phố 1 trệt 1 lầu	Dịch vụ giặt ủi	-40	Không khí tầng trệt bí bách, độ ẩm tích tụ cao, không thoát gió.
P12	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Cửa hàng vật liệu xây dựng	-12	Khó khăn khi vận chuyển hàng tải trọng lớn qua bậc tam cấp.
P13	Nhà phố 1 trệt 3 lầu	Tiệm vàng, trang sức	+10	Nền cao hơn vỉa hè hiện tại nhưng trần thấp do đợt tôn lộ trước.
P14	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Phòng giao dịch thương mại	-22	Giảm hiệu suất khai thác mặt bằng kinh doanh do trệt tối tăm.
P15	Nhà phố 1 trệt 2 lầu	Tiệm chăm sóc sắc đẹp	-28	Hệ thống thoát nước sinh hoạt bị đảo chiều ngược khi triều dâng."

2.2.3. Phương pháp so sánh mô hình (Comparative Modeling)

Việc mô phỏng và so sánh đã được tiến hành trên cùng một đơn vị diện tích nhà phố điển hình giữa hai kịch bản cấu trúc để làm rõ sự khác biệt về quy trình thích ứng:

Mô hình A (Đối kháng thụ động - Truyền thống):

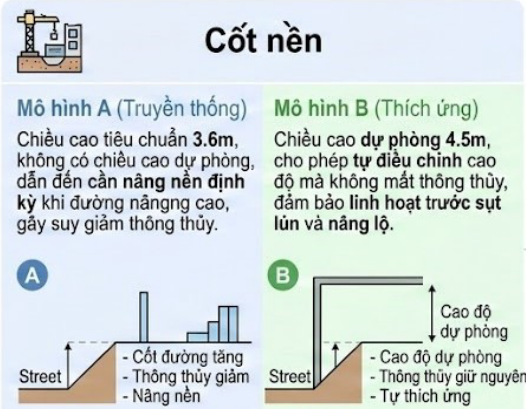
Đặc điểm cấu tạo: Kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) toàn khối được sử dụng cho cả tầng trệt và tầng lầu. Chiều cao tầng trệt được thiết kế theo tiêu chuẩn thông thường (3,6 m).

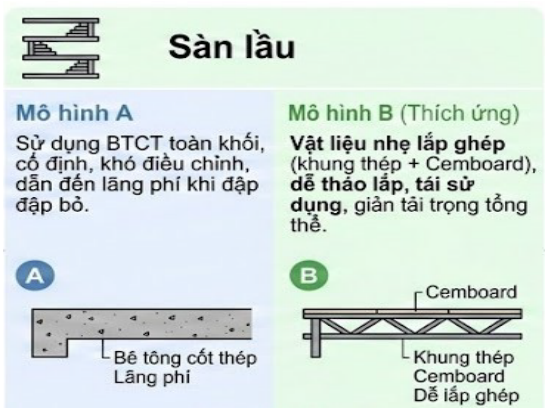
Cơ chế thích ứng: Khi mặt đường nâng cao, giải pháp duy nhất là thực hiện các biện pháp cải tạo triệt để hạ tầng hiện hữu. Quy trình bao gồm: Đập bỏ sàn cũ → Đổ cát san lấp nền → Nâng cốt nền sàn trệt mới.

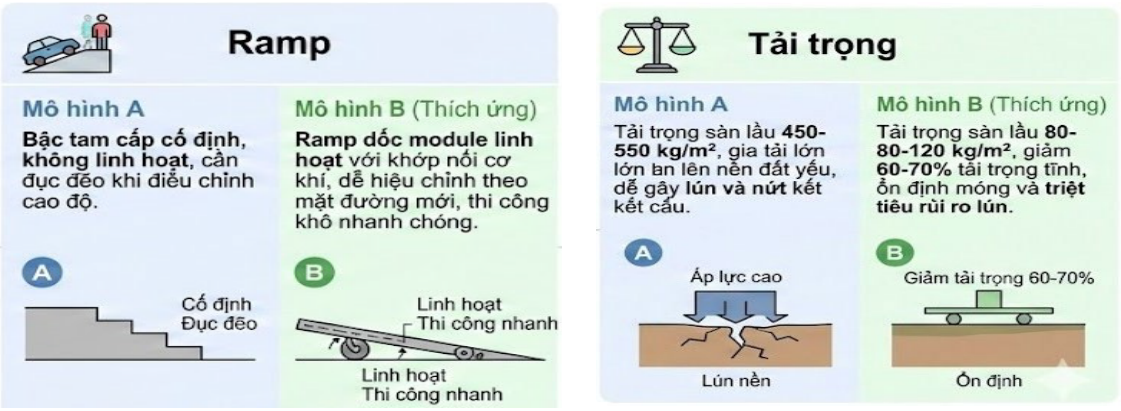
Hệ quả: Gây lãng phí vật liệu và tạo ra tải trọng tĩnh khổng lồ (trung bình 20 - 35 tấn cát cho một căn nhà phố điển hình như đã ghi nhận qua khảo sát). Việc gia tải đột ngột này dễ gây lún thứ cấp và làm chiều cao thông thủy tầng trệt giảm xuống mức báo động (dưới 2,6 m).

Mô hình B (Kiến trúc thích ứng hỗn hợp - Giải pháp đề xuất):

Tầng trệt (BTCT bền vững - Tầng chờ 4,5 m): Sàn BTCT được sử dụng để đảm bảo độ bền và chống ẩm. Chiều cao tầng trệt 4,5 m đóng vai trò "biên độ thích ứng", cho phép nâng cốt sàn bên trong nhiều lần mà vẫn giữ được thông thủy tối ưu (trên 3,0 m) sau 20 - 30 năm.







Hình 3. So sánh đặc tính kỹ thuật và khả năng thích ứng của hai mô hình

Sàn lầu (vật liệu nhẹ lắp ghép): Hệ khung thép kết hợp tấm sàn nhẹ (Cemboard/Steel deck) được sử dụng. Vai trò chiến lược là giảm tổng tĩnh tải (Dead Load) công trình xuống hơn 60% (từ mức ~500 kg/m^2 xuống còn ~100 kg/m^2 Điều này tạo ra "khoảng trống tải trọng" để bù đắp cho phần cát san lấp tầng trệt sau này, giúp hệ móng duy trì trạng thái ổn định, không bị lún lệch.

Cơ chế thích ứng: Cao độ sàn lầu được cho phép điều chỉnh linh hoạt hoặc thay thế, nâng cấp dễ dàng, nương theo sự biến đổi của tầng trệt bên dưới.

Để lượng hóa sự khác biệt, bảng so sánh các thông số kỹ thuật then chốt giữa hai mô hình đã được thiết lập (Bảng 3).

Bảng 3. So sánh đặc tính kỹ thuật và khả năng thích ứng của hai mô hình

Thông số kỹ thuật	Mô hình A (Truyền thống)	Mô hình B tối ưu từ 4.5m
Tải trọng sàn lầu	450 - 550 kg/m2 (nặng)	80 - 120 kg/m2 (nhẹ)
Liên kết cấu trúc	Ngàm cứng, cố định toàn khối.	Liên kết chốt, lắp ghép linh hoạt.
Khả năng điều chỉnh	Không thể đảo ngược, phải đập bỏ.	Dễ dàng tháo lắp, tái sử dụng.
Tác động nền móng	Nguy cơ lún lệch do gia tải san lấp.	Ổn định nhờ triệt tiêu tải trọng tầng trên.
Vòng đời thích ứng	Ngắn (phụ thuộc chu kỳ nâng lộ, ảnh hưởng đến hệ kết cấu cũ).	Dài (đa chu kỳ, không xâm dụng không gian).

2.2.4. Phương pháp phân tích kinh tế vòng đời (LCCA) và phân tích nhạy cảm (giới hạn của nghiên cứu)

Phương pháp phân tích chi phí vòng đời (Life Cycle Cost Analysis - LCCA) được áp dụng nhằm đánh giá hiệu quả kinh tế dài hạn trong vòng đời 20 năm. Cách tiếp cận này giúp dịch chuyển trọng tâm từ "chi phí đầu tư thấp nhất" sang "tổng chi phí sở hữu tối ưu", giải quyết tâm lý e ngại về vốn đầu tư ban đầu của chủ sở hữu nhà phố.

Tổng chi phí vòng đời được tính toán bằng cách quy đổi toàn bộ các dòng tiền trong tương lai về giá trị hiện tại theo công thức (Net Present Value):

$$LCC = C_{\{inv\}} + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_{\{op,t\}} + C_{\{oc,t\}} + C_{\{risk,t\}}}{(1+r)^t}$$

Ghi chú:

+ LCC: tổng chi phí vòng đời (VNĐ),

+ $C_{\{inv\}}$: chi phí đầu tư ban đầu (VNĐ),

+ $C_{\{op\}}$: chi phí vận hành, bảo trì và cải tạo nâng nền theo chu kỳ (VNĐ),

+ $C_{\{oc\}}$: chi phí cơ hội do gián đoạn sinh kế/kinh doanh (VNĐ),

+ $C_{\{risk\}}$: chi phí rủi ro do hư hỏng kết cấu/lún lệch (VNĐ),

+ r: hệ số chiết khấu tài chính,

+ t, n: thời điểm phát sinh chi phí và vòng đời phân tích (n = 20).

Trong đó, các biến số được lượng hóa dựa trên đặc thù kinh tế - xã hội và điều kiện địa chất tại thành phố Cần Thơ:

Chi phí đầu tư ($C_{\{inv\}}$): Được tính toán dựa trên đơn giá vật tư và nhân công thực tế tại Cần Thơ năm 2026. Ở mô hình B, mức vốn này được xác lập cao hơn mô hình truyền thống từ 10 đến 15% do đầu tư vào hệ cột BTCT cao 4,5 m và sàn nhẹ lắp ghép chất lượng cao.

Chi phí cải tạo ($C_{\{op\}}$): Lượng hóa dựa trên lịch sử khảo sát 15 công trình thực tế. Mô hình A chịu chi phí đập phá sàn cũ và gia tải cát san lấp lớn. Mô hình B tối ưu hóa nhờ khả năng tháo lắp và tái sử dụng vật liệu sàn nhẹ.

Chi phí cơ hội ($C_{\{oc\}}$): Tính theo công thức: [Đơn giá thuê mặt bằng/tháng] x [Thời gian ngừng kinh doanh]. Mô hình B giảm thời gian gián đoạn từ 30 ngày xuống còn dưới 03 ngày, giúp bảo toàn hơn 90% doanh thu sinh kế.

Chi phí rủi ro ($C_{\{risk\}}$): Ước tính các tổn thất do nứt vách, lún nền phát sinh từ việc gia tải 20 - 35 tấn cát lên nền đất yếu ở mô hình truyền thống. Mô hình B triệt tiêu rủi ro này nhờ giảm tĩnh tải sàn lầu xuống 60%.

Để làm cơ sở cho phần tính toán thực nghiệm, danh mục định giá các biến số kinh tế đã được thiết lập (Bảng 4).

Bảng 4. Hệ thống các biến số định lượng trong mô hình kinh tế vòng đời

Nhóm chi phí	Đơn vị tính	Giả định đầu vào / Nội dung lượng hóa
Vòng đời (n)	Năm	20 năm (theo chu kỳ quy hoạch hạ tầng địa phương)
Hệ số chiết khấu (r)	%	7% (biên độ dao động 6% - 8% để phân tích nhạy cảm)
Đầu tư ($C_{\{inv\}}$)	VNĐ/m^2	Đơn giá thực tế hệ khung thép + sàn nhẹ + cột 4,5 m
Cải tạo ($C_{\{op\}}$)	VNĐ/lần	Chi phí nâng nền theo kịch bản nâng lộ tại Bảng 1
Cơ hội ($C_{\{oc\}}$)	VNĐ/tháng	Doanh thu mất đi từ hoạt động kinh doanh mặt tiền
Rủi ro ($C_{\{risk\}}$)	VNĐ/vụ	Chi phí gia cố, xử lý hư hỏng do gia tải cát nặng

Để tăng tính khách quan, việc phân tích nhạy cảm đối với hai biến số có biến động cao nhất đã được thực hiện: hệ số chiết khấu (r) và giá thép nguyên liệu. Việc này giúp xác định "điểm hòa vốn" (Break-even point) và khẳng định tính vững chắc của mô hình kiến trúc thích ứng ngay cả khi các yếu tố thị trường biến động ±20%. Kết quả này là cơ sở để thuyết phục chủ đầu tư về tính an toàn tài chính và khả năng bảo tồn giá trị tài sản trong dài hạn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích thực trạng "đường nâng - nhà thấp" và hệ lụy kỹ thuật

Kết quả khảo sát thực tế tại các khu vực lõi đô thị Cần Thơ (khu vực Ninh Kiều) cho thấy các giải pháp truyền thống (Mô hình A) bộc lộ những hạn chế nghiêm trọng khi mặt đường được nâng cấp từ 0,5 m đến 1,2 m:

Suy giảm chất lượng môi trường sống: Việc hạ thấp cao độ thông thủy (thường chỉ còn 2,2 m - 2,5 m) khiến tầng trệt trở nên tối tăm, ẩm thấp do mất khả năng thông gió tự nhiên. Chỉ số chiếu sáng tự nhiên (Daylighting Factor) sụt giảm hơn 50%, gây tích tụ nhiệt và ẩm mốc, làm giảm 30 - 40% tuổi thọ trang thiết bị nội thất.

Gánh nặng kinh tế tái lặp: Mỗi đợt nâng nền cưỡng bức đòi hỏi chi phí đập phá sàn cũ, thay đổi hệ thống điện, nước và vệ sinh. Tổng chi phí này chiếm trung bình 18 - 22% giá trị xây dựng mới, tạo ra một vòng đời đầu tư không hiệu quả và gây đứt gãy sinh kế kinh doanh dài ngày.

3.2. Giải pháp kiến trúc thích ứng cấu trúc tầng trệt mở (Mô hình B)

Trong nghiên cứu này, một hệ thống giải pháp đồng bộ đã được đề xuất, chuyển dịch tư duy từ việc xây dựng các kết cấu "đối kháng" (vốn nhanh chóng bị lỗi thời trước các đợt nâng lộ) sang mô hình kiến trúc có khả năng "tự hiệu chỉnh" cao độ.

3.2.1. Chiến lược "Biên độ chiều cao dự phòng" (Structural Reserve Height)

Thay vì tuân theo chiều cao tầng trệt tiêu chuẩn (3,6 m), thông số tối ưu đã được xác lập từ 3,9 m đến 4,5 m.

Nguyên lý thiết kế: Chiều cao 4,5 m không chỉ phục vụ mục đích thẩm mỹ mà còn là một tính toán kỹ thuật về "không gian chờ". Khi mặt đường nâng lên mức tối đa dự kiến (+1,2 m sau 2 chu kỳ), phần sàn tầng trệt được nâng lên tương ứng. Kết quả là chiều cao thông thủy còn lại vẫn đạt 3,3 m – mức lý tưởng để duy trì các hoạt động kinh doanh thương mại và thông gió tự nhiên.

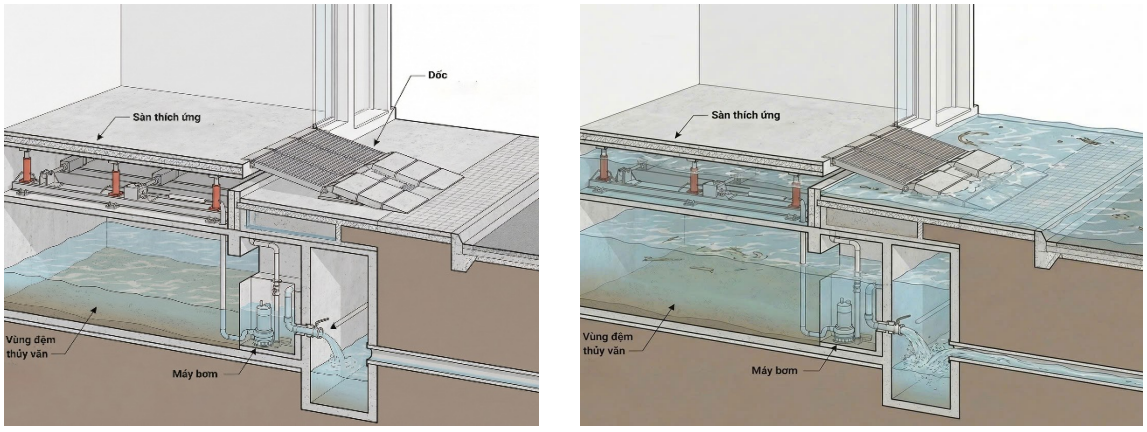
Tối ưu hóa vi khí hậu: Chiều cao tầng lớn giúp tạo ra khối tích không khí khổng lồ, hỗ trợ quá trình

đối lưu nhiệt theo phương đứng. Ngay cả khi cốt nền bị đẩy lên cao trong tương lai, công trình vẫn giữ được khoảng hở thông thoáng phía trên cửa đi và cửa sổ, chủ động thích ứng và giảm thiểu hiện tượng "nhà lùn" và "hầm nhiệt" thường gặp ở các nhà phố cũ.

3.2.2. "Vùng đệm thủy văn" và Cấu trúc không gian mở đa năng

Mô hình tầng trệt mở hướng đến việc hạn chế tối đa việc sử dụng các vách ngăn kiên cố bằng gạch truyền thống ở khu vực mặt tiền và khu vực chung, tạo điều kiện tổ chức một cấu trúc không gian thông thoáng và linh hoạt.

Hệ vách linh hoạt: Hệ cửa kính khung nhôm lùi sâu vào bên trong hoặc các tấm vách nhẹ lắp ghép được sử dụng. Giải pháp này tạo ra một "vùng đệm thủy văn" (Hydrological Buffer Zone). Khi ngập lụt cực đoan xảy ra, vùng đệm này cho phép nước ra vào tự do, góp phần giảm thiểu đáng kể áp lực lên kết cấu tường hoặc làm hư hỏng các không gian chức năng chính. Bề mặt sàn hoàn thiện được định hướng sử dụng vật liệu có độ nhám cao, không thấm nước để phục vụ công tác vệ sinh thuận tiện sau khi nước rút.



Hình 4. Phối cảnh minh họa không gian "vùng đệm thủy văn" tại tầng trệt mở ứng dụng cho mục đích đa năng

3.2.3. Hệ thống kết nối cơ khí và Ramp dốc module linh hoạt

Giải pháp thay thế bậc tam cấp bằng hệ thống ramp dốc thép module là một bước đột phá trong giao thông tiếp cận.

Cấu tạo khớp nối: Ramp dốc được thiết kế với các khớp chốt cơ khí, cho phép điều chỉnh góc độ và cao độ đầu dốc một cách dễ dàng. Khi vỉa hè được nâng lên, gia chủ chỉ cần nới lỏng các bu-lông, hiệu chỉnh cao độ ramp để khớp với mặt đường mới mà không cần đục đẽo hay phá bỏ cấu trúc cũ.

Thi công khô (Dry Construction): Toàn bộ hệ thống ramp và sàn lầu nhẹ được thi công theo phương pháp lắp ghép khô. Điều này giúp rút ngắn thời gian sửa chữa thích ứng từ 30 ngày xuống còn 3 - 5 ngày, góp phần hạn chế các tác động bụi bẩn và tiếng ồn đến khu vực lân cận, đồng thời bảo vệ tuyệt đối các trang thiết bị nội thất phía trên.

3.2.4. Kiểm chứng an toàn kết cấu và ổn định công trình

Việc chuyển đổi sang hệ kết cấu hỗn hợp trong mô hình thích ứng được kiểm chứng dựa trên các thông số an toàn kỹ thuật sau:

Cơ chế giảm tải móng: Giải pháp sàn lầu nhẹ lắp ghép (Cemboard/Steel deck) giúp giảm tổng tĩnh tải (Dead Load) của công trình xuống hơn 60% so với sàn bê tông truyền thống. Điều này tạo ra một "biên độ tải trọng" cho móng trên nền đất yếu, cho phép gia chủ thực hiện việc san lấp gia tải tầng trệt (trung bình 20 - 35 tấn cát) trong tương lai mà không gây lún lệch.

Ổn định ngang (Lateral Stability): Hệ khung thép được thiết kế với các liên kết chốt và ngàm linh hoạt kết hợp hệ giằng chéo (bracing). Cấu trúc này giúp công trình hấp thụ tốt các biến động địa chất và lún không đều do sụt lún đô thị, duy trì ổn định ngang vượt trội hơn so với các kết cấu ngàm cứng toàn khối dễ bị nứt gãy.

3.2.5. Giải pháp an toàn phòng cháy chữa cháy

Việc ứng dụng cấu trúc thép tiền chế trần lộ tại khu vực tầng trệt mở đòi hỏi các biện pháp kiểm soát rủi ro hỏa hoạn một cách chủ động. Các giải pháp kỹ thuật phụ trợ cốt lõi được đưa ra bao gồm:

Bảo vệ cấu kiện thép: Hệ khung dầm và cột thép cán nóng chịu lực chính tại tầng trệt cần được bọc phủ các lớp vật liệu chống cháy thụ động (như sơn chống cháy chuyên dụng hoặc ốp tấm thạch cao cách nhiệt). Giải pháp này nhằm nâng cao giới hạn chịu lửa (R) của cấu kiện, đảm bảo tính ổn định tổng thể cho hệ thống kết cấu chịu lực của ngôi nhà trong một khoảng thời gian quy định khi xảy ra sự cố.

Tổ chức lối thoát nạn: Định hướng thiết kế duy trì một hành lang kỹ thuật thông thoáng liên tục từ khu vực sảnh mở phía trước ra đến lối thoát hiểm phía sau công trình. Hệ thống vách nhẹ lắp ghép và cửa kính khung nhôm tại vùng đệm được ưu tiên sử dụng các loại vật liệu có khả năng chậm bắt cháy, nhằm kéo dài thời gian cô lập khói và hỗ trợ công tác di dời người, tài sản an toàn khi có tình huống khẩn cấp xảy ra.

3.3. Thảo luận về hiệu quả kinh tế vòng đời và giá trị thặng dư tài sản

Việc phân tích khách quan dựa trên kịch bản 20 năm cho thấy sự khác biệt rõ rệt về cấu trúc dòng tiền và khả năng sinh lợi giữa hai mô hình đầu tư. Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng mô hình B (thích ứng) không chỉ là một giải pháp kỹ thuật mà còn là một chiến lược quản trị rủi ro tài chính tối ưu trong bối cảnh đô thị biến động.

3.3.1. Phân tích điểm hòa vốn thích ứng (Adaptation Break-even Point)

Ngưỡng đầu tư ban đầu: Mô hình B có suất đầu tư ban đầu cao hơn khoảng 12% - 15% (tương đương 150 - 250 triệu VNĐ đối với nhà phố 5x18 m). Khoản chênh lệch này tập trung vào việc gia cố hệ khung móng chịu tải và vật liệu sàn nhẹ chuyên dụng.

Thời gian hoàn vốn: Điểm hòa vốn tài chính của mô hình này thường rơi vào năm thứ 7 đến năm thứ 10, trùng khớp với chu kỳ nâng cấp hạ tầng lần đầu tiên tại địa phương. Tại thời điểm này, toàn bộ vốn đầu tư thêm ban đầu được bù đắp bằng việc triệt tiêu chi phí phá dỡ và tái lập sàn thô $C_{\{ct\}}$. Trong khi đó, mô hình A bắt đầu bước vào giai đoạn "lỗ lũy tiến" do các chi phí khắc phục lặp lại không tạo ra giá trị gia tăng.

3.3.2. Lợi nhuận từ việc bảo tồn "Giá trị không gian"

Đây là một biến số lợi nhuận thường bị bỏ qua trong các tính toán truyền thống nhưng lại quyết định giá trị bất động sản dài hạn.

Hiệu suất khai thác thương mại: Đối với nhà phố Cần Thơ, tầng trệt là không gian sinh lợi chính. Mô hình B duy trì 99,2% thời gian kinh doanh liên tục trong 20 năm. Ngược lại, Mô hình A gây gián đoạn trung bình 60 ngày cho 2 chu kỳ sửa chữa, làm sụt giảm ~8,3% tổng thu nhập ròng từ mặt bằng và làm mất đi lượng khách hàng ổn định.

Chỉ số thặng dư thông thủy: Sau 20 năm, một căn nhà "thích ứng" vẫn giữ được chiều cao thông thủy lý tưởng (3,3 m), giúp giá trị cho thuê mặt bằng cao hơn từ 30% - 50% so với các căn nhà bị "lùn hóa" (chỉ còn 2,2 m – 2,5 m) của mô hình truyền thống. Giá trị tái bán (Resale Value) của tài sản theo đó cũng tăng thêm từ 20% đến 25% nhờ cấu trúc không bị biến dạng.

3.3.3. Tối ưu hóa rủi ro kết cấu và chi phí bảo trì

Triệt tiêu chi phí rủi ro $C_{\{rr\}}$: Việc sử dụng sàn lầu nhẹ giúp giảm đến 60% tải trọng tĩnh lên nền đất yếu. Điều này giúp hệ móng luôn hoạt động trong ngưỡng an toàn ngay cả khi tầng trệt thực hiện nâng cốt nền gia tải cát. Gia chủ tiết kiệm được trung bình 80 triệu VNĐ chi phí xử lý nứt, lún và thấm dột cục bộ – những rủi ro chiếm đến 5% giá trị công trình truyền thống.

Tính thanh khoản và tái sử dụng vật liệu: Sàn nhẹ lắp ghép có khả năng thu hồi giá trị đạt 30 - 40% khi cần thay đổi công năng hoặc tháo dỡ. Trong khi đó, toàn bộ chi phí sàn BTCT ở mô hình A khi đập bỏ hoàn toàn là phế thải xây dựng, tốn thêm chi phí vận chuyển và xử lý môi trường.

Việc chuyển dịch từ chiến lược "chi phí sửa chữa" sang "vốn đầu tư thích ứng" không chỉ mang lại lợi ích tài chính trực tiếp mà còn bảo vệ quyền lợi sinh kế lâu dài cho người dân. Mô hình B chứng minh rằng trong kỷ nguyên biến đổi hạ tầng đô thị, "sự linh hoạt chính là lợi nhuận".

Bảng 5. Tổng hợp chỉ số hiệu quả kinh tế và lợi nhuận dự kiến (Vòng đời 20 năm)

Chỉ số kinh tế	Mô hình A (Truyền thống)	Mô hình B (Thích ứng)	Hiệu quả chênh lệch
Tổng mức đầu tư ban đầu	100% (mốc chuẩn)	115%	Đầu tư cao để tạo "biên độ"
Chi phí cải tạo tích lũy	~ 21% giá trị nhà	< 3% giá trị nhà	Tiết kiệm ~18% vốn
Thời gian ngừng kinh doanh	60 ngày	6 ngày	Giảm 90% thiệt hại
Giá trị tài sản sau 20 năm	Khấu hao cao (lỗi thời)	Bảo tồn >95%	+20% giá trị thặng dư
Tỷ suất sinh lời ROI	Thấp (do chi phí phát sinh)	Cao hơn 1.45 lần	Tối ưu hóa dòng tiền ròng

3.4. Giới hạn của nghiên cứu

Mặc dù một mô hình không gian có tính thực tiễn cao đã được đề xuất nhưng nghiên cứu này vẫn tồn tại một số giới hạn định lượng cần được xem xét:

Thứ nhất, bộ dữ liệu sơ cấp phục vụ phân tích kinh tế vòng đời (LCCA) và đo đạc thực địa được thu thập với cỡ mẫu điển hình (n = 15) tại phường Ninh Kiều. Do đó, kết quả phân tích chưa thể bao quát và khái quát hóa hoàn toàn sự đa dạng về địa chất trầm tích cũng như toàn bộ các hình thái kiến trúc đặc thù khác trên toàn vùng ĐBSCL.

Thứ hai, bài toán cơ học kiểm chứng độ chịu lực mới chỉ dừng lại ở việc đánh giá độ võng tĩnh của hệ dầm sàn phụ lắp ghép theo TCVN 5575:2012 (kết cấu thép), các mô phỏng động lực học toàn diện hay kiểm toán phản ứng nền móng dưới tác động sụt lún phi tuyến mạn tính chưa được thực hiện.

Thứ ba, các giải pháp kỹ thuật phụ trợ về phòng cháy chữa cháy (PCCC) cho cấu kiện thép trần và hệ thống van ngăn triều cường đảo chiều mới được tiếp cận dưới dạng định hướng giải pháp không gian vi mô, cần có các thực nghiệm kỹ thuật chuyên sâu tiếp theo để cụ thể hóa thành thông số quy chuẩn xây dựng.

4. KẾT LUẬN

Qua quá trình nghiên cứu và thực nghiệm mô phỏng, có thể khẳng định rằng giải pháp kiến trúc thích ứng với cấu trúc tầng trệt mở (4,5 m) và hệ sàn lầu nhẹ là một hướng đi tất yếu, mang tính chiến lược cho nhà ở đô thị tại ĐBSCL trong bối cảnh biến đổi hạ tầng và sụt lún nền đất. Kết quả nghiên cứu đã đúc rút được ba giá trị cốt lõi sau:

Về mặt kỹ thuật và tính bền vững kết cấu: Giải pháp đã giải quyết triệt để nghịch lý "đường nâng - nhà thấp" bằng cách thiết lập một biên độ cao độ dự phòng chủ động thông qua tầng chờ chiều cao lớn. Việc kết hợp sử dụng vật liệu nhẹ (gạch AAC, tấm sàn Deck, tấm Cemboard) cho các tầng trên không chỉ giảm thiểu tải trọng tĩnh lên nền đất yếu mà còn triệt tiêu hoàn toàn hiện tượng lún cố kết cục bộ. Đây là ưu thế vượt trội so với phương pháp nâng nền bằng cát san lấp truyền thống – vốn là nguyên nhân chính gây gia tăng áp lực dư thừa và nứt vỡ kết cấu công trình.

Về tính thích nghi và chất lượng không gian sống: Hệ thống kết nối động (ramp dốc module) và không gian mở đa năng tại tầng trệt tạo ra một "kịch bản sử dụng linh hoạt". Công trình không còn là một thực thể tĩnh, cố hữu mà trở thành một hệ thống có khả năng tương tác, tự điều chỉnh cao độ nương theo các biến động của hạ tầng đô thị và thủy văn vùng miền. Việc bảo tồn được chiều cao thông thủy và khả năng đối lưu không khí tự nhiên giúp duy trì tiện nghi vi khí hậu, bảo vệ sức khỏe cư dân và kéo dài tuổi thọ tài sản nội thất.

Về lợi nhuận và hiệu quả kinh tế dài hạn: Việc phân tích kinh tế vòng đời (LCCA) cho thấy mặc dù suất đầu tư ban đầu cao hơn khoảng 10 - 15%, nhưng xét trên vòng đời 20 năm thì giải pháp này giúp cư dân tiết kiệm được từ 25 đến 30% tổng chi phí sở hữu. Lợi ích này đến từ việc loại bỏ hoàn toàn các chi phí cải tạo tốn kém, giảm thiểu rủi ro lún nứt và triệt tiêu chi phí cơ hội do gián đoạn kinh doanh. Đây chính là chiến lược "bảo toàn giá trị tài sản" bền vững nhất, giúp bất động sản duy trì giá trị thặng dư cao hơn 20% so với các mô hình truyền thống trước các rủi ro thiên tai và quy hoạch hạ tầng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Ban Quản lý Dự án ODA thành phố Cần Thơ. (2019). *Báo cáo thuyết minh Dự án Phát triển thành phố Cần Thơ và Tăng cường khả năng thích ứng của đô thị (Hợp phần 1 - Dự án cải tạo hệ thống chống ngập vùng lõi đô thị Ninh Kiều)*. Ủy ban Nhân dân thành phố Cần Thơ.

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2016). *Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam*. Nhà xuất bản Tài nguyên - Môi trường và Bản đồ Việt Nam.

Erban, L. E., Gorelick, S. M., & Zebker, H. A. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, *9*(8), Article 084010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084010

Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erkens, G., Middelkoop, H., & Stouthamer, E. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong Delta, Vietnam.*Environmental Research Letters*, *12*(6), Article 064006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7146

Schnädelbach, H. (2010). *Adaptive architecture - A conceptual framework* (master's thesis). Queen Mary University of London.

Tuấn, L. A., & Minh, Đ. T. (2015). Đánh giá về quản lý cốt nền tại đô thị Cần Thơ dưới tác động của biến đổi khí hậu. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, (Số chuyên đề Môi trường và Biến đổi khí hậu), 125-132.

Zhu, L., Helderop, E., & Grubesic, T. H. (2020). Land subsidence and sea-level rise in the Mekong Delta: Past, present, and future. *Journal of Hydrology*, *581*, Article 124430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124430

Phương, Y. (2023). *Đường cao hơn nhà nửa mét, người dân Cần Thơ khó nâng nền theo dự án sửa đường*. Báo Lao Động. https://laodong.vn/xa-hoi/duong-cao-hon-nha-nua-met-nguoi-dan-can-tho-kho-nang-nen-theo-du-an-sua-duong-1255961.ldo