

MCII

MÔ HÌNH HÓA RỦI RO LŨ LỤT TẠI MIỀN TRUNG VIỆT NAM

Đánh giá định lượng lợi ích của các
biện pháp thích ứng trong lưu vực
sông Hương

Tác giả:

Florian Waldschmidt ^{1,2}, Dhiraj Gyawali ^{1,2}, Eike Behre ¹, Kerstin Büche ³, Olabisi Obaitor ⁴, Maxime Souvignet ^{1,2}

Cơ quan công tác:

¹ Viện Đại học Liên Hợp Quốc – Viện An ninh Môi trường và Con người (UNU-EHS), Bonn, Đức

² Sáng kiến Bảo hiểm Khí hậu Munich (MCII), Bonn, Đức

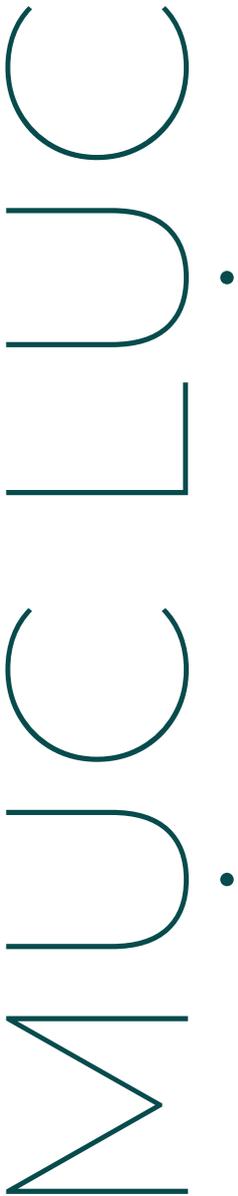
³ Công ty geomer GmbH, Heidelberg, Đức

⁴ Khoa Địa lý, Đại học Ludwig-Maximilians Munich (LMU), Munich, Đức

Báo cáo này được chuẩn bị trong khuôn khổ dự án FloodAdaptVN thuộc ưu tiên tài trợ “Phát triển bền vững các vùng đô thị” (SURE), do Bộ Giáo dục và Nghiên cứu Liên bang Đức (BMBF) tài trợ. Phân tích được thực hiện bởi Sáng kiến Bảo hiểm Khí hậu Munich (MCII), được UNU-EHS chủ trì, phối hợp với các đối tác dự án.

Các quan điểm và ý kiến được trình bày trong báo cáo này là của các tác giả và không nhất thiết phản ánh quan điểm của MCII, UNU-EHS, liên danh dự án FloodAdaptVN hoặc Bộ Giáo dục và Nghiên cứu Liên bang Đức (BMBF). Trách nhiệm về nội dung hoàn toàn thuộc về các tác giả.

Báo cáo này được xây dựng dựa trên ý kiến đóng góp và phản hồi của nhiều cá nhân. Xin trân trọng cảm ơn: Andrea Ortiz-Vargas, Dominic Sett, Tiến sĩ Felix Bachofer, Tiến sĩ Michael Hagenlocher, Tiến sĩ Michael Schultz và Tiến sĩ Yvonne Walz.

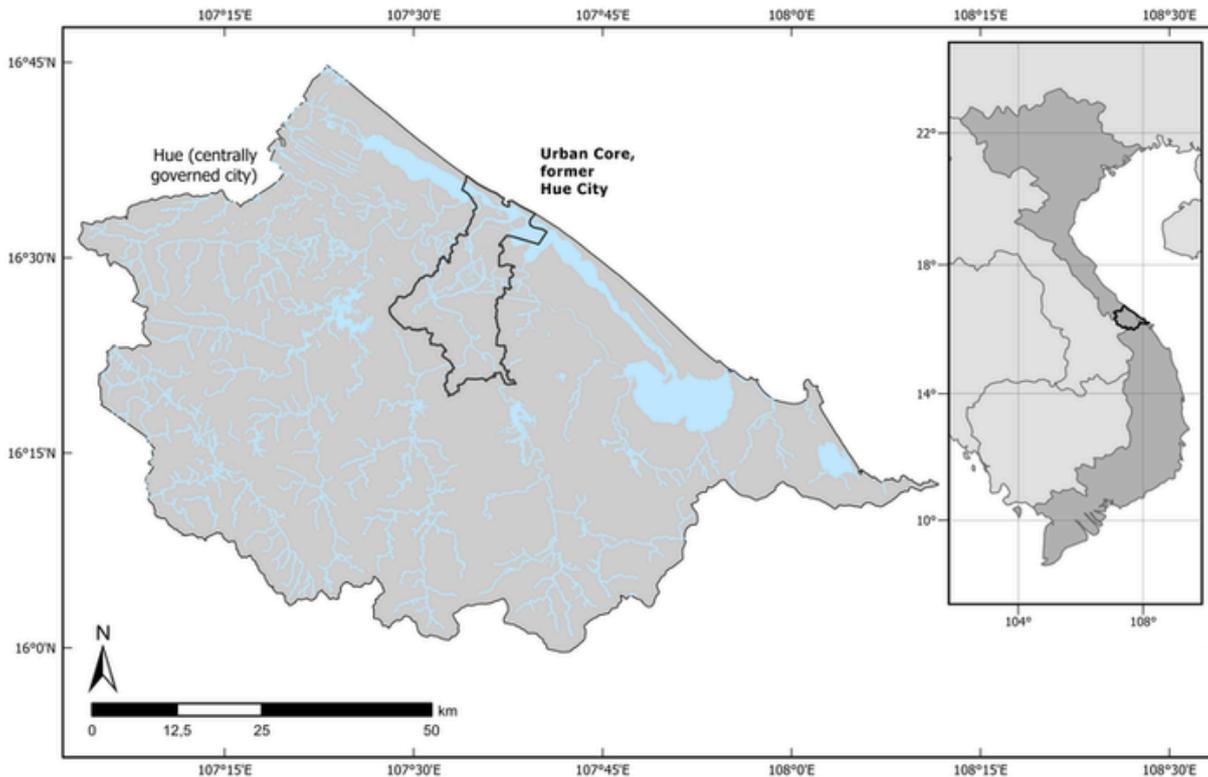


1.	GIỚI THIỆU	4
2.	DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP LUẬN	7
3.	KẾT QUẢ	14
4.	GIẢI QUYẾT KHOẢNG TRỐNG THÍCH ỨNG THÔNG QUA PHÂN TẦNG RỦI RO VÀ CƠ CHẾ TÀI CHÍNH – BẢO HIỂM RỦI RO KHÍ HẬU VÀ THIÊN TAI (CDRFI)	32
5.	KẾT LUẬN	35
6.	TÀI LIỆU THAM KHẢO	37

1.

GIỚI THIỆU

Đường bờ biển dài cùng các vùng dân cư đông đúc dọc sông và ven biển khiến Việt Nam đặc biệt dễ bị tổn thương trước các hiểm họa lũ lụt. Thành phố Huế – đô thị trực thuộc Trung ương, trước đây thuộc tỉnh Thừa Thiên Huế – là ví dụ điển hình cho mức độ dễ tổn thương này. Lưu vực sông Hương, một phần không thể tách rời của cảnh quan đô thị và vùng ven đô Huế, thường xuyên chịu ảnh hưởng của các trận lũ, gây thiệt hại nghiêm trọng cho cộng đồng, cơ sở hạ tầng và hệ sinh thái. Do đó, khu vực này được lựa chọn làm vùng nghiên cứu chính cho phân tích này (Hình 1).



Hình 1: Trung tâm đô thị Huế – Khu vực nghiên cứu.

Trong khuôn khổ giai đoạn Nghiên cứu và Phát triển của dự án FloodAdaptVN – được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Nghiên cứu Cộng hòa Liên bang Đức (BMBF) theo sáng kiến “Phát triển bền vững các vùng đô thị” – các đối tác trong liên danh đã hợp tác chặt chẽ nhằm nâng cao năng lực đánh giá rủi ro lũ hướng tới tăng cường khả năng chống chịu lũ lụt. Một trọng tâm quan trọng của dự án là đánh giá các chiến lược thích ứng mục tiêu, đặc biệt là các biện pháp thích ứng dựa vào hệ sinh thái (EbA), và tích hợp các biện pháp này vào quản lý rủi ro lũ địa phương nhằm hướng đến phát triển đô thị thích ứng và bền vững tại miền Trung Việt Nam, tập trung chủ yếu ở thành phố Huế và lưu vực sông Hương.

Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

- Hiểu rõ các yếu tố tác động đến rủi ro lũ lụt,
- Đánh giá mô hình phân bố không gian và động thái rủi ro,
- Phát triển công cụ hỗ trợ ra quyết định phục vụ quy hoạch không gian dựa trên thông tin rủi ro.

Một trong những nội dung trọng tâm của dự án là đánh giá và định giá tác động của lũ lụt đối với con người, cơ sở hạ tầng và hệ sinh thái (bao gồm cả các dịch vụ của hệ sinh thái). Để có được cái nhìn toàn diện, nhóm dự án đã áp dụng nhiều phương pháp khác nhau, bao gồm khảo sát hộ gia đình với nhiều câu hỏi liên quan đến rủi ro lũ lụt, cũng như các hội thảo với cơ quan quản lý, giới học thuật và cộng đồng địa phương. Những kết quả thực nghiệm này – kết hợp với tổng quan tài liệu khoa học và các báo cáo chính thức – là cơ sở cho việc phát triển khung kinh tế thích ứng với khí hậu tại Việt Nam (ECA-VN) và là nguồn dữ liệu đầu vào quan trọng cho nền tảng mô hình định lượng CLIMADA được sử dụng trong nghiên cứu này.

Báo cáo này cung cấp góc nhìn định lượng về rủi ro lũ lụt trong lưu vực sông Hương, sử dụng nền tảng mô hình mã nguồn mở CLIMADA để mô phỏng nguy cơ (hazard), mức độ phơi nhiễm (exposure) và tính dễ tổn thương (vulnerability), cùng với mô hình rừng ngẫu nhiên (random forest) được phát triển riêng để phân loại công trình xây dựng. Báo cáo này bổ sung cho đánh giá chi tiết trong báo cáo “Rủi ro lũ lụt tại Huế, miền Trung Việt Nam” (Sett và các cộng sự, 2025). Cùng với đó, các phân tích này và những kết quả khác của dự án FloodAdaptVN mang lại bức tranh toàn diện về động lực rủi ro lũ trong khu vực, hỗ trợ phát triển các chiến lược quản lý và thích ứng rủi ro lũ bền vững ở cấp lưu vực.

Phân tích trong báo cáo sử dụng khung ECA-VN, kết hợp giữa mô hình rủi ro xác suất (probabilistic risk modelling) và phân tích chi phí – lợi ích (CBA) để đánh giá và ưu tiên các biện pháp thích ứng. Một số điểm đổi mới đáng chú ý của khung này gồm việc áp dụng mô hình rừng ngẫu nhiên để ước tính loại hình công trình (xem Mục 4.2.1) và quy trình mô hình hóa có sự tham gia (participatory modelling). Cách tiếp cận có tính tham gia cao này nhấn mạnh sự tham gia liên tục của các bên liên quan, từ xác định vấn đề ưu tiên, lựa chọn giải pháp thích ứng, đến đánh giá và hiệu chỉnh kết quả mô hình. Điều này giúp đảm bảo tính phù hợp, đáng tin cậy và khả năng áp dụng cao, đồng thời phản ánh đúng ưu tiên và tri thức địa phương.

Báo cáo này đóng góp vào mục tiêu tổng thể của dự án FloodAdaptVN bằng việc cung cấp các kết quả định lượng về động lực rủi ro lũ lụt, đồng thời hỗ trợ phát triển các chiến lược thích ứng tổng hợp và bền vững cho thành phố Huế và lưu vực sông Hương.

Dựa trên cơ sở đó, báo cáo tập trung trả lời các câu hỏi chính sau:

- 1 Những tài sản và khu vực nào trong lưu vực sông Hương hiện đang chịu rủi ro cao nhất trước các sự kiện lũ hiện tại và tương lai?
- 2 Tác động kinh tế tiềm tàng của các rủi ro lũ này đối với cộng đồng và cơ sở hạ tầng địa phương là gì?
- 3 Các biện pháp thích ứng khác nhau, đặc biệt là biện pháp dựa vào hệ sinh thái, có hiệu quả và chi phí – hiệu quả ra sao trong việc giảm thiểu các rủi ro này?
- 4 Sự tham gia của các bên liên quan và mô hình hóa có sự tham gia có thể nâng cao tính phù hợp và khả năng ứng dụng của các đánh giá rủi ro lũ trong quá trình ra quyết định địa phương như thế nào?

Thông qua việc trả lời các câu hỏi trên, báo cáo cung cấp kết quả định lượng và các khuyến nghị thực tiễn nhằm định hướng công tác quản lý rủi ro lũ bao trùm, thích ứng và bền vững cho thành phố Huế.

Để đạt được mục tiêu trên, các Chương 2 đến Chương 4 trình bày phương pháp áp dụng – nền tảng CLIMADA, cùng các tham số đầu vào cần thiết như: tài sản, mô hình nguy cơ, hàm thiệt hại và các biện pháp thích ứng được lựa chọn. Chương 5 tóm tắt kết quả chính (trong khi phần lớn kết quả chi tiết được công bố trên nền tảng FRAME¹ để tránh mở rộng quá dài). Chương 6 tổng hợp kết luận và các khuyến nghị ban đầu dựa trên các kết quả định lượng.

¹ Nền tảng FRAME có thể truy cập tại <https://framefavn.org> (Liên danh dự án DLR/EOC FloodAdaptVN).

2.

DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP LUẬN

Để xây dựng một đánh giá định lượng đáng tin cậy về rủi ro lũ lụt tại thành phố Huế và lưu vực sông Hương, nhóm nghiên cứu trước hết trình bày các nguồn dữ liệu và quy trình xử lý dữ liệu, sau đó là phương pháp mô hình hóa xác suất được áp dụng thông qua nền tảng CLIMADA.

2.1 DỮ LIỆU

2.1.1 Dữ liệu hiểm họa lũ lụt

Bản đồ hiểm họa lũ sông cho lưu vực sông Hương được xây dựng bằng chuỗi mô hình thủy văn – thủy lực tích hợp, sử dụng phần mềm mã nguồn mở HEC-HMS (phiên bản 4.11) và HEC-RAS (phiên bản 6.5) do Trung tâm Kỹ thuật Thủy văn thuộc Quân đoàn Công binh Hoa Kỳ (2023, 2024) phát triển. Ba trận lũ lịch sử tiêu biểu – được phân loại theo Tổng cục Khí tượng Thủy văn Việt Nam bao gồm: lũ lịch sử (15/10 – 14/11/1999), lũ rất lớn (06/10 – 20/11/2020) và lũ lớn (01/10 – 30/11/2022), được mô phỏng để ước tính phạm vi ngập lụt trong điều kiện hiện tại. Các đầu vào chính bao gồm:

Địa hình và lớp phủ bề mặt: Mô hình độ cao kỹ thuật số Copernicus DEM 30m và bản đồ sử dụng đất/lớp phủ đất JAXA 30m; các tham số SCS Curve Number, dung tích giữ nước tán cây, hệ số nhám (Manning's n) cho vùng ngập và lòng sông.

Dữ liệu thủy – khí tượng: Lượng mưa theo ngày/giờ từ mạng lưới trạm đo cấp tỉnh (nội suy bằng phương pháp nghịch đảo khoảng cách), chuỗi mực nước triều, cùng các quy tắc vận hành và đường cong quan hệ mực nước – dung tích hồ tại Hương Điền, Tả Trạch và Bình Điền (theo Quyết định 1606/QĐ-TTg).

Tham số mô hình: Mô hình lưu vực trong HEC-HMS được thiết lập với phương pháp tổn thất SCS-CN và truyền lũ ModClark; mô hình HEC-RAS sử dụng lưới 2D cho khu vực đồng bằng, tích hợp dòng chảy đầu vào từ mô hình thủy văn và điều kiện biên mực nước biển. Hiệu chỉnh mô hình dựa trên dữ liệu vệ tinh (Sentinel-1, RADARSAT, TerraSAR-X) do hạn chế số liệu đo tại hiện trường. Phạm vi ngập mô phỏng được so sánh với vùng ngập quan sát được bên ngoài khu vực đô thị.

Tích hợp kịch bản vào mô hình hiểm họa: Để phản ánh tác động kết hợp của biến đổi khí hậu và phát triển kinh tế – xã hội, đặc biệt là quá trình đô thị hóa, nhóm nghiên cứu đã nội suy các kịch bản phát triển kinh tế – xã hội toàn cầu (SSP) xuống cấp tỉnh cho khu vực Thừa Thiên Huế. Thông qua tham vấn chuyên gia và hội thảo với các bên liên quan, các kịch bản toàn cầu (SSP1 – Phát triển bền vững; SSP2 – Trung bình; SSP3 – Cạnh tranh khu vực) được điều chỉnh để phù hợp với bối cảnh địa phương, bao gồm dự báo tăng trưởng đô thị đến năm 2050. Bốn kịch bản khí hậu – phát triển (RCP-SSP) được sử dụng trong mô phỏng bao gồm:

- RCP4.5-SSP1: Phát thải trung bình, phát triển bền vững – định hướng tăng trưởng xanh, cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường.
- RCP4.5-SSP2: Phát thải trung bình, phát triển trung bình – tăng trưởng vừa phải, chính sách phát triển và thích ứng được triển khai ở mức cân đối.
- RCP8.5-SSP2: Phát thải cao, phát triển trung bình – chịu tác động khí hậu mạnh, rủi ro cao hơn đối với các lĩnh vực kinh tế – xã hội.
- RCP8.5-SSP3: Phát thải cao, phát triển phân mảnh – tăng trưởng thiếu bền vững, hợp tác quốc tế hạn chế, năng lực thích ứng yếu.

Các yếu tố theo kịch bản này được dùng để hiệu chỉnh mô hình lượng mưa, lớp phủ đất và điều kiện biên thủy triều trong HEC-HMS và HEC-RAS, giúp đảm bảo bản đồ hiểm họa phản ánh sát thực các điều kiện khí hậu tương lai có thể xảy ra (Obaitor và các cộng sự; Büche và các cộng sự, 2025).

2.1.2 Dữ liệu phơi nhiễm

“Phơi nhiễm” (exposure) đề cập đến phân bố không gian và giá trị của các tài sản có thể bị tác động bởi hiểm họa (Aznar-Siguan và Bresch 2019), bao gồm công trình, hạ tầng và dân cư. Trong nghiên cứu này, dấu vết công trình (building footprints) và giá trị tài sản ước tính được sử dụng làm đại diện cho mức độ phơi nhiễm vật chất.

Đối với tài sản hạ tầng như nhà ở, đường bộ, đường sắt hay trạm điện, nghiên cứu chủ yếu dựa vào dữ liệu từ OpenStreetMap (Geofabrik, 2024), được bổ sung bằng khảo sát thực địa do các đối tác trong dự án thực hiện năm 2023–2024. Khảo sát này thu thập chi tiết về mục đích sử dụng, chiều cao và tình trạng công trình. Ngoài ra, ảnh quang học và radar tổng hợp được xử lý trên nền tảng SEPAL của FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024) để phục vụ phân tích không gian. Dữ liệu độ cao kỹ thuật số TanDEM-X 90m (DLR, 2020) được sử dụng bổ sung cho mô hình địa hình.² Dữ liệu độ cao kỹ thuật số TanDEM-X 90m từ Trung tâm Không gian Đức (2020) được sử dụng bổ sung cho mô hình địa hình.

Đối với tài sản nông nghiệp, dữ liệu lớp phủ đất do Cơ quan Hàng không Vũ trụ Nhật Bản (JAXA, 2021) cung cấp ở độ phân giải 30m. Tài sản nuôi trồng thủy sản được lấy từ Nieskens and Bachofer (2021). Giá trị tiền tệ của các loại tài sản hạ tầng (công trình, đường, đường sắt, trạm điện) được xác định theo quy định của Bộ Xây dựng (Quyết định 65/QĐ-BXD, 20/01/2021). Để duy trì mức độ chi tiết cần thiết, các tuyến đường và đường sắt được chia thành các đoạn nhỏ (khoảng 100m). Giá trị sản phẩm nông

NGHIỆP VÀ THỦY SẢN ĐƯỢC TỔNG HỢP TỪ CÁC NGUỒN TÀI LIỆU (Belton và các cộng sự, 2011, FAO 2024, Boonstra và Hanh 2015 và Niên giám thống kê Thừa Thiên Huế (2022).

Dân cư phơi nhiễm được xác định dựa trên dữ liệu dân số cấp địa phương với độ phân giải 100m (Carioli và các cộng sự, 2023; Cục Thống kê Huế, 2022). Dân số được phân bố ngẫu nhiên vào các công trình nhà ở theo phân phối Poisson cắt ngắn³, dựa trên quy mô hộ trung bình của từng phường/xã (Jarosz 2021). Để phân loại công trình nhà ở trong số toàn bộ các công trình, nhóm nghiên cứu áp dụng mô hình Rừng ngẫu nhiên (Random Forest)(Breiman 2001)– chi tiết mô tả trong phần Phương pháp luận (2.2). Với nhà ở nhiều hộ, diện tích trung bình được giả định là 90 m², theo Quyết định 65/QĐ-BXD (Bộ Xây dựng, 2021).

² Khu vực nghiên cứu được xác định trong phạm vi tọa độ 15.994234–16.746663°B; 107.055107–108.211778°Đ (hệ tọa độ EPSG:4326). Ảnh quang học: Dữ liệu ảnh Sentinel-2 L2A (bề mặt phản xạ, COPERNICUS/S2_SR) từ ngày 01/01/2023 đến 31/12/2023 được tổng hợp bằng công thức mặt định optical_mosaic (cloud_masking = true; max_cloud_cover = 20%), tạo ra lưới ảnh 30 m (0,0000898315°) bao gồm các chỉ số Blue, Green, Red, NIR, NDVI, EVI, Brightness, Wetness và Greenness (12.876 × 8.376 px; định dạng Int16). Ảnh radar: Dữ liệu Sentinel-1 GRD (COPERNICUS/S1_GRD) trong cùng giai đoạn được tổng hợp bằng công thức mặt định radar_mosaic, cho ra lưới ảnh 15 m (0,0001347473°) với các chỉ số VH và VV (biên độ, giá trị trung bình, trung vị, cực đại, cực tiểu, hệ số biến thiên, pha, sai số dư, độ lệch chuẩn và kết cấu bề mặt; 8.584 × 5.584 px; định dạng Float32). Tất cả các sản phẩm đầu ra (GeoTIFF/VRT) được xuất ngày 12/01/2024 (quang học) và 16/01/2024 (radar).

³ Phân phối Poisson, khác với phân phối Chuẩn (Normal distribution), thường lệch trái khi giá trị trung bình thấp, như trong trường hợp này – giá trị trung bình dao động từ 2,7 đến 4,2. Điều đó có nghĩa là phân phối tập trung nhiều ở các giá trị gần 0 và có đuôi kéo dài về bên phải, tức là tồn tại một số giá trị lớn hơn trung bình. Vì vậy, phân phối này không đối xứng. Đặc điểm đó rất phù hợp để mô tả quy mô hộ gia đình, khi các giá trị 0 (tức là không có hộ hoặc hộ không có thành viên) bị loại bỏ khỏi phân phối.

Bảng 1. Nhóm tài sản và loại tài sản được lựa chọn

NHÓM TÀI SẢN	LOẠI TÀI SẢN
CƠ SỞ HẠ TẦNG	
	Nhà ở dân cư
	Đường bộ & đường sắt
	Trạm điện
	Cơ quan hành chính
	Cơ sở y tế & giáo dục
	Cơ sở lưu trú
	Chợ & trung tâm thương mại
HỆ SINH THÁI	
	Ruộng lúa
	Cây lâu năm
	Cây ngắn ngày (đậu, ngô, khoai...)
	Ao đất
	Ao tre/lồng lưới
	Lồng nuôi thủy sản
DÂN CƯ	
	Con người

Để phản ánh sự thay đổi theo thời gian (về kinh tế và dân số), mô hình đưa vào giả định tốc độ tăng trưởng trung bình cùng khoảng bất định trong quá trình mô phỏng định lượng:

- Tăng trưởng kinh tế trung bình: 7,52%/năm (Chính phủ Việt Nam 2022, 2023).;
- Tăng trưởng dân số trung bình: 1,38%/năm (Chính phủ Việt Nam , 2023).;
- Các giá trị này được hiệu chỉnh theo ước lượng của the Economist Intelligence Unit(2024).

2.1.3 Adaptation Measures

For the evaluation of adaptation measures, a short list of adaptation measures to be quantitatively evaluated was derived throughout the project (Sett et al. 2025; Ortiz Vargas et al. 2025). The final list, incl. which assets they target in which parts of the catchment, can be found in Table 2.

Table 2: Overview of Assessed Adaptation Measures and Targeted Asset Types.

TÊN BIỆN PHÁP	LOẠI BIỆN PHÁP	KHU VỰC ÁP DỤNG	VÙNG CHỊU TÁC ĐỘNG DỰ KIẾN	TÀI SẢN MỤC TIÊU	CHI PHÍ ƯỚC TÍNH (TỶ VND, GỒM ĐẦU TƯ VÀ BẢO TRÌ)	CHI PHÍ ƯỚC TÍNH (TRIỆU USD NĂM 2025)
Cải tạo nhà ở (chống ngập khô)	Cấu trúc	Đô thị	Đô thị	Nhà ở, Người dân	7,138	273
Hệ thống cảnh báo sớm (cấp lưu vực)	Cấu trúc	Toàn khu vực	Toàn khu vực	Nông nghiệp (mọi loại cây trồng), Nuôi trồng thủy sản, Nhà ở, Người dân, Đường bộ & đường sắt, Trạm điện	176	68
Bảo hiểm nông nghiệp	Thể chế	Ven biển & ven đô (thượng – hạ lưu)	Ven biển & ven đô (thượng – hạ lưu)	Nông nghiệp (mọi loại cây trồng), Người dân	19	7
Chiến dịch nâng cao nhận thức rủi ro lũ lụt	Xã hội	Đô thị	Đô thị	Người dân	296	11
Nông lâm kết hợp trong dải ven sông	EbA	Ven đô (hạ lưu)	Ven đô (hạ lưu), Đô thị	Nông nghiệp, Nuôi trồng thủy sản, Nhà ở, Người dân, Hạ tầng giao thông, Trạm điện	803	31
Quản lý rừng bền vững	EbA	Thượng lưu	Ven đô (thượng – hạ lưu)	Nông nghiệp, Nuôi trồng thủy sản, Nhà ở, Người dân, Hạ tầng giao thông, Trạm điện	130	50
Nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu (CSA)	EbA	Ven biển & ven đô (thượng – hạ lưu)	Ven biển & ven đô (thượng – hạ lưu)	Nông nghiệp, Người dân	2,031	77
Khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị	EbA	Đô thị	Đô thị, ven đô hạ lưu	Nhà ở, Người dân, Hạ tầng giao thông, Trạm điện	105	40
Trồng rừng ngập mặn	EbA	Ven biển	Ven biển	Nông nghiệp, Người dân	347	13
Tổng cộng					1 104,5	422

2.2 PHƯƠNG PHÁP LUẬN

2.2.1 Khung mô hình CLIMADA

Để đánh giá rủi ro lũ lụt hiện tại và tương lai tại lưu vực sông Hương và thành phố Huế, nghiên cứu này sử dụng nền tảng CLIMADA (CLIMate ADaptation) – một khung mô hình định lượng xác suất mã nguồn mở được thiết kế nhằm ước tính tác động của các hiểm họa khí hậu và đánh giá lợi ích của các biện pháp thích ứng (Aznar-Siguan và Bresch 2019; Bresch và Aznar-Siguan 2020). CLIMADA có cấu trúc mô-đun, bao gồm bốn thành phần cốt lõi: hiểm họa (hazard), phơi nhiễm (exposure), tính dễ tổn thương (vulnerability) và thích ứng (adaptation). Bốn mô-đun này được tích hợp để mô phỏng toàn bộ chuỗi tác động – từ sự kiện khí hậu đến tổn thất kinh tế – xã hội, qua đó cho phép tính toán các chỉ số rủi ro như tác động trung bình hàng năm kỳ vọng (Expected Annual Impact – EAI), bản đồ rủi ro, cũng như tỷ lệ lợi ích – chi phí (Benefit–Cost Ratio) của các biện pháp thích ứng.

Nhờ cấu trúc linh hoạt này, CLIMADA cho phép so sánh và xếp hạng hiệu quả các chiến lược thích ứng trong nhiều kịch bản khí hậu và phát triển kinh tế – xã hội khác nhau, đồng thời đảm bảo tính minh bạch và khả năng truy xuất của toàn bộ quy trình mô phỏng.

2.2.2 Mô hình hóa tính dễ tổn thương

Trong cách tiếp cận mô hình xác suất, tính dễ tổn thương được mô tả thông qua các hàm dễ tổn thương (vulnerability functions) – hay còn gọi là hàm thiệt hại (damage functions). Các hàm này biểu diễn mối quan hệ giữa cường độ hiểm họa (ví dụ: độ sâu ngập) và mức độ thiệt hại kỳ vọng của từng loại tài sản hoặc nhóm tài sản (Aznar-Siguan và Bresch 2019). Việc xác định đúng các hàm này là yếu tố then chốt để đảm bảo các ước lượng về tác động là thực tế, đáng tin cậy và có thể so sánh được.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả áp dụng phương pháp kết hợp (hybrid approach) để xây dựng các hàm dễ tổn thương. Trước hết, các hàm thiệt hại tổng quát (generic functions) được tham khảo từ Trung tâm Nghiên cứu Chung của Ủy ban châu Âu – JRC (Moel và các cộng sự, 2016) và từ các ứng dụng trước đó tại Cần Thơ,

Việt Nam và các cộng sự, 2021). Tiếp theo, các hàm này được hiệu chỉnh dựa trên dữ liệu thiệt hại thực tế cấp huyện của tỉnh Thừa Thiên Huế trong giai đoạn 2003–2022, ghi nhận chi tiết thiệt hại do lũ gây ra đối với người dân, cơ sở hạ tầng, nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản. Dựa trên các dữ liệu này, độ dốc và ngưỡng thiệt hại của từng hàm được điều chỉnh để phản ánh sát thực điều kiện tại địa phương. Trong trường hợp thiếu dữ liệu định lượng, nhóm nghiên cứu đã kết hợp ý kiến chuyên gia và tham vấn các cơ quan quản lý địa phương để hiệu chỉnh thêm, đảm bảo kết quả mô phỏng có độ tin cậy cao và phù hợp với bối cảnh vùng nghiên cứu.

2.2.3 Phân loại công trình bằng mô hình Rừng ngẫu nhiên (Random Forest Model)

Loại hình công trình là yếu tố quan trọng trong việc hiểu rõ tác động của lũ ở quy mô chi tiết, đồng thời là dữ liệu đầu vào thiết yếu cho mô hình CLIMADA trong đánh giá rủi ro và phân tích lợi ích thích ứng. Nhằm nâng cao độ chính xác, nhóm nghiên cứu đã xây dựng quy trình phân loại hai giai đoạn dựa trên mô hình Rừng ngẫu nhiên (Random Forest), để phân loại từng dấu vết công trình theo nhóm chức năng và mức độ dễ tổn thương tương ứng.

Phân tích được thực hiện bằng Python 3.11.7, sử dụng các thư viện scikit-learn 1.0.2 2 (Pedregosa và các cộng sự, 2011 và Optuna 3.4.0 (Akiba và các cộng sự, 2019). Để đảm bảo khả năng tái lập, tham số ngẫu nhiên (random_state) được cố định ở giá trị 42 trong toàn bộ quá trình huấn luyện, chia tập dữ liệu và đánh giá mô hình.

Ở **giai đoạn thứ nhất**, mô hình Rừng ngẫu nhiên được huấn luyện để phân loại các công trình vào 13 nhóm chức năng chính như nhà ở, cơ sở giáo dục, khu công nghiệp, chợ, cơ quan hành chính, cơ sở văn hóa – y tế, v.v. Bộ dữ liệu huấn luyện kết hợp giữa thông tin khảo sát thực địa (vật liệu, số tầng, mục đích sử dụng) và biến không gian thu được từ dữ liệu viễn thám (độ cao, diện tích mặt bằng, mật độ công trình, khoảng cách đến đường chính, chỉ số radar và quang học).

Các siêu tham số như số lượng cây, độ sâu tối đa, tiêu chí chia nhánh, kích thước nút lá và lựa chọn đặc trưng được tối ưu hóa bằng Optuna thông qua hơn 2.000 lần thử nghiệm (Akiba và các cộng sự, 2019), nhằm tối đa hóa độ chính xác có trọng số trong tập dữ liệu huấn luyện – kiểm định theo tỷ lệ 80/20.

Ở **giai đoạn thứ hai**, tất cả các công trình được xác định là “nhà ở” từ giai đoạn trước được phân loại chi tiết hơn thành nhà đơn hộ (single-family) và nhà nhiều hộ (multi-family). Mô hình sử dụng cùng tập biến đầu vào và kiến trúc Rừng ngẫu nhiên tương tự, đồng thời xử lý mất cân bằng dữ liệu giữa các nhóm bằng cách hiệu chỉnh trọng số.

Trong cả hai giai đoạn, dữ liệu thiếu được xử lý bằng SimpleImputer, các biến phân loại được mã hóa bằng LabelEncoder, và các biến liên tục được chuẩn hóa thông qua StandardScaler⁴. Quy trình được huấn luyện trên 5.382 mẫu có nhãn ở giai đoạn 1, và tập con tương ứng 75% cho nhóm nhà ở ở giai đoạn 2. Kết quả cho thấy mô hình cuối cùng đã phân loại thành công 114.988 dấu vết công trình trong toàn bộ lưu vực sông Hương.

Kiểm định độc lập với 1.077 mẫu cho thấy độ chính xác tổng thể đạt 91%, với độ chính xác, độ bao phủ và điểm F1 trung bình có trọng số đều đạt 0,91. Độ bao phủ theo nhóm dao động từ 28% (nhóm nhỏ nhất) đến 98% (nhóm lớn nhất), phản ánh đặc trưng tự nhiên của phân bố loại công trình đô thị.

Phân tích tầm quan trọng của biến đầu vào cho thấy năm biến quan trọng nhất – bao gồm diện tích công trình, mật độ dân cư theo phường/xã, khoảng cách đến đường chính, khoảng cách đến quốc lộ và khoảng cách đến đường dân sinh – chiếm hơn 25% tổng trọng số ảnh hưởng của mô hình. Toàn bộ mã nguồn và kết quả kiểm định chi tiết được lưu trữ và có thể cung cấp theo yêu cầu.

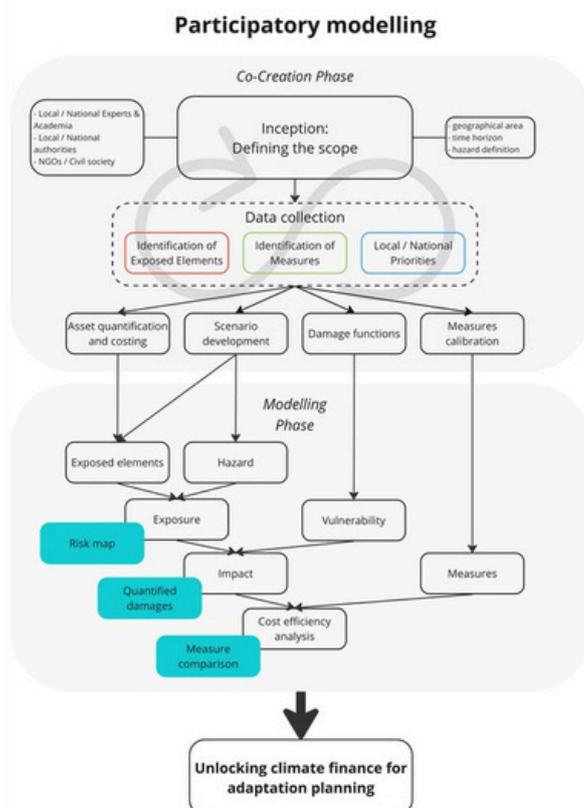
2.2.4 Quy trình mô hình hóa có sự tham gia

Việc áp dụng CLIMADA trong khuôn khổ ECA-VN được thực hiện theo phương pháp mô hình hóa có sự tham gia (participatory approach) (Hình 2), nhằm bảo đảm kết quả mô hình phù hợp với bối cảnh địa phương, minh bạch trong quá trình triển khai, và được xác thực bởi các bên liên quan.

Các bên tham gia gồm chính quyền địa phương, cơ quan chuyên môn, viện nghiên cứu, trường đại học, tổ chức xã hội và các đối tác quốc tế trong dự án. Quy trình được triển khai qua ba bước chính:

- Xây dựng và điều chỉnh kịch bản: Các kịch bản RCP–SSP toàn cầu được nội suy và hiệu chỉnh cho tỉnh Thừa Thiên Huế, phản ánh xu thế đô thị hóa, tăng trưởng dân số và phát triển hạ tầng đến năm 2050.
- Xác nhận dữ liệu và giả định mô hình: Các bên cùng rà soát danh mục tài sản, phương pháp định giá và hàm thiệt hại – độ sâu, nhằm đảm bảo tính thống nhất và phù hợp với điều kiện thực tế.
- Lựa chọn và hiệu chỉnh biện pháp thích ứng: Dựa trên kết quả mô phỏng, các bên xác định các biện pháp thích ứng khả thi, thống nhất về chi phí, hiệu quả và vòng đời áp dụng, sau đó tích hợp vào mô hình CLIMADA.

Cách tiếp cận này tăng tính tin cậy, khả năng ứng dụng và mức độ chấp nhận của kết quả mô hình, đồng thời định hướng cho phân tích chi phí – lợi ích (Benefit–Cost Analysis) trong bốn kịch bản khí hậu – phát triển (RCP4.5–SSP1, RCP4.5–SSP2, RCP8.5–SSP2, RCP8.5–SSP3). Kết quả thu được là các khuyến nghị thích ứng có cơ sở định lượng, thực tiễn và phù hợp với điều kiện địa phương..



Hình 2: Quy trình mô hình hóa có sự tham gia trong khuôn khổ ECA-VN

⁴ Quy trình xử lý dữ liệu đầu vào bao gồm ba bước chính: bù khuyết dữ liệu (imputation), mã hóa biến phân loại (encoding) và chuẩn hóa biến liên tục (standardization). Bước bù khuyết đảm bảo rằng không có giá trị thiếu nào làm gián đoạn quá trình huấn luyện mô hình. Mã hóa chuyển các nhãn văn bản hoặc biến phân loại thành mã số học, giúp bộ phân loại có thể xử lý được. Chuẩn hóa đưa các biến liên tục về cùng một thang đo, nhằm đảm bảo các biến này đóng góp công bằng vào quá trình huấn luyện mô hình. Ba bộ biến đổi tiền xử lý này đều là thành phần của thư viện scikit-learn phiên bản 1.0.2 (Pedregosa và cộng sự, 2011).

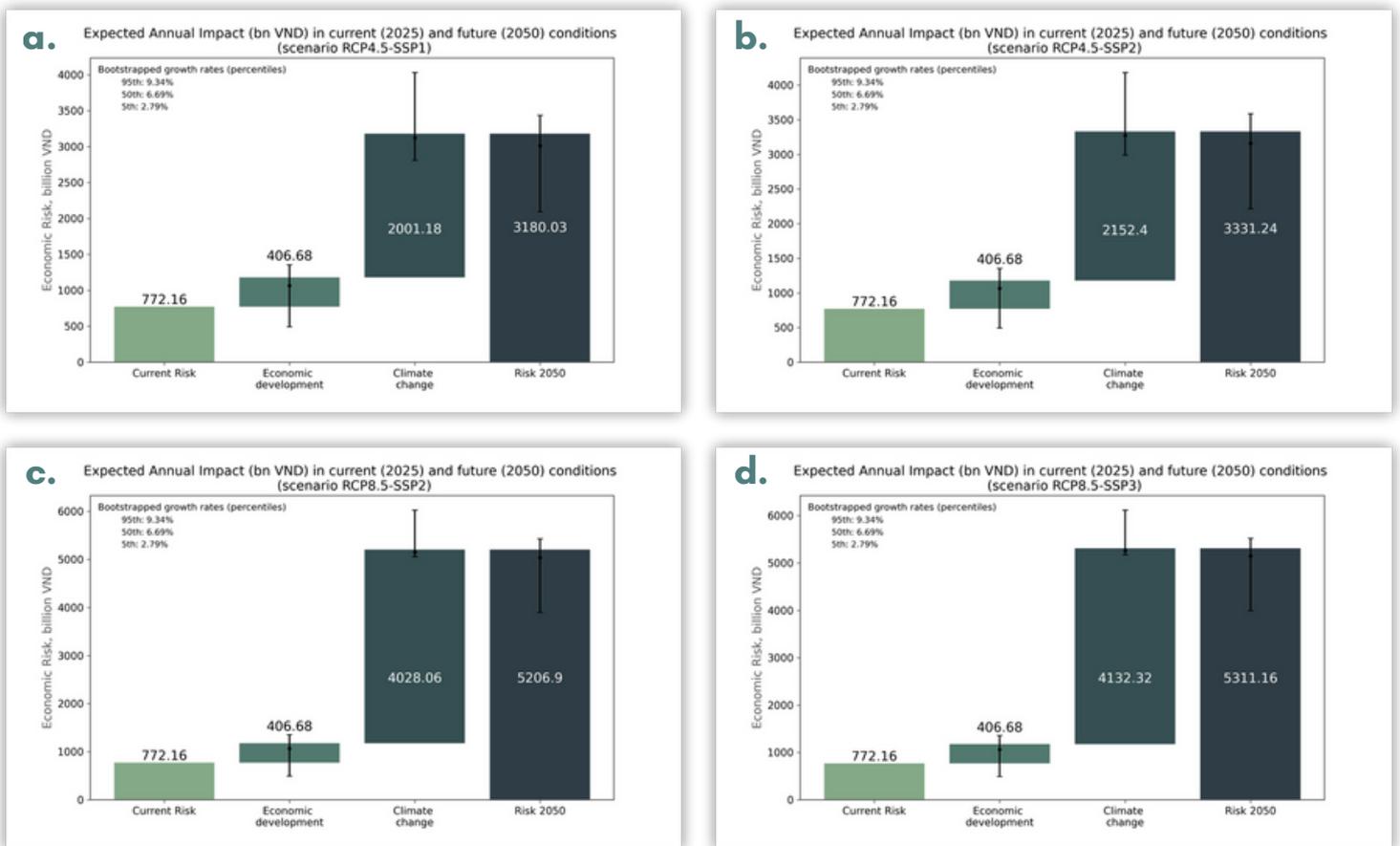
3.

KẾT QUẢ

3.1 TÁC ĐỘNG TRUNG BÌNH HÀNG NĂM (HIỆN TẠI VÀ TƯƠNG LAI)

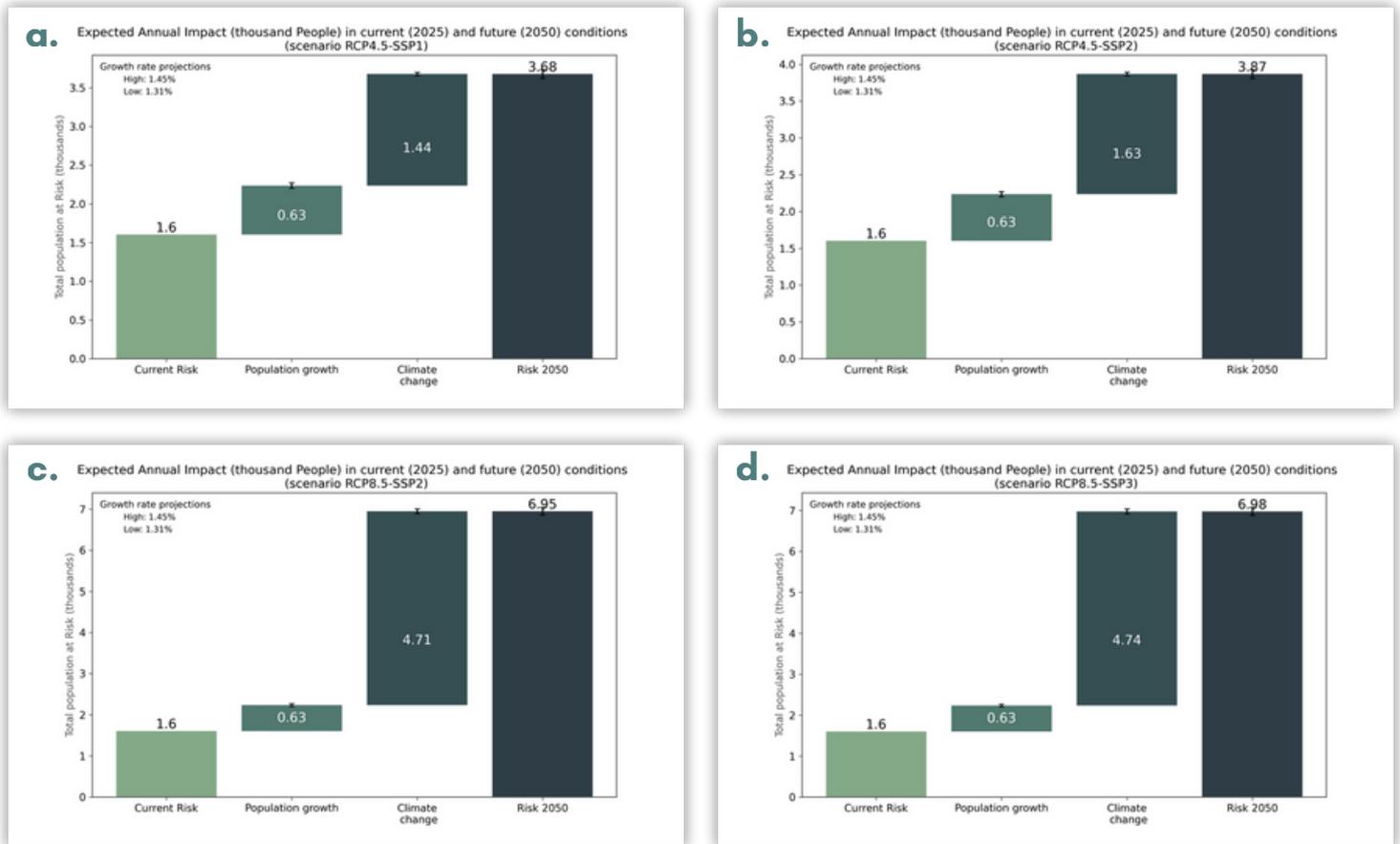
Phần này trình bày kết quả định lượng tổng thể về rủi ro lũ lụt tại thành phố Huế và lưu vực sông Hương, thể hiện tổng tác động trung bình hàng năm (Expected Annual Impact – EAI) đối với tất cả các nhóm tài sản được xem xét, dưới các kịch bản khí hậu hiện tại và tương lai. Các biểu đồ trong Hình 3 minh họa rủi ro hoặc tác động trung bình hàng năm hiện tại (được biểu diễn bằng màu xanh lam), đồng thời thể hiện mức tăng kỳ vọng do phát triển kinh tế và biến đổi khí hậu, cùng với tổng rủi ro trung bình hàng năm dự kiến vào năm 2050. Các thanh “râu” trên mỗi cột, ngoại trừ cột của năm hiện tại, biểu thị khoảng bất định 90% (phân vị thứ 5–95) được tính toán từ một tổ hợp mô phỏng lặp lại, trong đó các tập dữ liệu hiểm họa, phơi nhiễm và tính dễ tổn thương được lấy mẫu ngẫu nhiên nhiều lần nhằm xây dựng phân bố xác suất của các tác động hàng năm; phần râu thể hiện khoảng trung tâm 90% của phân bố này.

Theo kết quả mô phỏng, tác động trung bình hàng năm hiện tại ước tính khoảng 772,2 tỷ đồng (VND). Con số này được dự báo sẽ tăng lên khoảng 3.200 tỷ và 5.300 tỷ VND vào năm 2050, tương ứng với bốn kịch bản khí hậu – phát triển (Hình 3): a) RCP4.5–SSP1, b) RCP4.5–SSP2, c) RCP8.5–SSP2, và d) RCP8.5–SSP3. Những kết quả này cho thấy sự gia tăng rõ rệt của rủi ro do biến đổi khí hậu, đặc biệt khi so sánh giữa kịch bản phát thải trung bình (RCP4.5) và kịch bản phát thải cao (RCP8.5).



Hình 3. So sánh tổng giá trị tác động trung bình hàng năm (EAI) đến năm 2050 theo các kịch bản a) RCP4.5–SSP1, b) RCP4.5–SSP2, c) RCP8.5–SSP2, d) RCP8.5–SSP3

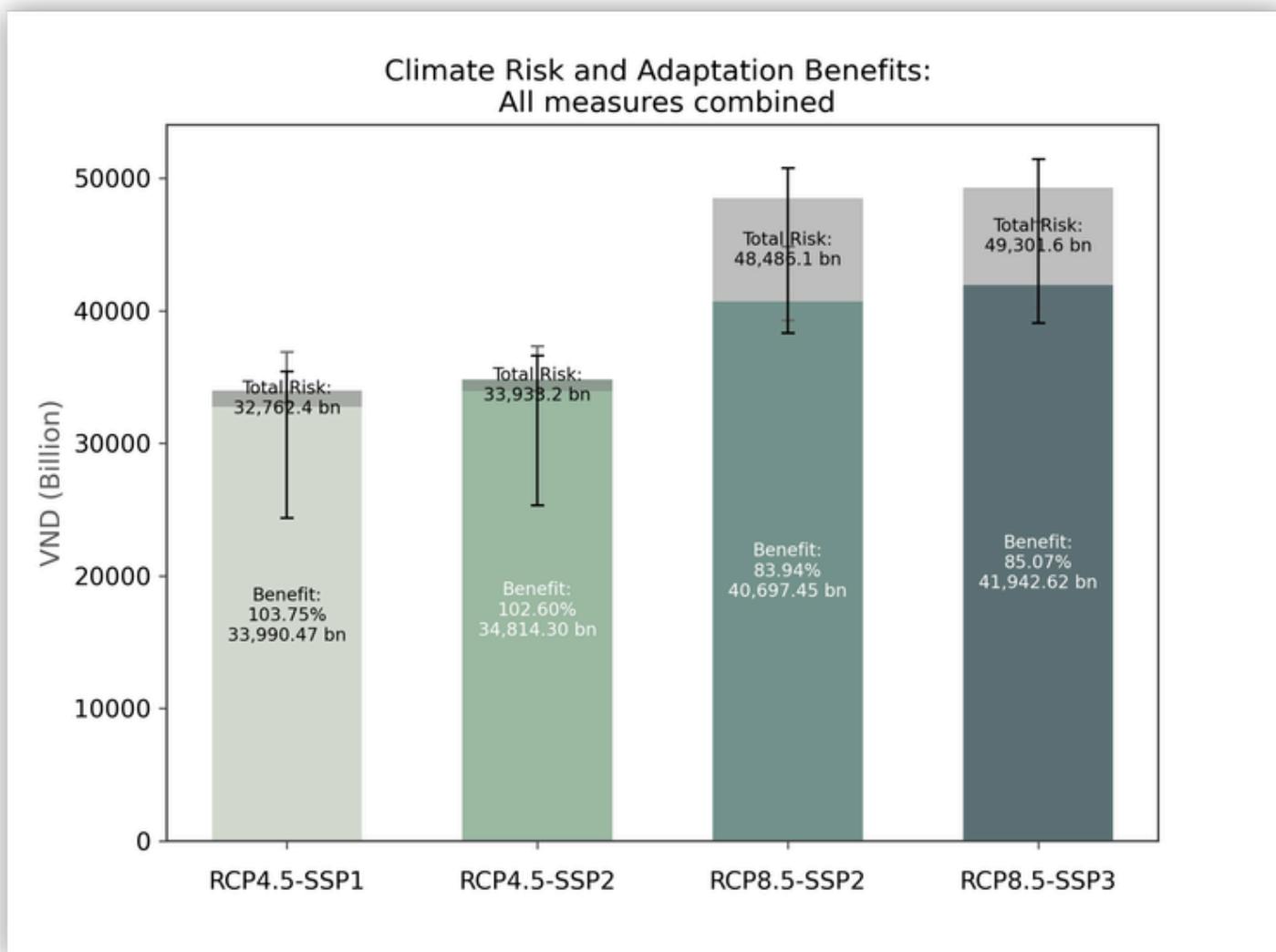
Đối với con người, phân tích được thực hiện dựa trên số lượng người bị ảnh hưởng thay vì định lượng bằng giá trị kinh tế. Hiện tại, tác động trung bình hàng năm ước tính khoảng 1.600 người bị ảnh hưởng, và con số này được dự báo tăng lên khoảng 3.700 – 6.900 người, tùy theo từng kịch bản RCP-SSP. Hình 4 minh họa các yếu tố đóng góp vào tổng tác động trung bình hàng năm năm 2050 đối với từng kịch bản: Màu xanh lam - dân số hiện đang có nguy cơ; Màu cam - phần tăng thêm do tăng trưởng dân số; Màu xanh lá - phần tăng thêm do biến đổi khí hậu; Màu đỏ - tổng hợp toàn bộ các thành phần.



Hình 4. So sánh tác động trung bình hàng năm đối với dân số năm 2050 theo các kịch bản a): RCP4.5-SSP1, b): RCP4.5-SSP2, c): RCP8.5-SSP2, d): RCP8.5-SSP3

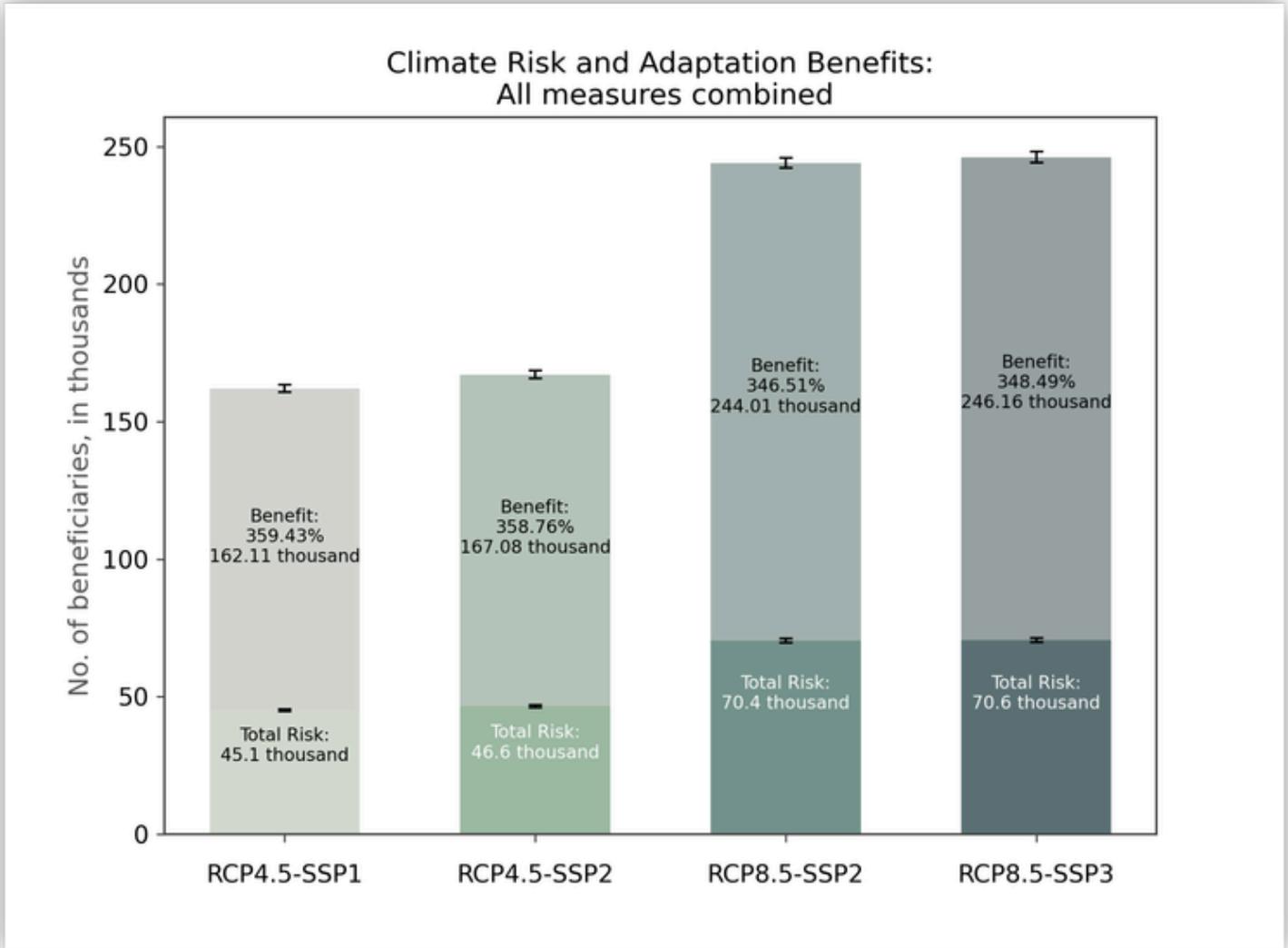
3.2 LỢI ÍCH KỲ VỌNG CỦA CÁC BIỆN PHÁP THÍCH ỨNG

Để đánh giá tiềm năng của các chiến lược thích ứng khác nhau, chín biện pháp thích ứng được lựa chọn đã được phân tích riêng biệt về khả năng giảm thiểu thiệt hại do lũ lụt đối với các nhóm tài sản và trong các kịch bản tương lai khác nhau. Tổng cộng, nếu tất cả chín biện pháp được triển khai đồng thời theo cấu hình mô hình xác định, với tổng nhu cầu đầu tư khoảng 404 tỷ VND, thì trong hai kịch bản biến đổi khí hậu mức độ trung bình (RCP4.5), tổng rủi ro kỳ vọng trong giai đoạn 2025–2050 về mặt lý thuyết có thể được bao phủ hoàn toàn – như thể hiện ở hai cột bên trái trong Hình 5. Các thanh râu biểu thị khoảng bất định (từ phân vị thứ 5 đến thứ 95). Ngược lại, trong hai kịch bản khí hậu cực đoan (RCP8.5) – hai cột bên phải – rủi ro không thể được bao phủ hoàn toàn bởi các biện pháp thích ứng đã đánh giá, dẫn đến một “khoảng trống bảo vệ” (protection gap) còn lại. Khoảng trống này có thể được giải quyết bằng nhiều cách tiếp cận khác nhau, chẳng hạn như mở rộng quy mô một số biện pháp khả thi hoặc áp dụng các công cụ quản lý rủi ro tài chính (xem chi tiết trong tiểu mục Khung phân tầng rủi ro – Risk Layering Framework bên dưới).



Hình 5. Tổng rủi ro giai đoạn 2025–2050 và tiềm năng giảm thiểu của các biện pháp thích ứng được đánh giá. Các thanh râu biểu thị khoảng bất định giữa phân vị thứ 5 và 95.

Đối với dân số, về mặt lý thuyết, các biện pháp được đánh giá trong mô hình hiệu chỉnh minh họa có thể bao phủ toàn bộ số người bị ảnh hưởng kỳ vọng trong giai đoạn 2025–2050, dao động từ 45.100 người (RCP4.5–SSP1) đến 70.637 người (RCP8.5–SSP3). Hình 6 cho thấy rằng, về mặt lý thuyết, tiềm năng giảm thiểu rủi ro của các biện pháp thích ứng được đánh giá vượt xa tổng số người bị ảnh hưởng dự kiến trong cùng giai đoạn.

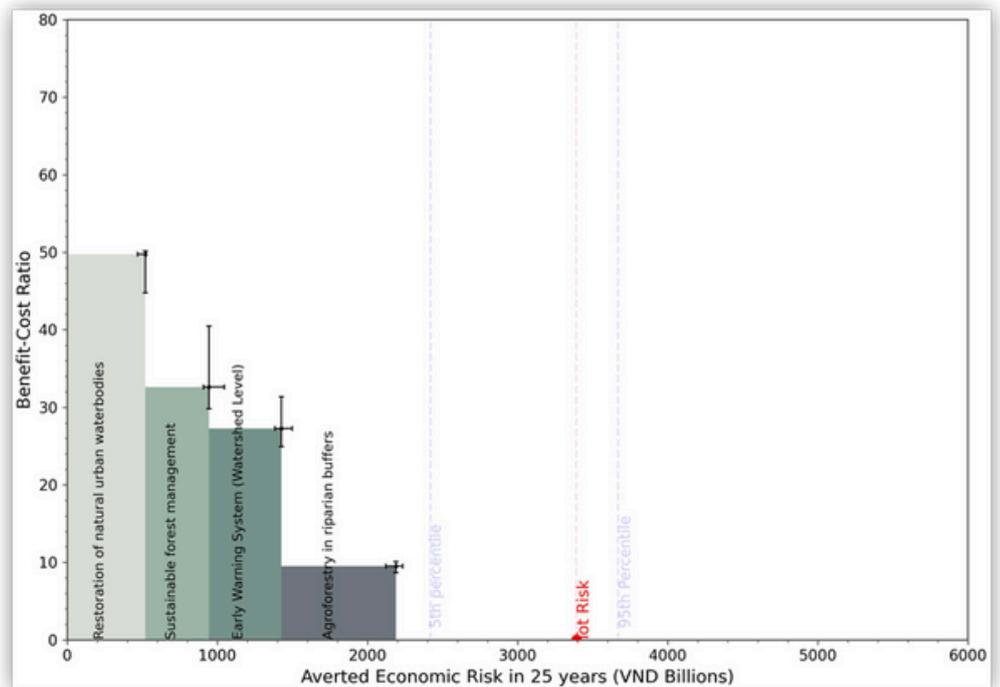


Hình 6. Tổng rủi ro giai đoạn 2025–2050 và tiềm năng giảm thiểu của các biện pháp thích ứng được đánh giá đối với dân số. Các thanh râu biểu thị khoảng bất định giữa phân vị thứ 5 và 95.

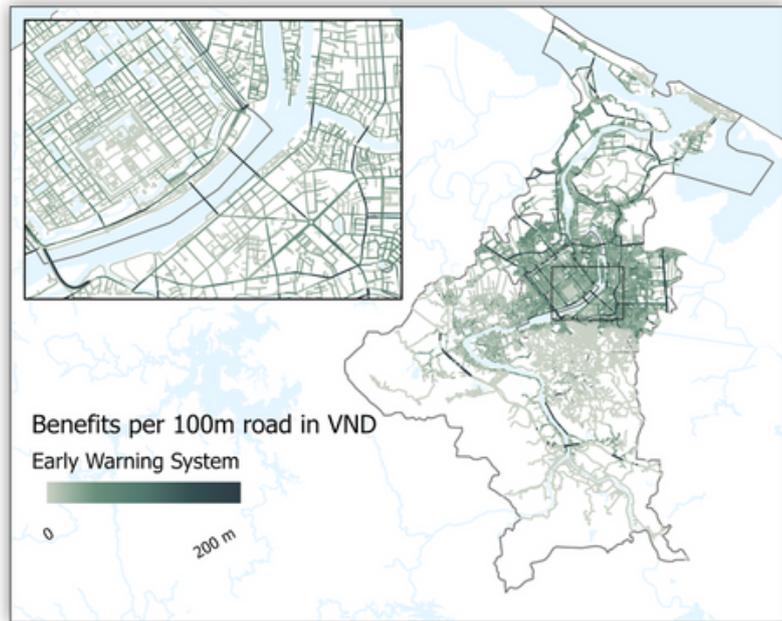
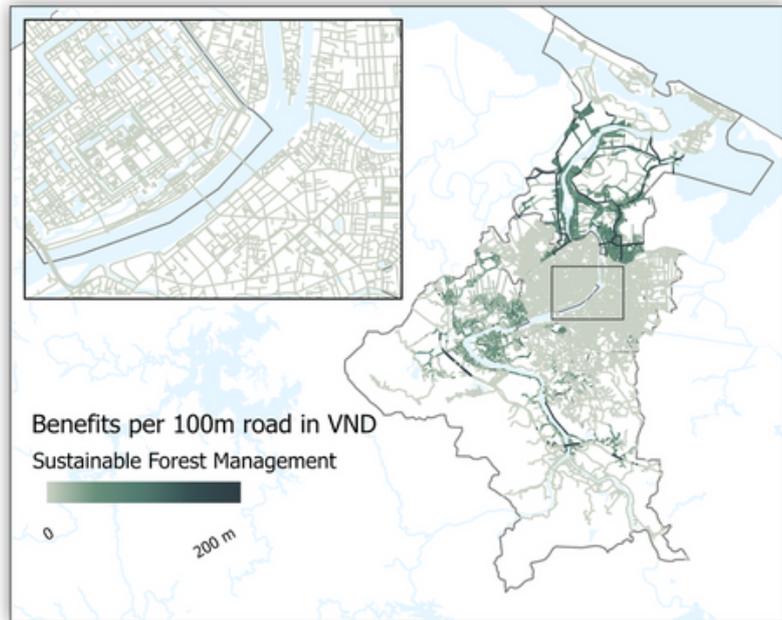
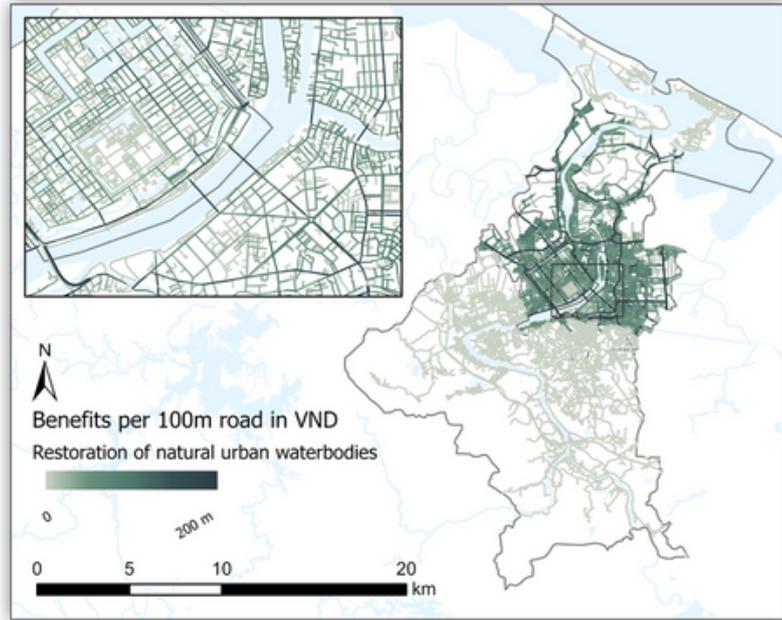
Mặc dù tổng hợp lợi ích tiềm năng của tất cả các biện pháp là rất đáng kể, mỗi biện pháp lại tác động khác nhau đến từng nhóm tài sản, do đó mức độ giảm thiểu thiệt hại cũng khác biệt giữa các nhóm tài sản. Để giới hạn phạm vi và độ phức tạp của báo cáo, chỉ ba biện pháp có hiệu quả cao nhất đối với mỗi nhóm tài sản trong kịch bản RCP4.5–SSP2 sẽ được trình bày minh họa tại đây. Tuy nhiên, kết quả chi tiết tương tự cho tất cả các nhóm tài sản, biện pháp và kịch bản khí hậu đều có sẵn trực tuyến trên nền tảng FRAME (Liên danh dự án DLR/EOC FloodAdaptVN) và có thể truy cập, sắp xếp hoặc kết hợp linh hoạt tùy mục đích sử dụng.

3.2.1 Đường giao thông

Hiệu quả của các biện pháp thích ứng được đánh giá được thể hiện trong Hình 7. Trong đó, biện pháp khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị (Restoration of Natural Urban Waterbodies) cho thấy tỷ lệ lợi ích – chi phí (BCR) cao nhất, đạt khoảng 50. Điều này có nghĩa là với mỗi 1 triệu VND đầu tư, có thể tránh được thiệt hại ước tính khoảng 50 triệu VND đối với hệ thống đường bộ. Chiều cao của các cột thể hiện BCR, trong khi chiều rộng của mỗi cột biểu thị tổng tiềm năng giảm thiểu rủi ro của từng biện pháp. Các thanh râu dọc và ngang biểu thị khoảng bất định giữa phân vị thứ 5 và 95 của tỷ lệ lợi ích – chi phí (chiều cao) và của tổng tác động tiềm năng (chiều rộng). Đường gạch đỏ biểu thị tổng rủi ro kỳ vọng tích lũy trong giai đoạn quan sát, trong khi hai đường gạch tím thể hiện khoảng bất định giữa phân vị thứ 5 và 95. Trong trường hợp biện pháp khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị, thiệt hại ước tính khoảng 520 tỷ VND đối với hệ thống đường bộ có thể được tránh thông qua việc đầu tư vào biện pháp này trong giai đoạn 2025–2050. Các biểu đồ trong Hình 8 thể hiện sự khác biệt về tác động của ba biện pháp thích ứng hiệu quả nhất và phân bố không gian của các biện pháp này trong khu vực nghiên cứu.



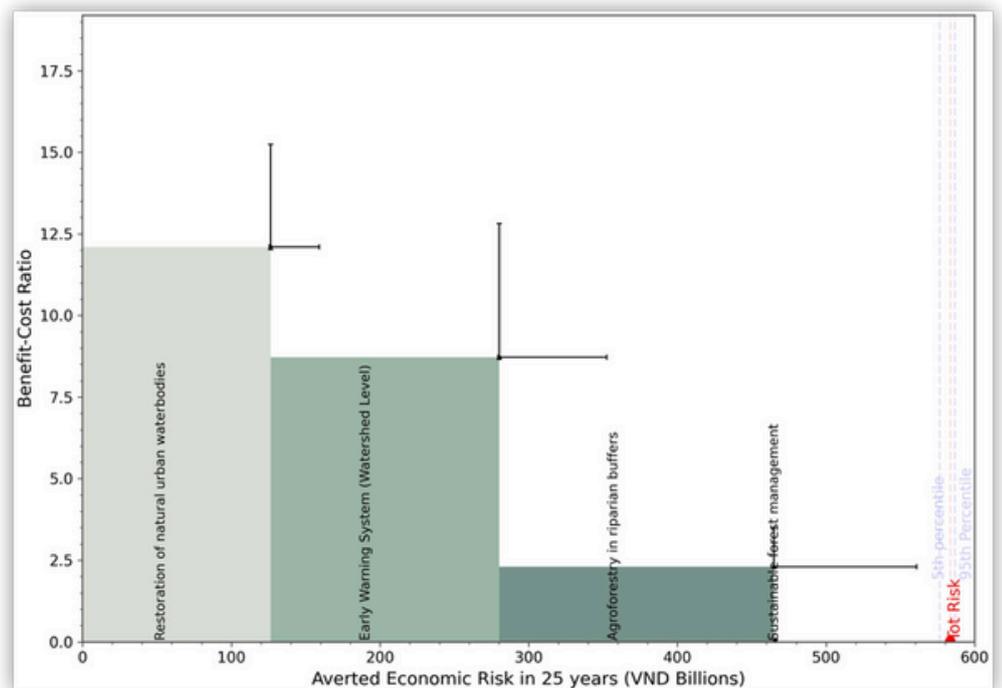
Hình 7. Phân tích lợi ích-chi phí cho các biện pháp thích ứng nhằm mục tiêu vào mạng lưới đường bộ trong RCP4.5-SSP2 Scenario



Hình 8. Lợi ích tính trên mỗi 100 m đường theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

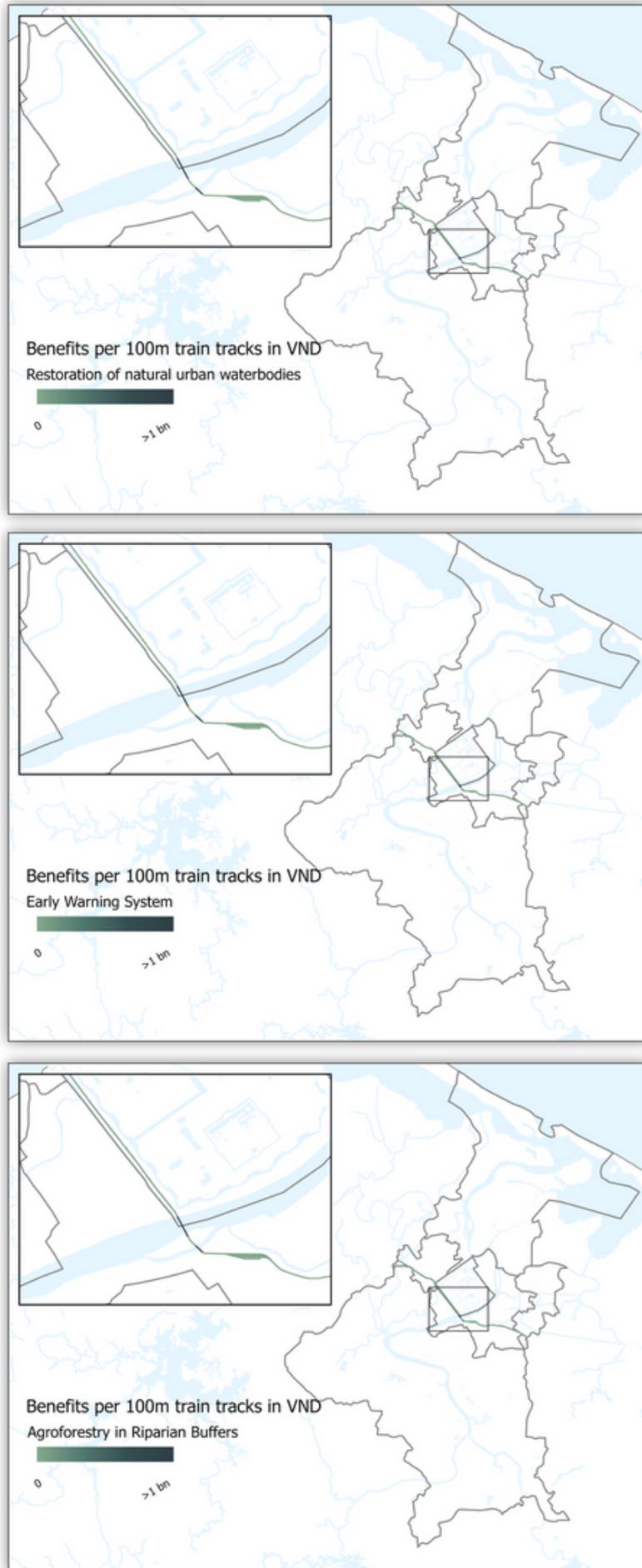
3.2.2 Hạ tầng đường sắt

Tác động đối với đường sắt được giảm thiểu tốt nhất thông qua đầu tư vào ba biện pháp chính: khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị, hệ thống cảnh báo sớm và nông lâm kết hợp ven sông. Cả ba biện pháp này đều cho thấy BCR > 1, chứng tỏ có hiệu quả kinh tế. Ngược lại, quản lý rừng bền vững không được đánh giá là khả thi về chi phí. Khi xét tổng hợp, tất cả các biện pháp cộng lại vẫn chưa đủ bao phủ toàn bộ rủi ro kỳ vọng, như thể hiện trong Hình 9. Các bản đồ trong Hình 10 trình bày phân bố không gian của ba biện pháp thích ứng hàng đầu, được tính theo lợi ích trên mỗi 100 m đường sắt trong vùng nghiên cứu.



Hình 9. Phân tích lợi ích – chi phí (BCR) của các biện pháp thích ứng đối với hạ tầng đường sắt trong kịch bản RCP4.5–SSP2

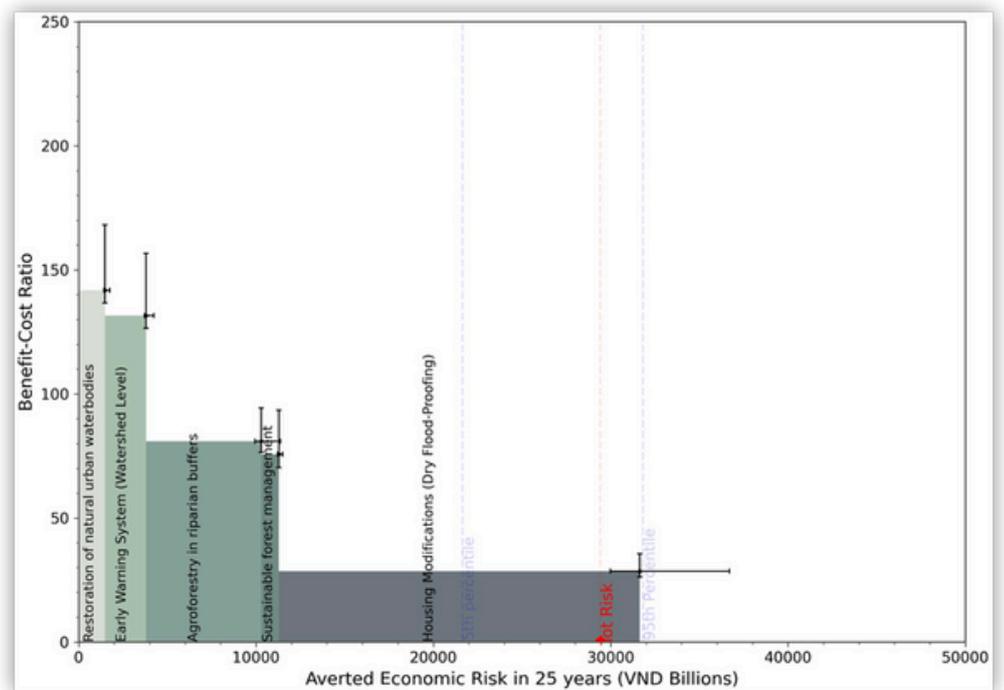
HẠ TẦNG ĐƯỜNG SẮT



Hình 10. Lợi ích tính trên mỗi 100 m đường sắt theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

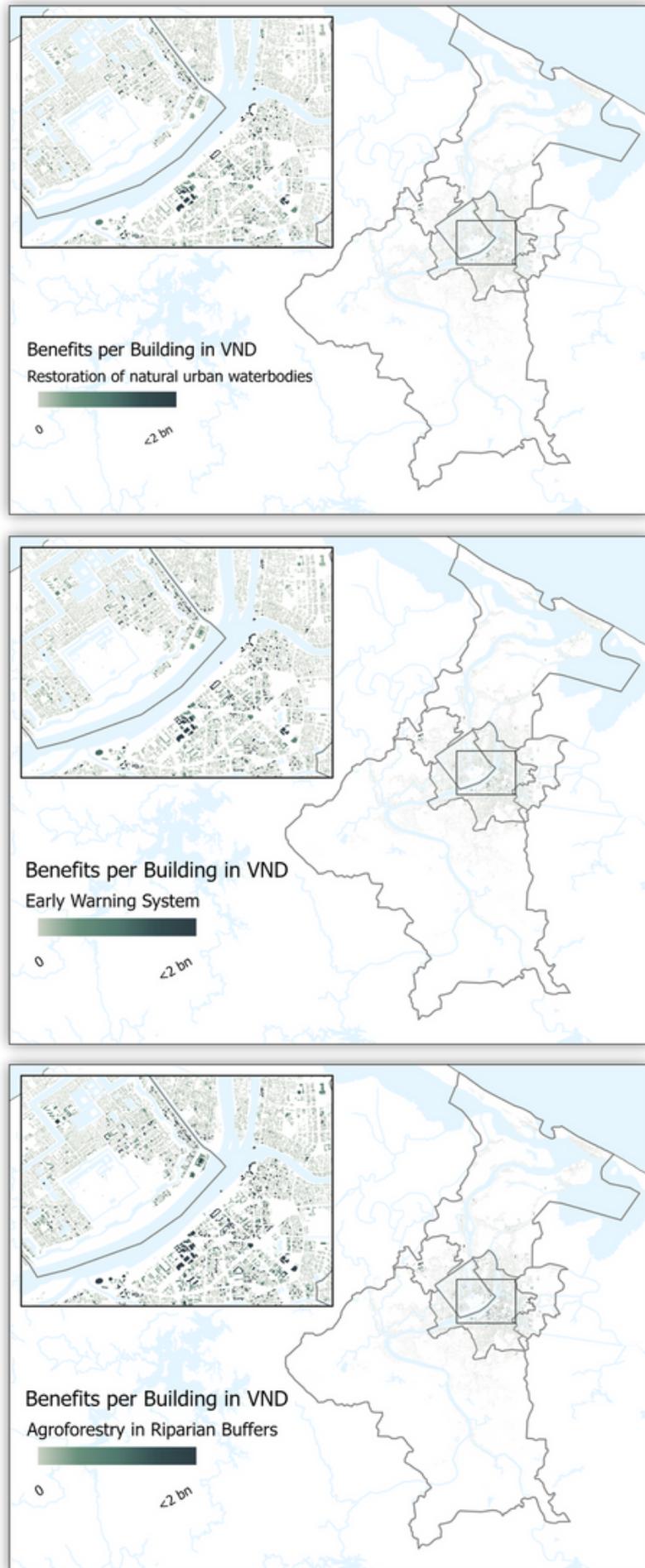
3.2.3 Công trình xây dựng

Trong nhóm công trình xây dựng, ba biện pháp đạt hiệu quả kinh tế cao nhất là khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị, hệ thống cảnh báo sớm và nông lâm kết hợp ven sông (Hình 11). Tuy nhiên, các biện pháp khác cũng đạt BCR > 1, đặc biệt là cải tạo nhà ở, biện pháp có tiềm năng giảm thiểu rủi ro lớn nhất. Điều này chủ yếu do phần lớn công trình trong khu vực là nhà ở dân cư, vốn hưởng lợi trực tiếp từ việc cải tạo chống ngập. Khi tổng hợp, toàn bộ các biện pháp kết hợp lại có khả năng bao phủ hoàn toàn tổng rủi ro dự kiến trong 25 năm, vì tổng tiềm năng giảm thiểu vượt ngưỡng rủi ro tổng thể (đường đỏ). Hình 12 minh họa phân bố không gian của hiệu quả giảm thiểu từ ba biện pháp có hiệu quả cao nhất.



Hình 12. Phân tích lợi ích-chi phí cho các biện pháp thích ứng hướng đến các tòa nhà trong kịch bản RCP4.5-SSP2

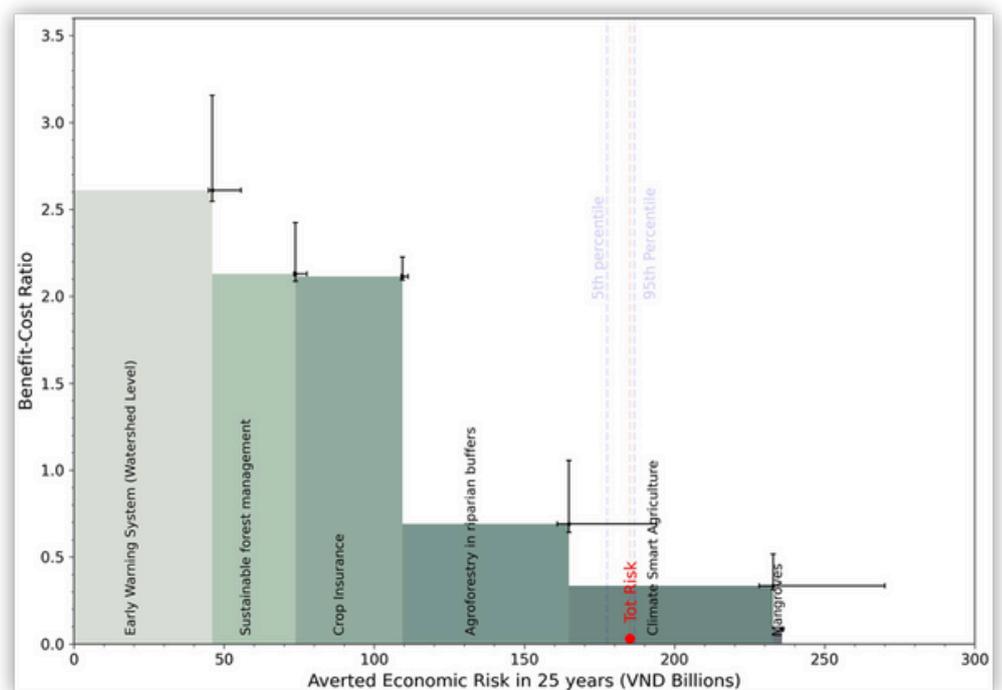
CÔNG TRÌNH XÂY DỰNG



Hình 12. Lợi ích tính trên mỗi công trình theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

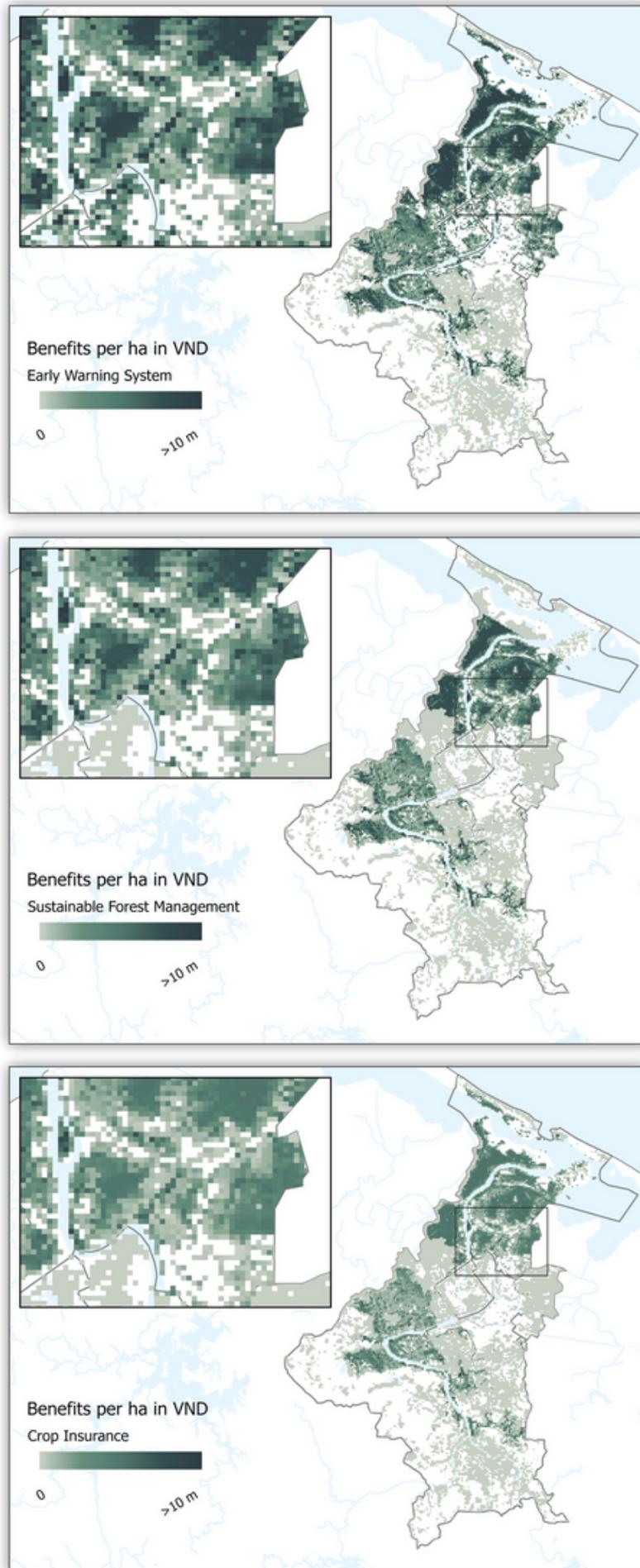
3.2.4 Nông nghiệp

Đối với các loại cây trồng, ba biện pháp thích ứng có hiệu quả nhất trong kịch bản RCP4.5–SSP2 là hệ thống cảnh báo sớm, quản lý rừng bền vững và bảo hiểm nông nghiệp (Hình 13). Các biện pháp khác cũng cho thấy tiềm năng giảm rủi ro đáng kể, song $BCR < 1$, tức là giá trị thiệt hại giảm được thấp hơn chi phí đầu tư, nên không khả thi về kinh tế. Hình 14 thể hiện sự khác biệt về phân bố tác động giữa ba biện pháp có hiệu quả cao nhất.



Hình 13. Phân tích lợi ích – chi phí của các biện pháp thích ứng đối với cây trồng nông nghiệp trong kịch bản RCP4.5–SSP2

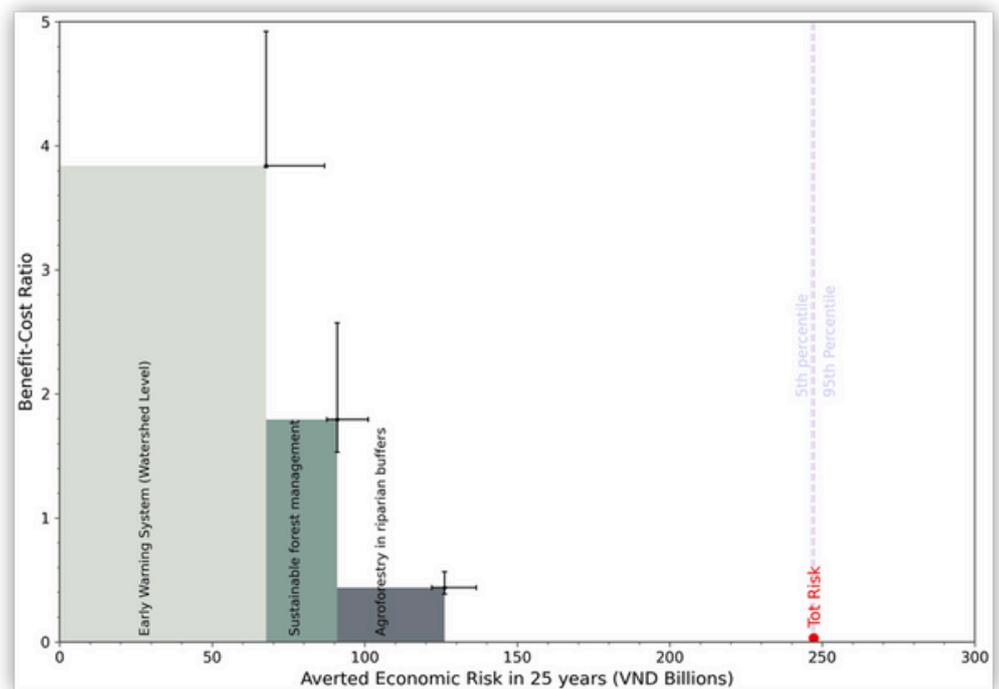
NÔNG NGHIỆP.



Hình 14. Lợi ích tính trên mỗi hecta đất nông nghiệp (VND/ha) theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

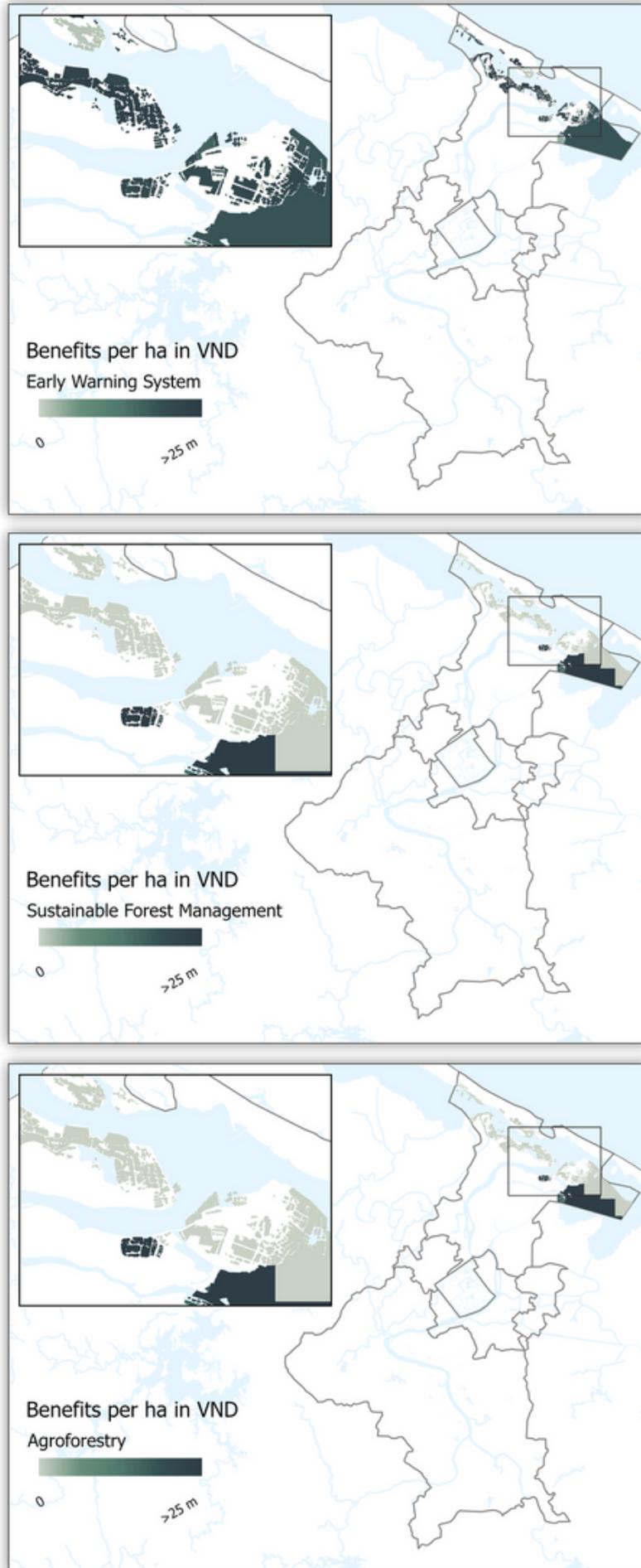
3.2.5 Nuôi trồng thủy sản

Đối với tài sản thuộc lĩnh vực nuôi trồng thủy sản, các biện pháp được đánh giá gồm hệ thống cảnh báo sớm, quản lý rừng bền vững và nông lâm kết hợp ven sông. Kết quả cho thấy hai biện pháp đầu có BCR > 1, trong khi nông lâm kết hợp ven sông không khả thi về mặt kinh tế (Hình 15). Các bản đồ trong Hình 16 minh họa phân bố không gian của lợi ích có thể đạt được từ từng biện pháp trong khu vực nghiên cứu.



Hình 15. Phân tích lợi ích – chi phí của các biện pháp thích ứng đối với nuôi trồng thủy sản trong kịch bản RCP4.5–SSP2

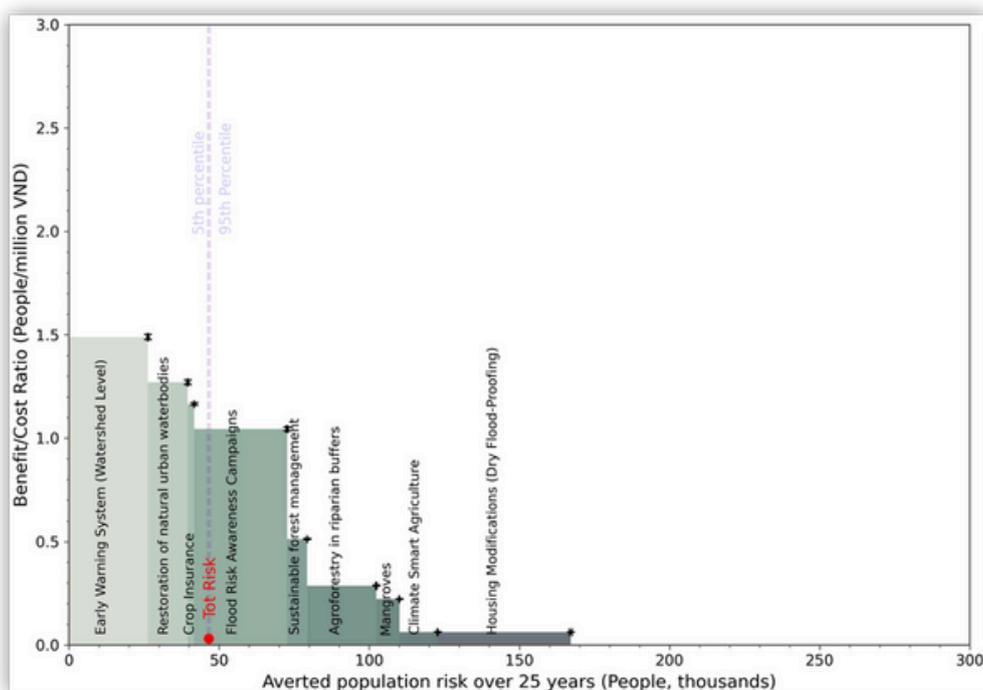
NUÔI TRỒNG THỦY SẢN



Hình 16. Lợi ích tính trên mỗi hecta diện tích nuôi trồng thủy sản (VND/ha) theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

3.2.6 Con người

Đối với nhóm người dân, ba biện pháp có hiệu quả nhất là hệ thống cảnh báo sớm, khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị và bảo hiểm nông nghiệp (Hình 17). Tuy nhiên, bảo hiểm nông nghiệp có khả năng tiếp cận dân số thấp hơn, trong khi chiến dịch nâng cao nhận thức rủi ro lũ lụt có thể tiếp cận được nhóm dân cư rộng hơn. Trong trường hợp này, BCR không được biểu thị bằng giá trị tiền tệ, mà được tính bằng số người được tiếp cận trên mỗi 1 triệu VND đầu tư; việc xác định tỷ lệ nào là chấp nhận được sẽ tùy thuộc vào quan điểm của nhà ra quyết định đầu tư. Vì tổng rủi ro kỳ vọng – tức tổng số dân dự kiến bị ảnh hưởng trong 25 năm (dấu đỏ) – nằm trong phạm vi bao phủ của các biện pháp thích ứng, nên về mặt lý thuyết, các biện pháp này đủ để giảm thiểu rủi ro đối với dân cư. Hình 18 thể hiện sự khác biệt trong phân bố lợi ích giữa ba biện pháp có hiệu quả cao nhất.



Hình 17. Phân tích lợi ích – chi phí của các biện pháp thích ứng đối với người dân trong kịch bản RCP4.5–SSP2



Hình 18. Lợi ích tính trên mỗi hộ gia đình theo ba biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất

3.3 HẠN CHẾ VÀ CÁC YẾU TỐ BẤT ĐỊNH

Mặc dù phân tích này cung cấp nhiều thông tin hữu ích về rủi ro ngập lụt và lợi ích của các chiến lược thích ứng, vẫn tồn tại một số yếu tố gây ra bất định và cần được xem xét khi diễn giải kết quả.

Giả định mô hình và điều kiện duy tu bảo trì

Phân tích giả định rằng tất cả các biện pháp thích ứng được lựa chọn đều được triển khai ngay lập tức và hoạt động trong điều kiện tối ưu, bao gồm duy trì tính năng ổn định và bảo dưỡng định kỳ cho đến năm 2050. Trong thực tế, việc chậm triển khai, phạm vi áp dụng hạn chế hoặc bảo trì không đầy đủ có thể làm giảm hiệu quả của các biện pháp. Ngoài ra, mô hình không tính đến sự xuống cấp dần theo thời gian, hiệu ứng học hỏi hoặc khả năng tăng hiệu suất trong tương lai.

Độ phân giải không gian và vị trí triển khai biện pháp thích ứng

CLIMADA vận hành ở cấp độ không gian tổng hợp và không mô phỏng vị trí địa lý chính xác của các biện pháp thích ứng. Thay vào đó, hiệu quả thích ứng được tham số hóa ở cấp lưu vực hoặc nhóm tài sản, mà không mô phỏng cấu hình cụ thể theo vị trí. Điều này tạo ra bất định, đặc biệt với các biện pháp mà hiệu quả phụ thuộc lớn vào đặc điểm thiết kế tại chỗ.

Bất định trong kịch bản và dự báo

Tất cả các kịch bản khí hậu và kinh tế – xã hội trong tương lai (các tổ hợp RCP–SSP) đều chứa đựng sự bất định về đường phát thải, động lực dân số, thay đổi sử dụng đất và định hướng quản trị. Bản thân quá trình mô phỏng khí hậu cũng là một nguồn sai số tiềm ẩn, có thể lan truyền sang mô hình ngập lụt. Những giả định này ảnh hưởng trực tiếp đến các đầu ra về hiểm họa, phơi nhiễm và rủi ro, phản ánh các điều kiện tương lai khả dĩ chứ không phải kết quả dự báo chính xác.

Sẵn có dữ liệu và thách thức trong hiệu chỉnh mô hình

Độ tin cậy của các ước tính rủi ro phụ thuộc vào chất lượng và tính đầy đủ của dữ liệu đầu vào, bao gồm giá trị phơi nhiễm, đường cong dễ tổn thương và bản đồ hiểm họa.

Đặc biệt, việc định giá kinh tế đối với tài sản hạ tầng – như đường giao thông – dựa vào các ước lượng chi phí và giá trị tham khảo trong tài liệu khi dữ liệu địa phương không sẵn có. Các hàm dễ tổn thương (hàm thiệt hại) được hiệu chỉnh dựa trên báo cáo thiệt hại địa phương và bổ sung bằng các hàm tổng quát, ví dụ từ JRC (Moel và các cộng sự, 2016) và nghiên cứu tại Cần Thơ (Behre và các cộng sự, 2021). Tuy nhiên, việc thiếu dữ liệu lịch sử và hồ sơ thiệt hại vẫn là một hạn chế, làm gia tăng bất định trong quá trình hiệu chỉnh.

Không bao gồm các đồng lợi ích và giá trị phi tiền tệ

Phân tích tập trung vào việc giảm thiểu thiệt hại trực tiếp do ngập lụt, được biểu thị bằng giá trị tiền tệ. Các đồng lợi ích khác của biện pháp thích ứng – như bảo tồn đa dạng sinh học, hấp thụ CO₂ hoặc tăng cường khả năng chống chịu xã hội – chưa được lượng hóa trong khung CLIMADA. Những khía cạnh này được thảo luận chi tiết hơn trong báo cáo bổ sung “Cơ hội nâng cao quản lý và thích ứng rủi ro lũ lụt tại Huế, miền Trung Việt Nam” (Ortiz Vargas và các cộng sự, 2025).

Giả định về phơi nhiễm và tính dễ tổn thương tĩnh

Phân tích giả định rằng điều kiện phơi nhiễm và tính dễ tổn thương không thay đổi theo thời gian, chưa xem xét đến các biến động trong phát triển đô thị, phân bố tài sản hoặc chất lượng công trình. Với tốc độ đô thị hóa và thay đổi kinh tế – xã hội dự kiến tại Huế, giả định này có thể dẫn đến việc đánh giá thấp cả rủi ro tương lai và lợi ích tiềm năng của các biện pháp thích ứng.

Tóm tắt

Những hạn chế trên cho thấy cần thận trọng khi diễn giải kết quả. Các ước tính rủi ro và lợi ích của biện pháp thích ứng được trình bày nên được hiểu mang tính chỉ báo và so sánh, hơn là dự báo định lượng chính xác. Việc cải thiện liên tục dữ liệu, xác thực tại địa phương, cùng với tích hợp các yếu tố phi kinh tế và đồng lợi ích được khuyến nghị cho các giai đoạn nghiên cứu tiếp theo.

4.

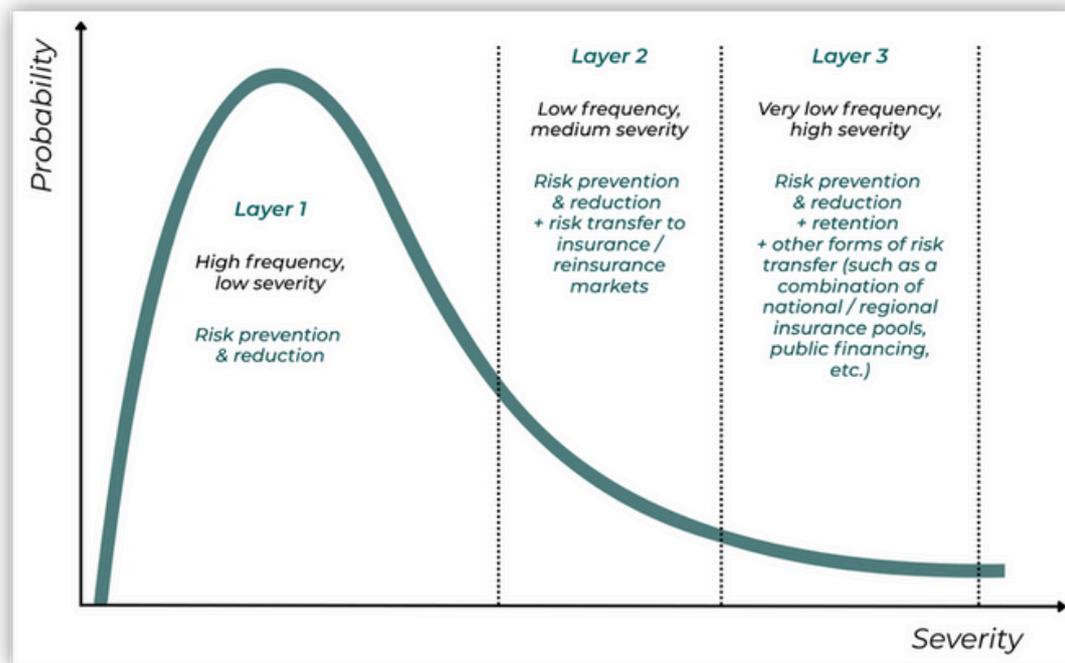
GIẢI QUYẾT KHOẢNG TRỐNG
THÍCH ỨNG THÔNG QUA PHÂN
TẦNG RỦI RO VÀ CƠ CHẾ TÀI
CHÍNH – BẢO HIỂM RỦI RO KHÍ
HẬU VÀ THIÊN TAI (CDRFI)

Mặc dù việc triển khai các biện pháp thích ứng chủ chốt – như hệ thống cảnh báo sớm, nông lâm kết hợp ven sông, hay nâng cao mặt đường – có thể làm giảm đáng kể thiệt hại do lũ lụt, vẫn tồn tại rủi ro còn lại (residual risk). Khoảng trống này, gọi là “khoảng trống thích ứng” (adaptation gap), bao gồm phần rủi ro không thể được giảm thiểu hoàn toàn thông qua các biện pháp thích ứng đã lựa chọn, do hạn chế kỹ thuật hoặc giới hạn chi phí.

Để quản lý hiệu quả phần rủi ro còn lại này, cần có một cách tiếp cận quản lý rủi ro toàn diện, kết hợp nhiều công cụ tài chính khác nhau được thiết kế phù hợp với tần suất và mức độ nghiêm trọng của các sự kiện lũ tiềm tàng – cách tiếp cận này được gọi là phân tầng rủi ro (risk layering).

4.1 KHUNG PHÂN TẦNG RỦI RO

Để quản lý hiệu quả khoảng trống thích ứng còn lại, các công cụ tài chính có thể được sử dụng tuân tự hoặc kết hợp, tương ứng với chu kỳ lặp lại và mức độ tác động của các sự kiện lũ khác nhau. Khung phân tầng rủi ro dưới đây giới thiệu ngắn gọn các cơ chế tài chính phù hợp nhất cho ba cấp độ tần suất và mức độ thiệt hại:



Hình 19: Risk Layering Framework

- Các sự kiện có tần suất cao, mức độ nhẹ: Đây là những đợt ngập xảy ra thường xuyên nhưng ít nghiêm trọng. Việc quản lý rủi ro thường thông qua các chiến lược giữ lại rủi ro (risk retention), chẳng hạn như thiết lập quỹ dự phòng, nguồn ngân sách dự trữ, hoặc hạn mức tín dụng dự phòng. Các công cụ này giúp cung cấp thanh khoản ngay lập tức để khắc phục thiệt hại nhỏ mà không cần phụ thuộc vào hỗ trợ bên ngoài.
- Các sự kiện có tần suất trung bình, mức độ trung bình: Những sự kiện loại này có thể được ứng phó thông qua các thỏa thuận tín dụng dự phòng hoặc quỹ dự trữ có thể huy động nhanh chóng, nhằm đảm bảo nguồn vốn kịp thời cho công tác ứng phó và phục hồi.
- Các sự kiện có tần suất thấp, mức độ nghiêm trọng cao: Đây là các thảm họa hiếm gặp nhưng gây hậu quả lớn, thường cần đến các cơ chế chuyển giao rủi ro (risk transfer). Các công cụ như bảo hiểm tham số (parametric insurance), trái phiếu thảm họa (catastrophe bonds) hoặc các quỹ rủi ro chủ quyền (sovereign risk pools) cho phép chuyển phần rủi ro tài chính lớn sang bên thứ ba, đảm bảo khả năng tiếp cận nhanh nguồn vốn phục vụ tái thiết và phục hồi.

Cách tiếp cận phân tầng này giúp mỗi loại rủi ro được quản lý bằng công cụ tài chính phù hợp và hiệu quả nhất, qua đó nâng cao khả năng chống chịu tổng thể của lưu vực sông Hương.

4.2 TÍCH HỢP CƠ CHẾ TÀI CHÍNH – BẢO HIỂM RỦI RO KHÍ HẬU VÀ THIÊN TAI (CDRFI)

Trong khi khung phân tầng rủi ro mô tả cách phân bổ công cụ tài chính phù hợp với từng cấp độ rủi ro, thì cơ chế tài chính và bảo hiểm rủi ro khí hậu và thiên tai (Climate and Disaster Risk Finance and Insurance – CDRFI) đi sâu hơn vào việc vận hành và thể chế hóa các công cụ này nhằm thu hẹp khoảng trống thích ứng.

Dựa trên Lộ trình bằng chứng chiến lược (Strategic Evidence Roadmap) của Roadmap InsuResilience Global Partnership and Munich Climate Insurance Initiative (2021) InsuResilience Global Partnership và (Denno Cissé 2021; United Nations University Institute for Environment and Human Security and Munich Climate Insurance Initiative n.d.) cùng với các tài liệu hướng dẫn của UNU-EHS/MCII, các yếu tố sau đây giúp bổ sung và mở rộng cách tiếp cận phân tầng rủi ro cơ bản:

- Cơ chế quản trị và thể chế: Thiết lập nhiệm vụ rõ ràng và cơ chế phối hợp giữa các cơ quan tài chính, quản lý thiên tai và tài nguyên nước. Việc lồng ghép CDRFI vào chu kỳ ngân sách cấp tỉnh và thành phố giúp đảm bảo duy trì ổn định quỹ dự phòng và chi trả phí bảo hiểm theo thời gian.
- Phát triển thị trường và tăng cường năng lực: Hỗ trợ phát triển thị trường bảo hiểm nội địa và các nhà cung cấp sản phẩm tham số, thông qua quan hệ đối tác công – tư, hỗ trợ kỹ thuật và khung pháp lý chuẩn hóa (ví dụ: quy định về chỉ số và quy trình chi trả tiêu chuẩn hóa).
- Trợ cấp và tài chính hỗn hợp: Để đảm bảo khả năng chi trả cho các hộ dễ bị tổn thương và doanh nghiệp nhỏ, có thể áp dụng trợ cấp phí bảo hiểm có mục tiêu hoặc các mô hình tài chính hỗn hợp, kết hợp giữa nguồn vốn viện trợ và vốn thương mại, nhằm giảm gánh nặng chi phí cho người thụ hưởng cuối cùng.
- Kết nối giữa giảm thiểu rủi ro và tài chính: Các tổ chức bảo hiểm và tài chính có thể ưu đãi phí bảo hiểm hoặc mở rộng phạm vi bảo hiểm cho khách hàng thực hiện các biện pháp giảm rủi ro được xác minh, như trồng cây ven sông, cải thiện hệ thống thoát nước, hay nâng cấp nhà ở chống ngập, qua đó tạo động lực đầu tư vào thích ứng.
- Dữ liệu, minh bạch và giám sát: Dữ liệu đáng tin cậy về hiểm họa, phơi nhiễm và thiệt hại là nền tảng để xây dựng các chỉ số tham số và định giá chính xác hơn. Các bảng điều khiển công khai theo dõi số dư quỹ, khoản chi trả và mức độ rủi ro giúp tăng cường tính minh bạch và niềm tin của công chúng.

Bằng cách tích hợp các yếu tố vận hành này vào cấu trúc phân tầng rủi ro, CDRFI không chỉ dừng ở việc cung cấp một danh mục công cụ tài chính, mà trở thành một kiến trúc tài chính tổng thể, bền vững, hỗ trợ phục hồi sau thiên tai đồng thời thúc đẩy giảm thiểu rủi ro chủ động và xây dựng khả năng chống chịu dài hạn.

Việc triển khai chiến lược CDRFI theo mô hình phân tầng rủi ro phù hợp với thực tiễn và khuôn khổ toàn cầu, bao gồm một tập hợp các công cụ tài chính được thiết kế để đảm bảo nguồn vốn kịp thời và đáng tin cậy sau các thảm họa liên quan đến khí hậu. Bằng cách tích hợp CDRFI vào chiến lược quản lý rủi ro tổng thể, các bên liên quan có thể đảm bảo nguồn lực tài chính sẵn sàng để giải quyết hiệu quả khoảng trống thích ứng.

5.

KẾT LUẬN

Báo cáo này cung cấp một phân tích định lượng toàn diện về rủi ro lũ lụt và các chiến lược thích ứng tại lưu vực sông Hương, với trọng tâm là thành phố Huế. Sử dụng khung mô hình CLIMADA, nhóm nghiên cứu đã đánh giá tác động tiềm năng của nhiều biện pháp thích ứng khác nhau dưới các kịch bản khí hậu và kinh tế – xã hội. Trọng tâm của phân tích là định lượng lợi ích kinh tế của các biện pháp này thông qua phân tích lợi ích – chi phí (Benefit–Cost Analysis).

Mặc dù phân tích lợi ích – chi phí mang lại những hiểu biết quan trọng về hiệu quả kinh tế của các lựa chọn thích ứng, cần nhận thức rằng các yếu tố khác như công bằng xã hội, tính bền vững môi trường và khả năng thể chế cũng đóng vai trò quan trọng trong quá trình ra quyết định. Những khía cạnh này được trình bày chi tiết hơn trong các báo cáo đi kèm, gồm: Báo cáo Rủi ro Lũ lụt (Sett và các cộng sự, 2025) và Cơ hội nâng cao quản lý và thích ứng rủi ro lũ lụt tại Huế, miền Trung Việt Nam: Giải quyết rủi ro lũ lụt hiện tại và tương lai (Ortiz Vargas và các cộng sự, 2025).

Dựa trên phân tích tổng hợp tất cả các nhóm tài sản và biện pháp thích ứng, ba biện pháp đạt hiệu quả cao nhất về khả năng giảm thiệt hại (tính theo giá trị VND), với tỷ lệ lợi ích – chi phí khác nhau tùy nhóm tài sản, bao gồm:

- **Cải tạo nhà ở:** Có thể tránh được khoảng 20.362 tỷ VND thiệt hại thông qua việc cải tạo nhà ở chống ngập khô trong giai đoạn 2025–2050.
- **Nông lâm kết hợp ven sông:** Có thể tránh được khoảng 1.268 tỷ VND thiệt hại bằng việc triển khai và duy trì mô hình nông lâm kết hợp tại vùng ven sông trong 25 năm tới.
- **Khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị:** Có thể tránh được khoảng 539 tỷ VND thiệt hại thông qua đầu tư khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị trong giai đoạn 2025–2050.

Xét theo **tỷ lệ lợi ích – chi phí (BCR), các biện pháp nổi bật nhất** trong nhóm ba biện pháp hàng đầu của từng nhóm tài sản bao gồm:

1. **Hệ thống cảnh báo sớm:** Trong tất cả các nhóm tài sản được phân tích, Hệ thống cảnh báo sớm luôn nằm trong top 3 biện pháp thích ứng có hiệu quả cao nhất.
2. **Khôi phục các thủy vực tự nhiên trong đô thị:** Trong năm trên bảy nhóm tài sản, biện pháp này được xếp hạng trong top 3 biện pháp thích ứng hiệu quả nhất.
3. **Nông lâm kết hợp ven sông:** Dù không đạt vị trí hàng đầu ở bất kỳ nhóm nào, nhưng biện pháp này xuất hiện trong top 3 của bốn trên bảy nhóm tài sản, cho thấy tính linh hoạt và hiệu quả tổng hợp cao.

Nhìn chung, các biện pháp thích ứng được đánh giá cho thấy tiềm năng lớn trong việc tránh được toàn bộ hoặc phần lớn thiệt hại dự kiến trong tương lai. Đặc biệt, trong hai kịch bản RCP4.5, lợi ích kỳ vọng từ các biện pháp nếu được triển khai đồng bộ vượt quá giá trị thiệt hại kinh tế dự kiến trong tương lai. Trong hai kịch bản có tín hiệu khí hậu cực đoan hơn (RCP8.5), các biện pháp vẫn có khả năng giảm hơn 80% tác động kỳ vọng ở cả hai trường hợp. Đối với người dân, các biện pháp thích ứng tương tự cũng được dự báo có thể bao phủ hoàn toàn rủi ro tương lai trong cả hai kịch bản, cho thấy hiệu quả cao và tính khả thi của danh mục biện pháp đề xuất trong việc thu hẹp khoảng trống thích ứng và tăng cường khả năng chống chịu của thành phố Huế và lưu vực sông Hương.

6.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Akiba, Takuya; Sano, Shotaro; Yanase, Toshihiko; Ohta, Takeru; Koyama, Masanori (2019): Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework. 3.4.0th ed.

Aznar-Siguan, Gabriela; Bresch, David N. (2019): CLIMADA – a global weather and climate risk assessment platform.

Behre, Eike; Waldschmidt, Florian; Daou, David; Rojas, Alvaro; Arce Mojica, Teresa; Koirala, Preeti et al. (2021): Executive Summary - Cần Thơ, Viet Nam Compound Flood Risk & Heat Waves.

Belton, Ben; Haque, Mohammad Mahfujul; Little, David C.; Le Sinh, Xuan (2011): Certifying catfish in Viet Nam and Bangladesh: Who will make the grade and will it matter? In *Food Policy* 36 (2), pp. 289–299. DOI: 10.1016/j.foodpol.2010.11.027.

Boonstra, Wiebren J.; Hanh, Tong Thi Hai (2015): Adaptation to climate change as social–ecological trap: a case study of fishing and aquaculture in the Tam Giang Lagoon, Viet Nam. In *Environ Dev Sustain* 17 (6), pp. 1527–1544. DOI: 10.1007/s10668-014-9612-z.

Breiman, Leo (2001): Random Forests. In *Machine Learning* 45 (1), pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

Bresch, David N.; Aznar-Siguan, Gabriela (2020): CLIMADA v1.4.1: Towards a globally consistent adaptation options appraisal tool.

Büche, Kerstin; Sett, Dominic; Assmann, André (2025): Flood hazard modeling approach and results for Hue, Central Viet Nam. Annex A to the UNU-EHS Research Report “Flood risks in Hue, Central Viet Nam: An assessment of flood hazard, exposures, vulnerabilities, root causes, and impacts.”. United Nations University Institute for Environment and Human Security.

Carioli, Alessandra; Schiavina, Marcello; Freire, Sergio; MacManus, Kytt (2023): GHS-POP R2023A - GHS population grid multitemporal (1975-2030).

Denno Cissé, Jennifer (2021): Climate and Disaster Risk Financing Instruments: An Overview. United Nations University Institute for Environment and Human Security; Munich Climate Insurance Initiative. Available online at https://www.climateinsurance.org/_files/ugd/898fda_5fda08de5557487690c0d3512eb91970.pdf, checked on 7/18/2025.

DLR/EOC FloodAdaptVN Consortium: FRAME. Flood Risk Information System for Adaptation Measures and Evaluation in Central Viet Nam. Available online at <https://framefavn.org>.

Economist Intelligence Unit (2024): Economist Intelligence Unit Country Risk Service Data for Viet Nam. Subscription database, The Economist Intelligence Unit, checked on March 2024.

FAO (2024): *Pangasianodon hypophthalmus*. Cultured Aquatic Species Information Programme. Text by Griffiths, D., Van Khanh, P., Trong, T.Q. In: Fisheries and Aquaculture. Available online at https://www.fao.org/fishery/en/culturedspecies/pangasius_hypophthalmus/en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024): SEPAL. An open-source cloud computing platform for spatial environmental analysis. Available online at <https://github.com/openforis/sepal>, checked on January 2024.

Geofabrik (2024): Download Server OpenStreetMap. Available online at <https://www.geofabrik.de/data/download.html>, checked on 7/10/2024.

German Aerospace Center (2020): TanDEM-X 90m Digital Elevation Model (DEM) – Global: German Aerospace Center (DLR). Available online at <https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/>, checked on 6/16/2024.

Government of Viet Nam (2022): Resolution No. 138/NQ-CP approving the national master planning for the period 2021–2030.

Government of Viet Nam (2023): Decision No. 1745/QĐ-TTĐ dated December 30, 2023 of The Prime Minister approving the planning of Thua Thien Hue Province for the period 2021 - 2030, with a Vision to 2050.

Hue Statistics Office (2022): Statistical Yearbook of Viet Nam: 2021. Available online at <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2022/08/statistical-yearbookof-2021/>.

InsuResilience Global Partnership; Munich Climate Insurance Initiative (2021): From Innovation to Learning: A Strategic Evidence Roadmap for Climate and Disaster Risk Finance and Insurance. With assistance of Expert Author Group. Edited by J. D. Cissé, S. Kreft, J. Toepper, D. Stadtmueller. InsuResilience Global Partnership; Munich Climate Insurance Initiative.

Japan Aerospace Exploration Agency (2021): Annual Land-Use and Land-Cover Maps across Mainland Viet Nam from 1990 to 2020 (Released in September 2021 / Version 21.09). Available online at https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/lulc/lulc_vnm_v2109_e.htm, checked on 6/18/2024.

Jarosz, Beth (2021): Poisson Distribution: A Model for Estimating Households by Household Size. In *Popul Res Policy Rev* 40 (2), pp. 149–162. DOI: 10.1007/s11113-020-09575-x.

Ministry of Construction (1/20/2021): Decision No. 65 QĐ-BXD dated 20.01.2021 on promulgating the investment capital rate and general construction price of structural parts in 2020 (65/QĐ-BXD).

Moel, H. d.; Huizinga, J.; Szewczyk, W. (2016): Global flood depth-damage functions – Methodology and the database with guidelines: Publications Office.

Nieskens, N.; Bachofer, F. (2021): Aquaculture of the Tam Giang-Cau Hai lagoon. Available online at https://floodadapt.eoc.dlr.de/results/05_Aquaculture/index.html.

Obaitor, Olabisi; et al. (Submitted): Sustainable Cities: Insights from Simulating Future Urban Growth Under Shared Socioeconomic Pathways and Ecosystem Adaptation in Thua Thien Hue, Viet Nam.

Ortiz Vargas, Andrea; Sett, Dominic; Hansohm, Jonas; Waldschmidt, Florian; Behre, Eike; Thanh Vu, Bien et al. (2025): Opportunities for improved flood risk management and adaptation in Hue, Central Viet Nam: Addressing current and future flood risks. United Nations University Institute for Environment and Human Security. Bonn, Germany.

Pedregosa, Fabian; Varoquaux, Gaël; Gramfort, Alexandre; Michel, Vincent; Thirion, Bertrand; Grisel, Olivier et al. (2011): Scikit-learn: Machine Learning in Python. In *J. Mach. Learn. Res.* 12 (null), pp. 2825–2830.

Sett, Dominic; Waldschmidt, Florian; Büche, Kerstin; Ortiz-Vargas, Andrea; Behre, Eike; Souvignet, Maxime et al. (2025): Flood risks in Hue, Central Viet Nam: An assessment of flood hazards, exposures, vulnerabilities, root causes and impacts.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2023): Hydrologic Modeling System. Version v.4.11. Available online at <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2024): River Analysis System. Version v.6.5. Available online at <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>.

United Nations University Institute for Environment and Human Security; Munich Climate Insurance Initiative (n.d.): Climate and Disaster Risk Financing and Insurance: 25 key terms you need to know. Factsheet. Available online at https://www.climateinsurance.org/_files/ugd/898fda_60f5a6cd3ea941be90d3fb8c15af3b79.pdf, checked on 7/18/2025.

