

Quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số: Áp dụng tại khu vực Hoa Lư, Ninh Bình

Cao Trường Sơn¹, Nguyễn Hữu Huế¹, Phạm Nguyễn Văn Phương², Trương Việt Hùng^{1,*}

¹ Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi

² Bộ môn Công nghệ và Quản lý Xây dựng, Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Thoát nước đô thị
Mô phỏng số
Ngập lụt
Hạ tầng xám
Hạ tầng xanh
SWMM
Biến đổi khí hậu
Quy hoạch đô thị

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số, nhằm giải quyết thách thức ngập lụt do đô thị hóa và biến đổi khí hậu tại Việt Nam. Áp dụng tại khu vực Hoa Lư, Ninh Bình, một đô thị điển hình với địa hình thấp và hệ thống thoát nước lạc hậu, khung bao gồm bốn bước: xây dựng mô hình mô phỏng hiện trạng, đánh giá ngập lụt theo hiện trạng và quy hoạch, đề xuất giải pháp hạ tầng xám/xanh, và cập nhật vận hành khung. Sử dụng phần mềm SWMM, mô hình đánh giá phương án quy hoạch 2050 hiện nay của địa phương vẫn hạn chế, đặc biệt khi xét đến biến đổi khí hậu. Giải pháp hạ tầng xám đề xuất (nâng cống Đình Tiên Hoàng lên 3x4 m, mở rộng Quốc lộ 1A thành 2 ống 1x1 m, xây vòng cống phía đông) giảm thời gian ngập dưới 30 phút tại 80 % vị trí, vượt trội quy hoạch hiện tại. Kết hợp hạ tầng xanh (bề mặt thấm nước 5-20 % diện tích không thấm ≥ 75 %) giảm dòng chảy bề mặt 17 %, hồ ga ngập từ 53 xuống 27, cống quá tải từ 77 xuống 60, hiệu quả hơn 20-30 % so quy hoạch phê duyệt, với chi phí ước tính 81,87-327,48 tỷ đồng. Nghiên cứu góp phần lấp khoảng trống khoa học trong quản lý thoát nước đô thị, cung cấp công cụ hỗ trợ quyết định cho nhà quản lý nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của ngập lụt đô thị tại Việt Nam.

KEYWORDS

Urban drainage
Numerical simulation
Flooding
Gray infrastructure
Green infrastructure
SWMM
Climate change
Urban planning

ABSTRACT

The paper proposes a framework for urban drainage planning management using numerical simulation to address flooding challenges due to urbanization and climate change in Vietnam. Applied in the Hoa Lu area, Ninh Binh—a typical urban area with low terrain and outdated drainage systems—the framework includes four steps: building a current status simulation model, evaluating flooding under current conditions and planning, proposing gray/green infrastructure solutions, and updating the framework's operation. Using SWMM software, the model assesses that the local 2050 planning scheme is still limited, especially when considering climate change. The proposed gray infrastructure solutions (upgrading Dinh Tien Hoang culvert to 3x4 m, expanding National Highway 1A to 2 pipes of 1x1 m, constructing an eastern ring culvert) reduce flooding time to under 30 minutes at 80% of locations, outperforming the current plan. Combining green infrastructure (permeable surfaces of 5-20% on impervious areas ≥ 75 %) reduces surface runoff by 17%, overflowing manholes from 53 to 27, overloaded sewers from 77 to 60, which is 20-30% more effective than the approved plan, with estimated costs of 81.87-327.48 billion VND. The study contributes to filling the scientific gap in urban drainage management, providing decision-support tools for managers to mitigate the impacts of urban flooding in Vietnam.

1. Giới thiệu chung

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và biến đổi khí hậu ngày càng nghiêm trọng, vấn đề ngập lụt đô thị đã trở thành một thách thức lớn đối với nhiều quốc gia, đặc biệt là các nước đang phát triển như Việt Nam. Theo nghiên cứu về rủi ro lũ lụt, biến đổi khí hậu và nghèo đói tại Việt Nam, hơn 70% dân số đang đối mặt với rủi ro từ thiên tai, trong đó ngập lụt chiếm tỷ lệ lớn nhất do địa hình sông ngòi chằng chịt và bờ biển dài hơn 3,000 km [1]. Sự gia tăng cường độ mưa cực đoan, mực nước biển dâng và mật độ dân cư đô thị đã làm

trầm trọng hóa tình trạng này, dẫn đến thiệt hại kinh tế hàng tỷ đô la mỗi năm. Chẳng hạn, nghiên cứu mô hình hóa thiệt hại lũ lụt cho các doanh nghiệp nhỏ tại TP. Hồ Chí Minh cho thấy thiệt hại có thể tăng cao do đô thị hóa [2]. Chỉ trong năm 2024, bão Yagi đã gây thiệt hại nghiêm trọng tại các tỉnh miền Bắc và miền Trung Việt Nam, với hơn 300 người thiệt mạng và hàng nghìn hecta đất nông nghiệp bị ngập úng [3]. Những sự kiện này không chỉ ảnh hưởng đến an ninh lương thực mà còn làm gián đoạn hoạt động kinh tế - xã hội, đặc biệt ở các khu vực đô thị như Hà Nội, TP. Hồ Chí Minh và Ninh Bình.

*Liên hệ tác giả: truongviethung@tlu.edu.vn

Nhận ngày 11/09/2025, sửa xong ngày 12/10/2025, chấp nhận đăng ngày 13/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1150>

Sự cần thiết của nghiên cứu về quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số xuất phát từ việc hệ thống thoát nước truyền thống đang trở nên lỗi thời trước các "cú sốc" từ biến đổi khí hậu. Kế hoạch thực hiện Nghị quyết 06-NQ/TW của Bộ Chính trị về quy hoạch đô thị bền vững đến năm 2045 nhấn mạnh nhu cầu tích hợp các giải pháp hiện đại [4]. Tại Hà Nội, số lượng điểm ngập úng tăng từ 50 lên hơn 100 trong giai đoạn 2012-2022, chủ yếu do hệ thống thoát nước cũ kỹ và thiếu quy hoạch tích hợp [5]. Do đó, việc áp dụng mô phỏng số để dự báo và tối ưu hóa hệ thống thoát nước không chỉ giúp giảm thiểu rủi ro mà còn hỗ trợ phát triển bền vững, phù hợp với Quy chuẩn QCVN 07-2:2016/BXD về công trình thoát nước [6]. Biến đổi khí hậu làm thay đổi mô hình mưa, với lượng mưa cực đoan tăng 20 đến 30 % ở miền Nam, khiến hệ thống cũ không còn hiệu quả [7]. Báo cáo đặc biệt của IPCC về ấm lên toàn cầu 1,5°C dự báo mưa lũ tăng 10-20 % ở khu vực Đông Nam Á [8]. Ở Việt Nam, tỷ lệ đô thị hóa đạt hơn 40 % vào năm 2025, với các thành phố lớn chứng kiến diện tích đất không thấm tăng gấp đôi trong thập kỷ qua, dẫn đến ngập lụt kéo dài.

Hệ thống thoát nước đô thị bao gồm các loại hình như thoát nước riêng và thoát nước chung, nhưng ở Việt Nam, hầu hết các thành phố vẫn sử dụng hệ thống thoát nước chung, dẫn đến ô nhiễm nguồn nước khi ngập lụt [9]. Các giải pháp bền vững cho thoát nước mưa đô thị, như sử dụng hạ tầng xanh, đã được đề xuất để giảm ngập và cải thiện môi trường [10]. Nghiên cứu đánh giá khả năng áp dụng giải pháp thoát nước bền vững tại huyện Bình Chánh, TP. Hồ Chí Minh, cho thấy tiềm năng giảm dòng chảy đỉnh [11]. Hạ tầng xanh, như mái xanh và hồ điều hòa, tăng khả năng thấm và lưu trữ nước mưa, kết hợp với hạ tầng xám truyền thống [12]. Giải pháp thành phố bọt biển (sponge city) trong thoát nước mặt đô thị Việt Nam hướng đến phát triển bền vững, nhưng vẫn đối mặt với thách thức [13].

Mô phỏng số đóng vai trò quan trọng trong quản lý thoát nước đô thị, với các phần mềm như SWMM và MIKE được sử dụng rộng rãi. SWMM, phát triển bởi EPA, cho phép mô phỏng dòng chảy bề mặt, ống ngầm và chất lượng nước [14]. Ví dụ, khung mô phỏng lũ BK-SWMM dựa trên dữ liệu đám đông cho mô hình hóa lũ đô thị [15]. Nghiên cứu kiểm soát dòng chảy LID tại cộng đồng dày đặc Hong Kong sử dụng SWMM đáng tin cậy [16]. Công cụ Rhodium-SWMM cho vị trí hạ tầng xanh dưới bất định sâu [17]. Sử dụng SWMM cho lập kế hoạch ứng phó khẩn cấp với các kịch bản mưa và bề mặt đô thị [18]. Tại Việt Nam, ứng dụng SWMM mô phỏng ngập do mực nước triều tăng tại kênh Tân Hóa - Lò Gốm, TP. Hồ Chí Minh, cho thấy giảm 30 % khả năng thoát nước [19]. Ảnh hưởng của đặc trưng mưa thiết kế tới hiệu quả kiểm soát dòng chảy của công trình thoát nước bền vững [20]. Tương tự, MIKE hỗ trợ mô hình hóa 1D/2D, phù hợp cho khu vực ven biển như Hải Phòng [21]. So sánh hai phần mềm, SWMM miễn phí và dễ tích hợp GIS, trong khi MIKE mạnh về mô phỏng thủy động lực phức tạp [22]. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu hiện nay chỉ dừng ở mô phỏng hiện trạng, thiếu tích hợp vào quy hoạch hạ tầng xám và kết hợp xanh cho các khu vực đô thị mới như Hoa Lư, Ninh Bình, nơi đô thị hóa nhanh chóng nhưng hệ thống thoát nước lạc hậu [23].

Khoảng trống khoa học nằm ở việc thiếu khung quản lý toàn diện kết hợp mô phỏng số để điều chỉnh hạ tầng xám và xám-xanh, đặc biệt cho các khu vực đô thị mới. Nghiên cứu này đề xuất xây dựng khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số để đánh giá và đề xuất giải pháp hạ tầng xám - xanh. Áp dụng tại khu vực Hoa Lư, Ninh Bình, nghiên cứu sử dụng SWMM để mô phỏng ngập lụt hiện trạng và tương lai dưới kịch bản RCP 8.5, nhằm tìm giải pháp điều chỉnh hiệu quả [24]. Mục tiêu là giảm ngập lụt hiệu quả, đồng thời đảm bảo bền vững kinh tế - môi trường, góp phần vào chiến lược quốc gia về thích ứng biến đổi khí hậu [25]. Sự cần thiết của nghiên cứu nằm ở việc cung cấp công cụ hỗ trợ quyết định cho các nhà quản lý, giúp Việt Nam đạt mục tiêu phát triển đô thị bền vững đến năm 2030 theo Nghị quyết 06-NQ/TW.

2. Xây dựng khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số

2.1. Nguyên lý chung xây dựng khung quản lý

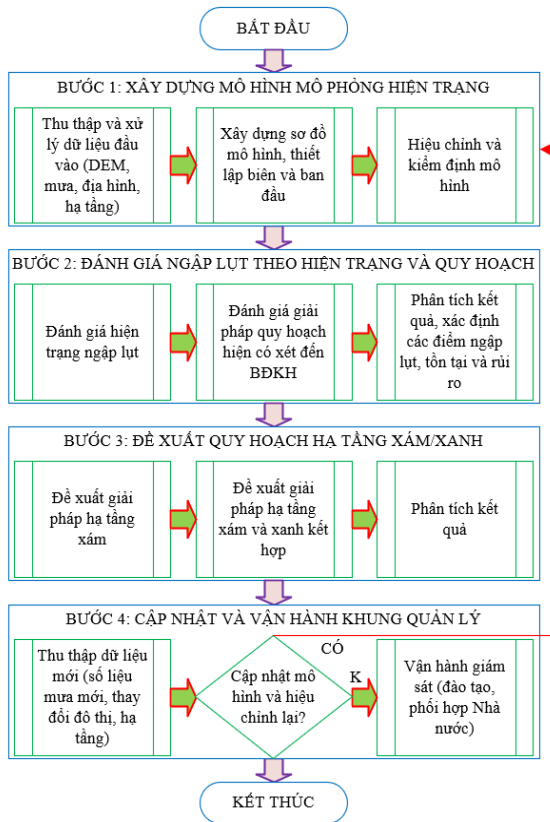
Khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số được đề xuất nhằm xây dựng một cách tiếp cận khoa học, có hệ thống, thích ứng linh hoạt với các khu vực đô thị đa dạng tại Việt Nam, đặc biệt là các đô thị vừa và nhỏ đang đối mặt với thách thức ngập lụt do đô thị hóa nhanh chóng và biến đổi khí hậu. Cách tiếp cận này tập trung vào việc sử dụng các công cụ mô phỏng thủy lực để đánh giá hiện trạng hệ thống thoát nước, dự báo rủi ro ngập lụt dưới các kịch bản mưa lũ khác nhau, và đề xuất các giải pháp hạ tầng xám (như cống rãnh, kênh dẫn) cũng như hạ tầng xanh (như hồ điều hòa, bề mặt thấm nước) dựa trên phân tích thủ công và kinh nghiệm chuyên gia.

Nguyên tắc xây dựng khung quản lý quy hoạch dựa trên nền tảng lý thuyết mô phỏng thủy lực, sử dụng các mô hình như SWMM hoặc MIKE để mô tả dòng chảy bề mặt và ngầm dựa trên các phương trình cơ bản như Saint-Venant. Dữ liệu đầu vào bao gồm địa hình số (DEM), lượng mưa lịch sử và dự báo (từ kịch bản RCP 8.5), sử dụng đất (tỷ lệ không thấm nước), và cấu trúc hạ tầng (mạng cống, kênh tiêu). Khung duy trì tính bị động, với việc điều chỉnh tham số mô hình và đề xuất giải pháp phụ thuộc vào phân tích thủ công, có thể tăng thời gian xử lý nhưng đảm bảo tính khả thi thực tiễn, phù hợp với tiêu chuẩn quốc gia như TCVN 7957:2023 về thoát nước đô thị. Mục tiêu cốt lõi là hỗ trợ giảm thiểu rủi ro ngập lụt, nhấn mạnh tính thích ứng với biến đổi khí hậu như tăng cường độ mưa cực đoan và gia tăng diện tích không thấm nước.

2.2. Sơ đồ khối khung quản lý

Sơ đồ khối khung quản lý quy hoạch đề xuất được thiết kế có hệ thống, bao gồm bốn khối chính đại diện cho dòng chảy logic: xây dựng mô hình mô phỏng hiện trạng, đánh giá rủi ro ngập lụt dựa trên hiện trạng và quy hoạch xét biến đổi khí hậu, đề xuất giải pháp quy hoạch hạ tầng xám kết hợp xanh, và cập nhật vận hành khung để đảm bảo tính thích ứng lâu dài. Thiết kế này có vòng lặp phản hồi từ khối cuối về khối đầu, cho phép cập nhật dữ liệu mới và hiệu chỉnh mô hình định

kỳ, nâng cao độ tin cậy trong bối cảnh bất định khí hậu (kịch bản RCP 8,5 đến năm 2050). Sơ đồ khối được minh họa tại Hình 1, với các mô-đun liên kết bằng mũi tên chỉ hướng dòng chảy thông tin, hỗ trợ tích hợp giữa mô phỏng thủy lực và phân tích thủ công.



Hình 1. Sơ đồ khối khung quản lý quy hoạch hệ thống thoát nước đô thị.

Trong sơ đồ khối, quy trình bao gồm 4 bước lớn: (1) xây dựng mô hình mô phỏng hiện trạng, (2) đánh giá ngập lụt theo hiện trạng và quy hoạch, (3) đề xuất quy hoạch hạ tầng xám/xanh, (4) cập nhật và vận hành khung quản lý. Bước 1 tập trung thu thập xử lý dữ liệu để tạo mô hình toán học đại diện hệ thống hiện tại. Nội dung chính: (i) Thu thập dữ liệu đầu vào như địa hình, lượng mưa, sử dụng đất; (ii) Xây dựng sơ đồ mô hình sử dụng SWMM cho dòng chảy 1D hoặc MIKE cho 2D; (iii) Thiết lập điều kiện biên và ban đầu như biên lượng mưa lịch sử. Mục tiêu cung cấp mô hình đáng tin cậy, nhưng hạn chế phụ thuộc chất lượng dữ liệu.

Bước 2 đánh giá hiện trạng và giải pháp quy hoạch hiện có xét biến đổi khí hậu, kiểm tra dự báo rủi ro ngập lụt. Nội dung: (i) Đánh giá ngập lụt hiện trạng bằng cách chạy mô hình với mưa thực tế để tính diện tích thời gian ngập; (ii) Dự báo rủi ro theo kịch bản quy hoạch đô thị và BĐKH (RCP 8.5); (iii) Phân tích kết quả để làm rõ vấn đề tồn tại. Phân tích này cung cấp cơ sở khoa học, nhưng bị động phụ thuộc chuyên gia.

Bước 3 đề xuất giải pháp quy hoạch xám/xanh dựa trên kết quả đánh giá. Nội dung: (i) Đề xuất hạ tầng xám như tăng đường kính cống;

(ii) Đề xuất kết hợp xám và xanh như thêm hồ điều hòa, tăng diện tích thấm nước để giảm dòng chảy bề mặt. Bước này giúp đề xuất cụ thể nhưng hạn chế thủ công để không tối ưu.

Bước 4 cập nhật vận hành khung đảm bảo bền vững, với cơ chế lặp lại. Nội dung: (i) Thu thập dữ liệu mới từ GIS; (ii) Cập nhật mô hình và hiệu chỉnh; (iii) Vận hành giám sát, đào tạo và phối hợp các bên. Vòng lặp từ bước này về bước 1 nhấn mạnh tính thích ứng trong quy hoạch đô thị.

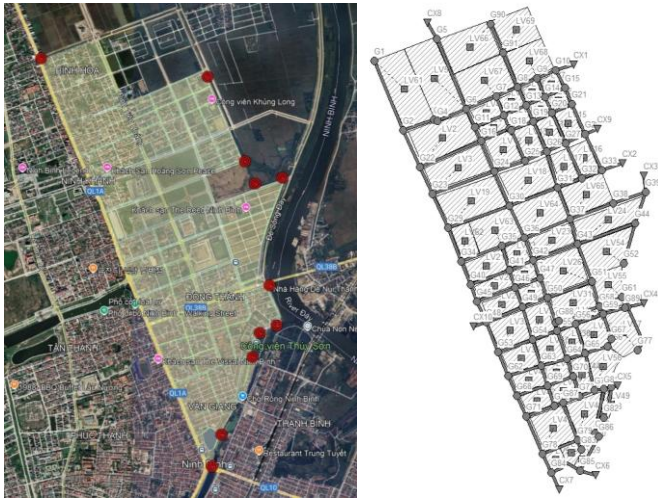
Khung đề xuất mang tính tổng quát, áp dụng linh hoạt cho các khu vực đô thị bằng cách điều chỉnh dữ liệu địa phương. Để minh họa, phần tiếp theo áp dụng vào khu vực Hoa Lư, Ninh Bình – đô thị điển hình với địa hình thấp và hệ thống thoát nước lạc hậu, làm rõ thách thức và hạn chế.

3. Trường hợp nghiên cứu: khu lõi đô thị Thành phố Ninh Bình cũ

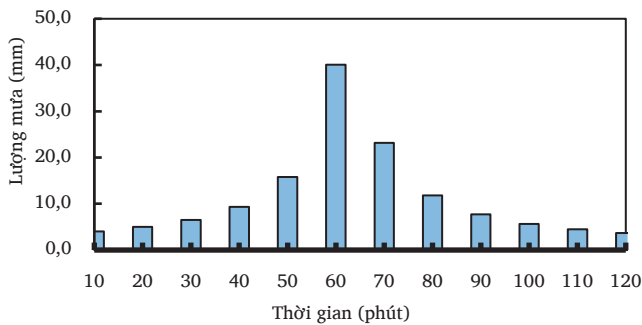
3.1. Đánh giá hiệu quả của giải pháp quy hoạch đã được phê duyệt

Khu vực đô thị Hoa Lư được giới hạn bởi: Phía Tây giáp sông Chanh, sông Vạc, Phía Bắc giáp sông Hoàng Long, Phía Đông giáp sông Đáy, và Phía Nam giáp cao tốc CT.01. Để dễ hình dung, khu vực này gồm một phần thành phố Ninh Bình trước đây và phần phát triển mở rộng đô thị về phía Bắc thành phố thuộc huyện Hoa Lư trước đây với tổng diện tích khoảng 66,83 (km²). Vùng đô thị dày đặc là khu vực thuộc đô thị Thành phố Ninh Bình cũ, nơi có số lượng nhà ở thành phố Ninh Bình đã phát triển nhanh về số lượng và được cải tạo nâng dần chất lượng. Nhiều khu đô thị mới được quy hoạch như khu dân cư (KDC) Ninh Nhất, Ninh Tiến, KDC quảng trường 1 và 2, KDC Triều Cánh. Đây là tiền đề cho sự phát triển nhanh chóng của khu vực Hoa Lư nhưng đồng thời cũng tạo ra sức ép lớn đến hệ thống thoát nước đô thị của khu vực.

Khu vực nghiên cứu điển hình được lựa chọn để đánh giá tình trạng ngập lụt theo hiện trạng và quy hoạch tại khu vực đô thị Hoa Lư thuộc phần khu lõi đô thị của TP Ninh Bình cũ (Hình 2). Đây là khu vực có hệ thống thoát nước tách biệt so với các khu vực khác của đô thị nên đảm bảo tính khép kín trong hệ thống. Ngoài ra, khu vực này đang chịu tình trạng ngập lụt nghiêm trọng do mức độ đô thị hóa cao và BĐKH. Hệ thống đường ống thoát nước và các hồ ga được số hóa trong mô hình mô phỏng như trên Hình 2. Tổng số hồ ga là 88 và số lượng đường ống là 137. Toàn bộ hệ thống là cống chính được thiết kế với chu kỳ lặp lại là 5 năm xét cho khu Đô thị Hoa Lư dự kiến lên đô thị loại I và căn cứ theo TCVN 7957:2023. Lựa chọn mô hình mưa 2h để tính toán cho khu vực nghiên cứu dựa trên ước tính trung bình khoảng thời gian cần thiết để nước mưa từ điểm xa nhất trong lưu vực chảy đến điểm thoát (outlet) của hệ thống. Căn cứ theo kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng năm 2020, đối với kịch bản RCP 8,5 lượng mưa 1 ngày lớn nhất tại Ninh Bình có xu hướng tăng thêm khoảng 50 % so với thời kỳ nền, do đó lựa chọn hệ số bất lợi nhất $K = 1,5$ cho khu vực nghiên cứu. Mô hình mưa thiết kế xét đến BĐKH cho giai đoạn 2050 theo kịch bản RCP 8,5 với tổng lượng mưa thiết kế trong 2 giờ là 137,248 (mm) như trong Hình 3.

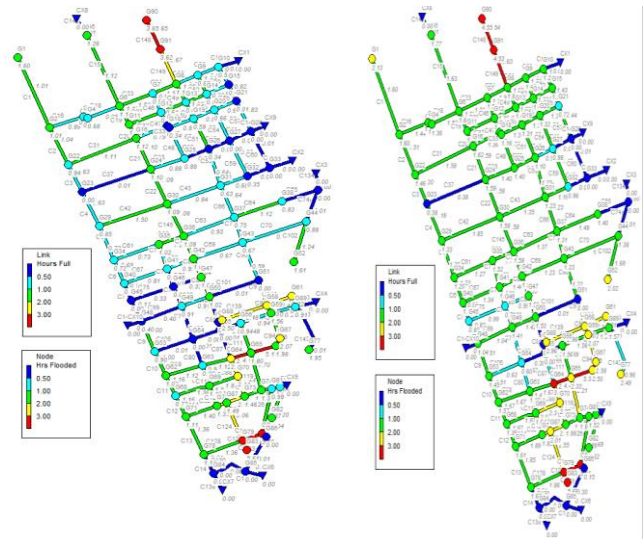


Hình 2. Mô hình mô phỏng khu vực nghiên cứu điển hình.



Hình 3. Mô hình mưa thiết kế – xét đến BĐKH RCP 8,5.

Dựa trên Quy hoạch chung Đô thị Ninh Bình đến năm 2030 tầm nhìn đến năm 2050, Kết quả mô phỏng khu vực nghiên cứu với cơn mưa thiết kế hiện trạng và cơn mưa thiết kế xét đến BĐKH RCP 8,5 được thể hiện trong Hình 4. Kết quả cho thấy, phương án quy hoạch hiện nay đối với cơn mưa thiết kế giai đoạn 2024 cũng như 2050 vẫn còn nhiều tồn tại cần phải khắc phục. Khi xét đến cơn mưa thiết kế dưới kịch bản RCP8.5 cho giai đoạn 2050 (tăng cường độ mưa 50 % do BĐKH), hệ thống quy hoạch vẫn đối mặt với mức độ ngập đáng kể, với thời gian ngập tại các nút hầu hết tăng cao hơn so với việc thiết kế sử dụng cơn mưa hiện trạng. Hơn nữa, từ góc độ kỹ thuật, hệ thống cống cấp 1 được xem xét trong mô hình thường được thiết kế nghiêm ngặt hơn về thời gian ngập lụt; tuy nhiên, toàn bộ các nút trong hệ thống thoát nước vẫn chịu ảnh hưởng bởi ngập úng với thời lượng phổ biến từ 1 đến 2 giờ, điều này phản ánh sự chưa hoàn thiện trong thiết kế hệ thống thoát nước. Ngoài ra, hệ thống thoát quy hoạch vẫn thiếu toàn diện khi nhiều khu vực mức độ ngập cao chưa được nghiên cứu xử lý. Cụ thể, khu vực quanh nút G79, G67, G1, G90 đã có thể nhận diện được mức độ ngập nặng hơn các điểm khác từ Hình 3 nhưng vẫn không có giải pháp xử lý ở quy hoạch 2050, dẫn đến các điểm này vẫn là ngập nặng nhất như ta có thể nhận diện trong Hình 4.



a) Sử dụng cơn mưa thiết kế hiện trạng
b) Sử dụng cơn mưa thiết kế có BĐKH

Hình 4. Kết quả mô phỏng ngập khu vực nghiên cứu – giai đoạn 2050.

3.2. Đề xuất giải pháp hạ tầng xám

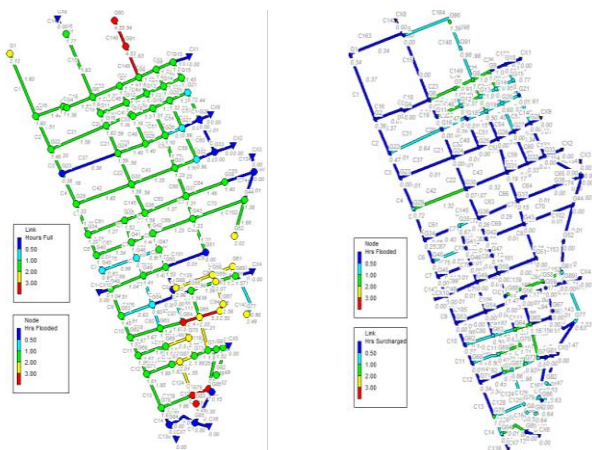
Kết quả trên cho thấy giải pháp quy hoạch hiện nay có hiệu quả trong việc xử lý ngập lụt tuy vẫn còn hạn chế. Hệ thống vẫn chịu mức độ ngập lụt cao đặc biệt khi xét đến BĐKH như thể hiện trên Hình 4. Đồng thời, phương án quy hoạch hiện tại chưa xử lý được một số ngập lụt lớn cục bộ, đặc biệt là khu vực xung quanh hồ ga G67 và G79. Đây là khu vực đô thị lâu đời với mật độ dân cư rất lớn cùng với đặc điểm địa hình khá trũng so với các khu vực khác. Dựa trên quan điểm giải pháp quy hoạch hiện tại đang tiếp cận tương đối hợp lý, một số giải pháp điều chỉnh hạ tầng xám được đề xuất như sau:

Thứ nhất, giải pháp quy hoạch hiện nay là xây dựng một hệ thống kênh thoát nước lớn tại đường Đinh Tiên Hoàng (dọc theo các hồ ga từ G5 về G50 song song với Quốc lộ 1A rồi dọc theo tuyến đường Đào Duy Từ đổ ra cửa xả mới là CX10 ra hồ Kỳ Lân). Đây là một giải pháp hợp lý vì đường Đinh Tiên Hoàng là tuyến đường rất rộng và xây mới nên thuận lợi cho việc xây dựng hệ thống cống thoát nước lớn. Tuy nhiên, Hình 4 cho thấy hệ thống cống thoát nước quy hoạch 2x2.5 (m) vẫn chưa đáp ứng được nhu cầu thoát nước của khu vực với cơn mưa thiết kế 2050 xét đến BĐKH RCP8.5. Giải pháp đề xuất mới là điều chỉnh kích thước cống khu vực này lên 3x4 (m), đồng thời điều chỉnh các cao độ tại các hồ ga hợp lý để tăng tốc độ thoát.

Thứ hai, phương án quy hoạch không đề cập đến việc cải tạo hệ thống thoát nước dọc theo quốc lộ 1A từ hồ ga G1 đến G84. Tuy nhiên, hệ thống cống thoát nước này có lưu lượng chảy khá lớn thể hiện thông qua việc các nút trên hệ thống này vẫn ngập khá lâu từ 1-2 giờ. Đồng thời, cao độ của hệ thống cống này rất cao so với các cống phía trong. Do vậy, giải pháp xử lý đưa ra là mở rộng hệ thống cống này từ 1 đường ống 1x1 (m) thành 2 đường ống 1x1 (m).

Thứ ba, do đặc điểm địa hình hiện nay là dốc từ trái qua phải, hạ tầng các khu vực quanh vị trí các hố ga G66 và G79 có địa hình khá thấp khiến cho ngập lụt rất khó xử lý. Đồng thời, đây là khu vực dân cư cũ nên việc cải tạo cũng nhiều khó khăn. Dựa trên đặc điểm địa hình là phía đông của khu vực nghiên cứu sẽ là hệ thống đê sông Đáy và sông Vân, phương án điều chỉnh quy hoạch ở đây đề xuất xây dựng và kết nối hình thành hệ thống cống thoát nước bao quanh rìa bên phải của khu vực nghiên cứu (G85-G92-G86-G82...).

Hình 5 trình bày kết quả mô phỏng phương án đề xuất quy hoạch xám so với phương án quy hoạch hiện nay. Ta có thể dễ dàng nhận thấy rằng phương án đề xuất đem lại hiệu quả vượt trội thông qua việc thời gian ngập tại các nút đã giảm thiểu đáng kể, phổ biến dưới 30 phút (thể hiện bằng nút màu xanh đậm). Chỉ còn một vài hố ga có thời gian ngập trong khoảng từ 1-2 giờ (màu xanh lá cây trên hình). Tuy nhiên, đây là các vị trí mà phương án quy hoạch điều chỉnh chưa tác động đến nhằm giảm thiểu mức độ thay đổi so với phương án quy hoạch hiện nay. Cùng với đó, ta cũng có thể nhận thấy trên Hình 5 là thời gian ngập tại các cống đã giảm đáng kể với hầu hết các cống màu xanh đậm. Điều này cho thấy phương án đề xuất hạ tầng xám có hiệu quả vượt trội so với phương án quy hoạch hiện nay. Tuy nhiên, giải pháp hạ tầng xám được đề xuất vẫn tồn tại nhiều hạn chế. Thứ nhất, vấn đề ngập lụt của hệ thống chưa được giải quyết triệt để. Điều này thể hiện qua việc các hố ga và cống vẫn còn ngập lụt, mặc dù mức ngập lâu nhất là < 2 giờ. Lưu ý rằng đây là hệ thống đường ống cấp 1 nên trong nhiều trường hợp thiết kế chặt chẽ, việc ngập tại các nút và đường ống không được chấp nhận. Thứ hai, việc cải tạo nâng cấp hệ thống được tiến hành với khối lượng khá lớn trong khi vấn đề kinh phí đầu tư chưa được xem xét và đánh giá cụ thể. Thứ ba, một số đường ống vẫn có vận tốc dòng chảy > 4.0 m/s, có thể vi phạm yêu cầu thiết kế cho hệ thống thoát nước đô thị về giới hạn vận tốc (thường trong khoảng từ 0,7 đến 4,0 m/s). Đồng thời, rất nhiều cống có tỷ lệ dòng chảy đầy tối đa trong cống > 1.0, thể hiện cống bị quá tải cần phải điều chỉnh tăng kích thước hoặc có giải pháp điều chỉnh độ dốc của cống.



a) Phương án quy hoạch hiện nay b) Phương án đề xuất hạ tầng xám

Hình 5. Kết quả mô phỏng phương án đề xuất hạ tầng xám – giai đoạn 2050

3.3. Đề xuất giải pháp hạ tầng xám và xanh kết hợp

Một số giải pháp hạ tầng xanh phổ biến hiện nay là: (1) Hồ điều hòa, (2) bề mặt thấm nước (Permeable Pavements), (3) vườn mưa và bồn lọc sinh học (Rain Gardens & Bioretention Cells), (4) mái xanh và tường xanh (Green Roofs & Green Walls), và (5) hố thấm và rãnh thấm (Infiltration Trenches & Swales). Để lựa chọn giải pháp hạ tầng xanh phù hợp, chúng ta cần xuất phát dựa trên đặc điểm của khu vực nghiên cứu. Ở đây, khu vực nghiên cứu là lõi đô thị của TP. Ninh Bình cũ không còn diện tích trống làm hồ điều hòa nên chúng ta sẽ tập trung vào giải pháp bề mặt thấm nước để đánh giá mức độ hiệu quả.

Giải pháp bề mặt thấm nước chủ yếu được áp dụng cho vỉa hè, sân vườn, bãi đỗ xe và đường nội bộ. Một số loại kết cấu phổ biến là: bê tông thấm nước, bê tông nhựa xốp và gạch lát interlocking thấm nước. Một số loại ít phổ biến hơn là lưới nhựa bê tông cho bãi đỗ xe cỏ hoặc bê tông asphalt macadam hờ (độ rỗng 15 đến 20 %). Việc lựa chọn vật liệu bề mặt thấm nước (bê tông thấm nước, bê tông nhựa xốp, hoặc gạch lát interlocking) phụ thuộc vào loại công trình, nhưng trong mô hình hóa, sử dụng một kết cấu điển hình chung dựa trên tỷ lệ diện tích áp dụng là đủ để đánh giá hiệu quả quản lý nước mưa. Sự chênh lệch về đặc tính thấm nước và chi phí (400.000 đến 800.000 VND/m²) giữa các vật liệu không đáng kể, cho phép kỹ sư điều chỉnh vật liệu phù hợp khi thiết kế chi tiết, đảm bảo tính khả thi kinh tế và kỹ thuật mà không ảnh hưởng lớn đến kết quả mô phỏng. Các nghiên cứu từ EPA và mô hình LID khuyến nghị áp dụng bề mặt thấm nước trên 10 đến 30 % diện tích lưu vực, phù hợp với đô thị Việt Nam nơi diện tích giao thông, vỉa hè, sân vườn theo quy định về quy hoạch phải đảm bảo chiếm trên 50 %. Hiệu quả giải pháp được đánh giá qua 4 trường hợp (5 %, 10 %, 15 %, 20 % diện tích) tại các lưu vực có tỷ lệ không thấm ≥ 75 % theo quy hoạch 2050. Kết cấu LID gồm: (1) lớp bề mặt (độ nhám 0,01); (2) lớp lát (200 mm, độ rỗng 0,3; tỷ lệ không thấm 0,05; thấm 300 mm/giờ); (3) lớp lưu trữ (300 mm, độ rỗng 0,4; thấm 100 mm/giờ), không dùng lớp thoát nước để tiết kiệm chi phí. Tổng chi phí ước tính (đơn giá 600,000 VND/m²) là 81,87; 163,74; 245,61 và 327,48 tỷ đồng cho 4 phương án.

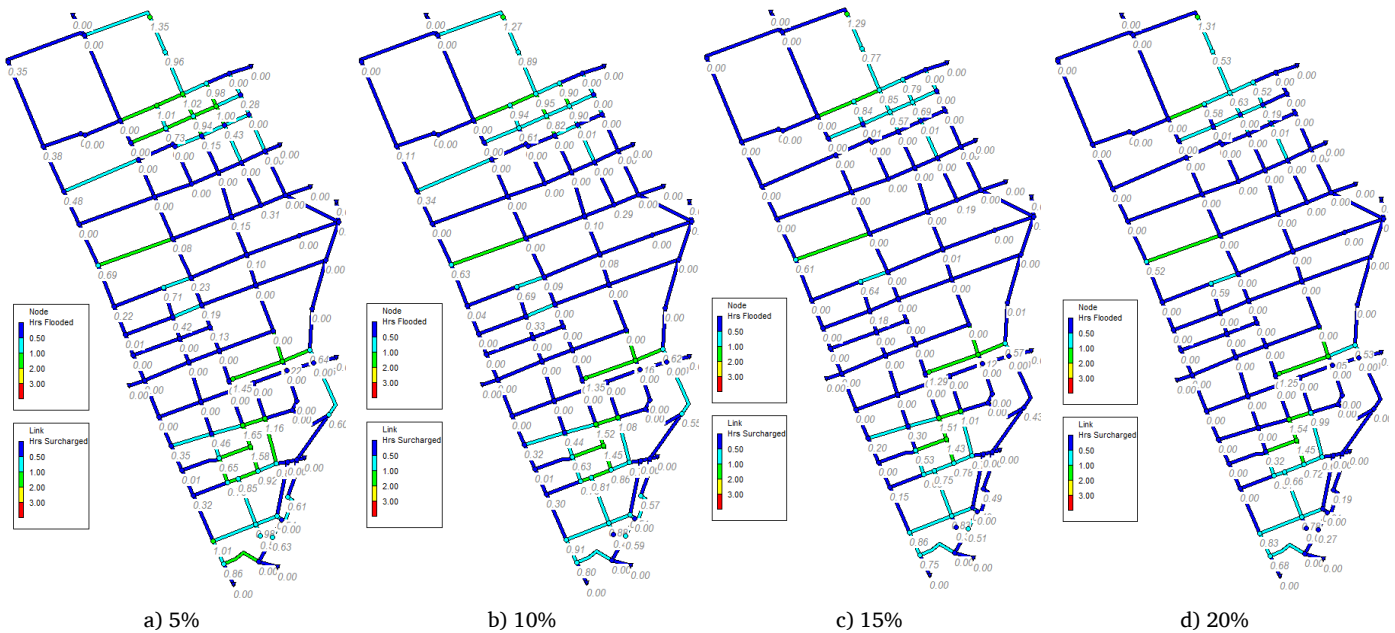
Kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 1. Giải pháp sử dụng bề mặt thấm nước kết hợp với hạ tầng xám trong giai đoạn 2050 đã chứng minh tính khả thi và hiệu quả cao trong việc giảm ngập lụt đô thị tại Ninh Bình. Khi tỷ lệ bề mặt thấm nước tăng từ 0% lên 20%, lượng nước thấm tăng đáng kể từ 3.785 mm (2.76%) lên 24.201 mm (17.64%), trong khi dòng chảy bề mặt giảm từ 131.483 mm (95.81%) xuống 109.123 mm (79.50%), đạt mức giảm dòng chảy bề mặt ấn tượng 17.00%. Số lượng hố ga bị ngập giảm từ 53 xuống 27, và số cống bị quá tải giảm từ 77 xuống 60, cho thấy giải pháp này giảm đáng kể áp lực lên hệ thống thoát nước. Các điểm vẫn còn ngập lụt, như G88, G90, G91, chủ yếu nằm ở những lưu vực có hệ thống cống thoát nước kích thước quá nhỏ, đòi hỏi cải thiện hạ tầng xám. Trong bối cảnh đô thị Ninh Bình với nhiều khu dân cư lâu đời, nhà riêng lẻ, và thu nhập cư dân hạn chế, các giải pháp như bồn thấm hay vườn mưa khó khả thi do chi phí cao và hiệu quả không vượt trội so với bề mặt thấm nước.

Do đó, giải pháp bề mặt thấm nước vẫn là lựa chọn tối ưu, mang lại hiệu quả rõ rệt và phù hợp với điều kiện thực tế, cần được ưu tiên triển khai ở các lưu vực có diện tích không thấm cao, đồng thời kết hợp nâng

cấp hạ tầng xám để giải quyết triệt để ngập lụt trong tương lai. Hình 6 thể hiện kết quả mô phỏng cho 4 trường hợp áp dụng giải pháp bề mặt thấm nước.

Bảng 1. Kết quả so sánh hiệu quả giải pháp bề mặt thấm nước – Giai đoạn 2050.

Chỉ Số	0%	5%	10%	15%	20%
Tổng lượng mưa (mm)	137,248	137,248	137,248	137,248	137,248
Lượng nước thấm (mm)	3,785	8,432	13,955	19,644	24,201
% Lượng nước thấm	2,76%	6,14%	10,17%	14,31%	17,64%
Dòng chảy bề mặt (mm)	131,483	126,619	120,726	114,468	109,123
% Dòng chảy bề mặt	95,81%	92,25%	87,96%	83,41%	79,50%
% Giảm dòng chảy bề mặt	0,00%	3,70%	8,18%	12,94%	17,00%
Lưu trữ cuối kỳ (mm)	3,201	3,369	3,688	4,214	4,964
Số lượng hố ga bị ngập	53	49	45	36	27
Số lượng cống bị quá tải	77	76	73	64	60



Hình 6. Kết quả mô phỏng phương án đề xuất hạ tầng xám kết hợp bề mặt thấm nước – giai đoạn 2050

3.4. Cập nhật và vận hành khung quản lý quy hoạch

a) Đề xuất giải pháp theo dõi, quan trắc, cập nhật mô hình

Để duy trì độ chính xác của mô hình SWMM đã xây dựng, cần triển khai hệ thống theo dõi và quan trắc liên tục, tập trung vào các thông số thủy văn, thủy lực và sử dụng đất tại khu vực Hoa Lư. Giải pháp cụ thể bao gồm:

➤ Theo dõi và quan trắc dữ liệu thời gian thực: Lắp đặt mạng lưới cảm biến IoT (Internet of Things) tại các điểm trọng yếu dựa trên kết quả đánh giá ngập cục bộ ở mô hình kết hợp với 5-7 trạm đo mưa tự động. Dữ liệu sử dụng đất cũng được cập nhật liên tục để theo dõi thay đổi không thấm nước.

➤ Cập nhật và hiệu chỉnh mô hình: Áp dụng quy trình lặp lại hàng năm: (i) Thu thập dữ liệu mới từ quan trắc (mưa lũ, mực nước sông); (ii) Hiệu chỉnh thông số mô hình bằng phương pháp thử sai hoặc tối ưu hóa đơn giản; (iii) Kiểm định qua mô phỏng kịch bản mới, so sánh với dữ liệu thực tế từ các trận mưa thu thập được.

Giải pháp này không chỉ khắc phục hạn chế dữ liệu đầu vào không đầy đủ ở bước 1 mà còn nâng cao khả năng thích ứng với BĐKH, đảm bảo mô hình luôn phản ánh hiện trạng động của hệ thống thoát nước.

b) Đề xuất giải pháp vận hành, giám sát, chuyển giao công nghệ

Vận hành khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số tại khu vực Hoa Lư – Ninh Bình đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các đơn vị nhà nước, doanh nghiệp và chuyên gia, nhằm chuyển đổi từ giai đoạn mô phỏng lý thuyết sang ứng dụng thực tiễn

bền vững. Dựa trên các quy định pháp lý như Nghị định 02/VBHN-BXD ngày 17/5/2024 về thoát nước và xử lý nước thải, Nghị định 175/2024/NĐ-CP ngày 30/12/2024 về quy định chi tiết một số điều và biện pháp thi hành luật xây dựng về quản lý hoạt động xây dựng, và TCVN 7957:2023 về thoát nước – mạng lưới và công trình bên ngoài – yêu cầu thiết kế, giải pháp được thiết kế với quy trình cụ thể, tập trung vào tính khả thi địa phương và thích ứng với BĐKH đến năm 2050.

Một phương án đề xuất như sau: Đơn vị chính chịu trách nhiệm quản lý và vận hành mô hình là Công ty Cổ phần Cấp thoát nước Ninh Bình, với vai trò trung tâm trong việc khai thác hệ thống hạ tầng xám-xanh dựa trên kết quả mô phỏng SWMM/MIKE. Các đơn vị phối hợp bao gồm: Sở Xây dựng Ninh Bình (thẩm định quy hoạch và giám sát tổng thể), Sở Nông nghiệp và Môi trường (hỗ trợ dữ liệu thủy lợi hệ thống sông và kênh), Trung tâm Khí tượng Thủy văn Ninh Bình (cung cấp dữ liệu mưa thời gian thực), và Trường Đại học Thủy lợi (tư vấn kỹ thuật nâng cao).

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất khung quản lý quy hoạch thoát nước đô thị sử dụng mô phỏng số, áp dụng thành công tại khu vực Hoa Lư, Ninh Bình. Khung này bao gồm bốn bước chính: xây dựng mô hình hiện trạng, đánh giá ngập lụt theo hiện trạng và quy hoạch, đề xuất giải pháp hạ tầng xám/xanh kết hợp, và cập nhật vận hành khung. Kết quả mô phỏng bằng SWMM/MIKE cho thấy phương án quy hoạch 2050 đã được phê duyệt của địa phương bước đầu có hiệu quả với cơn mưa thiết kế hiện nay nhưng vẫn hạn chế dưới kịch bản RCP8.5, đặc biệt tại các điểm cực bộ như G67 và G79 do địa hình trũng và dân cư dày đặc.

Giải pháp hạ tầng xám đề xuất (nâng cống Đình Tiên Hoàng lên 3x4 m, mở rộng Quốc lộ 1A thành 2 ống 1x1 m, xây vòng cống phía đông) giảm thời gian ngập dưới 30 phút tại 80% vị trí, vượt trội quy hoạch hiện tại. Kết hợp hạ tầng xanh (bề mặt thấm nước 5-20% diện tích không thấm $\geq 75\%$) giảm dòng chảy bề mặt 17%, hồ ga ngập từ 53 xuống 27, cống quá tải từ 77 xuống 60, hiệu quả hơn 20-30% so quy hoạch phê duyệt, với chi phí ước tính 81.87-327.48 tỷ đồng.

Nghiên cứu góp phần lấp khoảng trống khoa học trong quản lý thoát nước đô thị Việt Nam, cung cấp công cụ hỗ trợ quyết định cho nhà quản lý, phù hợp Nghị quyết 06-NQ/TW. Tuy nhiên, hạn chế bao gồm tính bị động của phân tích thủ công và chưa đánh giá chi phí toàn diện. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hiệu quả của khung quản lý quy hoạch được đề xuất được cải tiến thông qua tích hợp tối ưu hóa đa mục tiêu nhằm nâng cao chất lượng giải pháp được đưa ra.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bangalore, M., Smith, A. & Veldkamp, T. (2019) Exposure to Floods, Climate Change, and Poverty in Vietnam. *EconDisCli* 3, 79–99.
- [2]. Buch, A., Paprotny, D., Shahi, K., Kreibich, H., Sairam, N. (2025). Modelling flood losses of micro-businesses in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 25, 2437-2453.

- [3]. Hanh, V. (2024). Impact of Typhoon Yagi on Vietnam: Economic Damage and Recovery Efforts. *Vietnam-Briefing.com*, Dezan Shira and Associates.
- [4]. Bộ Xây dựng. (2023). Quyết định số 143/QĐ-BXD ngày 08/03/2023 về việc Ban hành Kế hoạch của Bộ Xây dựng thực hiện Nghị quyết số 06-NQ/TW ngày 24/01/2022 của Bộ Chính trị về Quy hoạch, xây dựng, quản lý và phát triển bền vững đô thị Việt Nam. Bộ Xây dựng, Hà Nội.
- [5]. Thiện, T. Đ., Linh, Đ. T., Gấm, V. T., Thư, N. T., Chiến, H. C. (2023). Thực trạng ngập úng đô thị Hà Nội giai đoạn 2012-2022. *Tạp chí Kiến Trúc*, 02-2023, 56-62.
- [6]. Bộ Xây dựng. (2016). Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 07-2:2016/BXD: Các công trình hạ tầng kỹ thuật - Công trình thoát nước. Bộ Xây dựng, Hà Nội.
- [7]. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2020). Kịch bản biến đổi khí hậu. NXB Tài nguyên - Môi trường và bản đồ Việt Nam, Hà Nội.
- [8]. IPCC. (2018). Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR15).
- [9]. Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M., Rauch, W., Schilling, W., Urbonas, B. (2007). Toward the sustainable management of urban storm-water. *Indoor Built Environ*, 16(3), 273–285.
- [10]. Stahre, P. (2006). Sustainability in Urban Storm Drainage: Planning and Examples. *Svenskt Vatten*, Stockholm, Sweden.
- [11]. Lan, N. T. M., Dũng, T. Đ., Quang, C. N. X., Giang, N. N. H., Hòa, H. V., Tấn, L. Đ. (2021). Đánh giá khả năng áp dụng giải pháp thoát nước đô thị bền vững tại khu vực đang đô thị hóa ở huyện Bình Chánh, thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, 732, 49-64.
- [12]. Phương, N. T. B. (2022). Hạ tầng xanh - giải pháp bền vững cho thoát nước đô thị. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, 16(4V), 219-235.
- [13]. Nhân, H. T., Tiến, N. H. (2022). Giải pháp thành phố bọt biển trong thoát nước mặt đô thị Việt Nam hướng đến phát triển bền vững - những thách thức và định hướng. *Tạp chí Xây dựng*, 02, 104-107.
- [14]. U.S. EPA. (n.d.). Storm Water Management Model (SWMM). <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [15]. Liu, C., Li, W., Zhao, C., Xie, T., Jian, S., Wu, Q., Xu, Y., Hu, C. (2023). BK-SWMM flood simulation framework is being proposed for urban storm flood modeling based on uncertainty parameter crowdsourcing data from a single functional region. *Journal of Environmental Management*, 344, 118482.
- [16]. Zhuang, Q., Li, M., Lu, Z. (2023). Assessing runoff control of low impact development in Hong Kong's dense community with reliable SWMM setup and calibration. *Journal of Environmental Management*, 345, 118599.
- [17]. Tebyanian, N., Fischbach, J., Lempert, R., Knopman, D., Wu, H., Iulo, L., Keller, K. (2023). Rhodium-SWMM: An open-source tool for green infrastructure placement under deep uncertainty. *Environmental Modelling and Software*, 163, 105671.
- [18]. Yuan, L., Mikelonis, A., Yan, E. (2023). Using SWMM for emergency response planning: A case study evaluating biological agent transport under various rainfall scenarios and urban surfaces. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131747.
- [19]. Nữ, H. T. T., Quyên, T. T., Anh, V. T. V., Thảo, N. T. H., Văn, C. T. (2022). Ứng dụng mô hình thủy văn đô thị mô phỏng mức độ ngập do gia tăng mực nước triều và khả năng thoát nước cho hệ thống kênh Tân Hóa – Lò Gốm ở thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, 740, 22-35.
- [20]. Hải, Đ. M. (2020). Ảnh hưởng của các đặc trưng mưa thiết kế tới hiệu quả kiểm soát dòng chảy của các công trình thoát nước bền vững. *Tạp chí Khoa học Thủy lợi và Môi trường*, 68, 98-106.
- [21]. Thư, P. T. S., Tri, Đ. Q., Hồng, N. V. (2023). Ứng dụng mô hình MIKE 21 và công nghệ GIS xây dựng bản đồ, đánh giá sự lan truyền ô nhiễm môi

- trường nước theo các kịch bản biến đổi khí hậu cho khu vực nuôi trồng thủy sản ven biển Hải Phòng. Tạp chí Khoa học biến đổi khí hậu, Tháng 12(280, 1-17.
- [22]. Thái, T. H. (2017). Ứng dụng mô hình MIKE 21 FM mô phỏng chất lượng nước khu vực ven biển Đình Vũ. Tạp chí phát triển Khoa học và Công nghệ - đại học Đà Nẵng, 20(T4), 282-292.
- [23]. Phương, N. T. B. (2022). Hạ tầng xanh - giải pháp bền vững cho thoát nước đô thị. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 16(4), 219-235.
- [24]. Gao, Z., Zhang, Q., Xie, Y., Wang, Q., Dzakupasu, M., Xiong, J., Wang, X. (2022). A novel multi-objective optimization framework for urban green-gray infrastructure implementation under impacts of climate change. Science of The Total Environment, 825, 153954.
- [25]. Hoàng, B. (2025). TP. Hồ Chí Minh gỡ vướng siêu dự án chống ngập 10.000 tỷ. Thuonghieucongluan.com.vn.