

ĐỊNH HƯỚNG ÁP DỤNG CÁC GIẢI PHÁP DỰA VÀO THIÊN NHIÊN (NBS) TRONG ỨNG PHÓ NGẬP LỤT TẠI ĐÔ THỊ CAO BẰNG

Implementing Nature-based Solutions (NbS) for Flood Mitigation in Cao Bang Urban Area: A Strategic Framework

TS. Huỳnh Trọng Nhân¹, TS. Đào Huy Hoàng²



Tóm tắt: Trận lũ năm 2025 tại Cao Bằng cho thấy sự bất cập của hạ tầng truyền thống trước địa hình dốc. Bài báo nghiên cứu việc ứng dụng Giải pháp dựa vào thiên nhiên (NbS), Thành phố bọt biển và SuDS, có đối chiếu với kinh nghiệm từ Đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả nhấn mạnh sự chuyển dịch tư duy từ "thoát nước nhanh" sang kiểm soát tại nguồn và triệt tiêu năng lượng dòng chảy để phù hợp với địa hình chia cắt. Các đề xuất về lưu trữ sinh thái và làm chậm nhịp lũ không chỉ giảm thiểu rủi ro ngập lụt, xói mòn mà còn định hình khung lý thuyết giúp Cao Bằng kiến tạo không gian đô thị an toàn, tăng cường sức chống chịu trước các cú sốc khí hậu tương lai.

Từ khóa: Cao Bằng, giải pháp dựa vào thiên nhiên (NbS), hệ thống thoát nước đô thị bền vững (SuDS), thành phố bọt biển (SPC), ngập lụt đô thị.

Abstract: The 2025 historic flood in Cao Bang exposed the limitations of traditional gray infrastructure against surface runoff on steep terrains. This paper examines the application of Nature-based Solutions (NbS), the Sponge City model, and Sustainable Drainage Systems (SuDS) for mountainous urban flood management, cross-referenced with practical experiences from the Mekong Delta. The research highlights a strategic shift from a "rapid drainage" mindset to at-source control and flow energy dissipation to accommodate highly dissected topography. Proposals for ecological storage and flood attenuation not only mitigate flood and erosion risks but also establish a theoretical framework to help Cao Bang develop safe urban spaces and enhance resilience against future climate shocks.

Keywords: Cao Bang, nature-based solutions (NbS), sponge city (SPC), sustainable urban drainage systems (SuDS), urban flooding.

Nhận bài ngày 20/01/2026, chỉnh sửa ngày 12/02/2026, chấp nhận đăng ngày 22/3/2026.

I. GIỚI THIỆU

Năm 2025, đô thị Cao Bằng và nhiều khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam đã phải đối mặt với những đợt thiên tai và ngập lụt lịch sử, gây thiệt hại nghiêm trọng về người và hạ tầng. Trận lũ kỷ lục trên sông Bằng vào tháng 10 với đỉnh lũ vượt mức lịch sử năm 1986 đã bộc lộ rõ tính dễ bị tổn thương và những giới hạn của hệ thống hạ tầng xám truyền thống trước áp lực dòng chảy mật trên địa hình dốc. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu diễn biến khó lường, việc duy trì tư duy thoát nước nhanh bằng bê tông hóa không còn đảm bảo tính an toàn bền vững cho các đô thị có địa hình đặc thù. Trên thế giới, các giải pháp NbS, mô hình Thành phố bọt biển và hệ thống thoát nước đô thị bền vững đã trở thành những triết lý quy hoạch tiên phong nhằm tăng cường khả năng chống chịu thông qua việc phục hồi các chu trình thủy văn tự nhiên.

Trong những năm vừa qua, kinh nghiệm thực tiễn từ các chương trình hỗ trợ kỹ thuật như FPP (Flood Proofing Program - Chương trình Thoát nước và Chống ngập ứng Đô thị Đồng bằng sông Cửu Long) và MCRP (Mekong Delta Climate Resilience Programme - Dự án Thích ứng với biến đổi khí hậu vùng Đồng bằng sông Cửu Long) tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đã cung cấp những bài học giá trị về việc lồng ghép hạ tầng xanh vào quản lý rủi ro ngập ứng. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu và ứng dụng hiện nay vẫn

¹Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

² Phó Hiệu trưởng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

Email: ¹huynhnhan@mtu.edu.vn

tập trung vào đặc thù vùng đồng bằng, nơi ưu tiên khả năng lưu trữ và thấm thấu. Việc chuyển đổi các mô hình này sang bối cảnh đô thị miền núi với địa hình thung lũng lòng máng, độ dốc lớn và năng lượng dòng chảy cao như Cao Bằng vẫn là một thách thức về mặt kỹ thuật và quy hoạch. Bài báo này giải quyết câu hỏi nghiên cứu trọng tâm: Làm thế nào để vận dụng linh hoạt và hiệu quả các giải pháp NbS vào đặc thù của đô thị Cao Bằng nhằm kiểm soát dòng chảy tại nguồn và giảm thiểu rủi ro lũ quét, ngập úng đô thị? Thông qua việc phân tích các rào cản hiện hữu và kế thừa kinh nghiệm từ các dự án thực tế, nghiên cứu đề xuất một khung định hướng đa tầng, hỗ trợ địa phương kiến tạo một không gian đô thị an toàn và bền bỉ trước sự bất định của biến đổi khí hậu trong tương lai.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

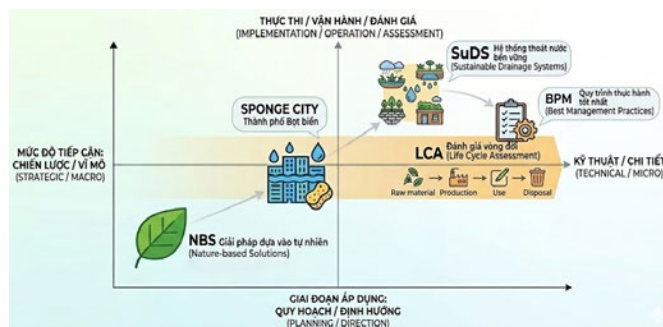
2.1. NBS và các khái niệm liên quan trong phát triển đô thị thích ứng biến đổi khí hậu

Khởi đầu từ những năm 1970, khái niệm Quy trình thực hành tốt nhất (Best Management Practices - BMPs) và Đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) đã xuất hiện nhằm tối ưu hóa quy trình kỹ thuật và đánh giá tác động công nghiệp [1], [2]. Đến cuối thập niên 1990, khái niệm Hệ thống thoát nước bền vững (Sustainable Drainage Systems - SuDS) được phổ biến tại Châu Âu như một giải pháp kỹ thuật cụ thể cho thoát nước đô thị. Bước sang thế kỷ 21, các giải pháp dựa vào thiên nhiên (Nature-based Solutions - NbS) được IUCN và Ngân hàng Thế giới đề xuất vào khoảng năm 2008 như một triết lý bao trùm [3]. Gần đây nhất, mô hình Thành phố bọt biển (Sponge City) được các nước Châu Âu và Trung Quốc chính thức hóa vào năm 2013, đánh dấu sự cụ thể hóa triết lý NbS vào quy hoạch đô thị hiện đại [4].

Nếu so sánh mức độ tiếp cận từ lý thuyết đến thực hành, NbS nằm ở cực lý thuyết cao nhất, đóng vai trò là khung tư tưởng định hướng các hành động thuận tự nhiên để giải quyết các thách thức xã hội. Ngược lại, SuDS và BMPs nằm ở cực thực hành, tập trung vào các giải pháp kỹ thuật chi tiết và quy trình vận hành cụ thể cho từng dự án [1]. Thành phố bọt biển đóng vai trò là cầu nối trung gian, chuyển hóa triết lý của NbS thành các chiến lược quy hoạch không gian đô thị. Trong khi đó, LCA đóng vai trò là một phương pháp luận khoa học, cung cấp công cụ tính toán và định lượng để đánh giá mức độ bền vững thực tế của các giải pháp nêu trên [2].

Để chuyển đổi từ ý tưởng hoạch định chính sách đến triển khai dự án, mỗi khái niệm đảm nhận một vai trò chiến lược khác nhau (Hình 1). NbS thường được áp dụng trong giai đoạn tầm nhìn và hoạch định chính sách vĩ mô nhằm thiết lập mục tiêu dài hạn. Tiếp nối là Thành phố bọt biển, được triển khai trong giai đoạn quy hoạch tổng thể và thiết kế đô thị để định hình cấu trúc hạ tầng [4]. Khi đi vào giai đoạn thiết kế chi tiết và thi công, SuDS trở thành công cụ chủ đạo với các cấu trúc vật lý cụ thể. Cuối cùng, BMPs tập trung vào giai đoạn vận hành, bảo trì để duy trì hiệu năng hệ thống, trong khi LCA được sử dụng xuyên suốt hoặc tại giai đoạn hậu kiểm để đánh giá tác động môi trường tổng thể từ khi hình thành đến khi kết thúc dự án [2], [5].

Mặc dù các khái niệm NbS, SuDS, Thành phố bọt biển, BMPs và LCA đã được phát triển và áp dụng rộng rãi trong quản lý đô thị thích ứng biến đổi khí hậu, nhưng vẫn tồn tại những khoảng trống đáng kể trong nghiên cứu, đặc biệt khi chuyển đổi từ lý thuyết sang



Hình 1. Mối quan hệ giữa NbS và các khái niệm liên quan (Nguồn: tác giả)

thực tiễn ở các bối cảnh địa lý ở khu vực nghiên cứu. Ít tài liệu đề cập đến việc thích nghi các giải pháp này cho địa hình miền núi với độ dốc cao, năng lượng dòng chảy mạnh và rủi ro lũ quét đột ngột, như ở các đô thị miền núi phía Bắc. Vì vậy, nghiên cứu này nhằm lấp đầy khoảng trống bằng cách đề xuất khung định hướng đa tầng, tập trung vào việc thích nghi NbS cho đặc thù địa hình Cao Bằng, thông qua đối chiếu kinh nghiệm thực tiễn từ ĐBSCL.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để giải quyết câu hỏi nghiên cứu về việc vận dụng linh hoạt các giải pháp dựa vào thiên nhiên (NbS) cho đặc thù đô thị miền núi Cao Bằng, nghiên cứu đã sử dụng phối hợp các phương pháp. Nghiên cứu tiến hành tổng hợp và phân tích các bài học kinh nghiệm từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) thông qua lăng kính đối chiếu đặc thù địa hình. Trọng tâm là việc kế thừa các kết quả từ Chương trình FPP (2012-2020) và Dự án MCRP (2021-2025) về lồng ghép hạ tầng xanh vào quản lý rủi ro ngập úng [6] [7]. Các dữ liệu thực tiễn từ các đô thị thí điểm như Cà Mau, Long Xuyên, Rạch Giá, Bến Tre và Vĩnh Long được phân tích để rút ra các nhóm giải pháp về kỹ thuật và khung chính sách thích ứng, làm cơ sở đề xuất cho địa bàn đô thị Cao Bằng.

Về bản đồ, nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật xử lý dữ liệu không gian từ nguồn dữ liệu tin cậy của chương trình Copernicus (Châu Âu). Cụ thể, mô hình số bề mặt Copernicus DEM (GLO-30) với độ phân giải không gian 30m được sử dụng để giải đoán đặc điểm địa hình thung lũng lòng máng của Cao Bằng [8]. Thông qua việc phân tích DSM, nghiên cứu xác lập các dải cao độ thấp từ 185m đến 195m tại các phường lõi đô thị như Nùng Trí Cao, Thục Phán và Tân Giang. Quy trình này cho phép xác định chính xác các "vùng trũng" rủi ro cao khi mực nước sông Bằng dâng vượt ngưỡng báo động, phục vụ việc quy hoạch các không gian trữ lũ tự nhiên.

Đặc biệt, để phân tích thực trạng trận lũ ngày 01/10/2025, nghiên cứu áp dụng phương pháp phát hiện sự thay đổi (Change Detection) dựa trên sự kết hợp giữa dữ liệu vệ tinh Radar Sentinel-1 và chỉ số nước từ vệ tinh quang học Sentinel-2 [9]. Dữ liệu Sentinel-1 được thu thập tại hai thời điểm: trước lũ (trung bình tháng 08-09/2025) và đỉnh lũ (01/10/2025). Quy trình xử lý sử dụng phép trừ Decibel trên thang đo logarit để nhận diện sự thay đổi đặc trưng khi bề mặt đất bị thay thế bởi mặt nước. Nhằm tăng tính chính xác cho khu vực miền núi, nghiên cứu tích hợp bộ lọc địa hình (Slope Mask) để loại bỏ các vùng có độ dốc trên 10° từ mô hình số độ cao, giúp khử sai số do hiệu ứng bóng núi [10]. Cuối cùng, bộ lọc nhiễu Speckle được áp dụng để làm mịn ảnh, tạo ra bản đồ phân vùng ngập lụt định lượng phục vụ việc phát triển các giải pháp NbS phù hợp.

3.1. Kinh nghiệm triển khai các giải pháp NbS ở đô thị Đồng bằng Sông Cửu Long

Tiếp nối thành quả trên, dự án MCRP (2021-2025) mở rộng năng lực chống chịu cho 13 tỉnh ĐBSCL [6]. Dự án đã thúc đẩy việc đưa khái niệm "Thành phố bọt biển" vào tiêu chí phân loại đô thị và triển khai 05 công trình SuDS tại Bến Tre, Vĩnh Long, Sóc Trăng, Giá Rai và Trà Vinh. Đến năm 2023, toàn bộ các tỉnh ĐBSCL đã ban hành quy định quản lý thoát nước địa phương. Đặc biệt, cơ chế giá dịch vụ thoát nước tại 05 tỉnh dự kiến tạo nguồn thu 13 triệu Euro vào năm 2024 cho công tác bảo trì hệ thống. Bên cạnh đó, các dự án khác cũng áp dụng NbS tiêu biểu như Dự án Phát triển Đô thị và Tăng cường Khả năng Thích ứng (Can Tho Urban Development and Resilience Project - World Bank) xây dựng các hồ điều hòa lớn và cải tạo kênh rạch kết hợp không gian xanh.

(1) Chuyển đổi từ tư duy thoát nước nhanh nhất có thể sang quản lý nước tại chỗ như một nguồn tài nguyên quý giá. Việc lựa chọn giải pháp phải đảm bảo cân bằng 4 trụ cột lợi ích: (1) Lưu lượng nước: Giảm lưu lượng đỉnh và quản lý rủi ro ngập lụt (2) Chất lượng nước: Xử lý ô nhiễm dòng chảy thông qua các lớp lọc tự nhiên (3) Tiện nghi: Kiến tạo không gian cảnh quan, cải thiện chất lượng sống đô thị và (4) Đa dạng sinh học: Bảo vệ và phát triển hệ sinh thái tại địa phương.

(3) Việc lựa chọn vị trí triển khai cần tuân thủ các tiêu chí kỹ thuật về hiện trạng, ưu tiên khu vực ngập úng nghiêm trọng. Tận dụng không gian công cộng như các hoa viên, dải phân cách, vỉa hè hoặc công viên để thiết kế đa chức năng. Sử dụng Mô hình số độ cao (DEM) chính xác và mô hình thủy lực để giả lập các kịch bản mưa, từ đó xác định quy mô công trình phù hợp.

(4) Các giải pháp NbS thường được áp dụng thí điểm như (1) Hệ thống thấm và lưu giữ có khả năng chịu tải cao để lưu trữ nước mưa tạm thời (2) Hệ thống lọc sinh học như vườn thu nước mưa, rãnh lọc kết hợp trồng cây bụi bản địa có khả năng chịu ngập để lọc nước và tăng độ thấm (3) Bề mặt thấm nước sử dụng gạch block tự chèn có khe thấm hoặc bê tông rỗng, bên dưới là các lớp đá dăm và vải địa kỹ thuật để tăng khả năng bổ cập nước ngầm.

3.2. Định hướng áp dụng giải pháp NbS tại đô thị Cao Bằng

Hình 3. Bản đồ ngập lụt đô thị Cao Bằng ngày 01/10/2025
(Nguồn: Tác giả)

Số 106.2026 **XÂY DỰNG & ĐÔ THỊ** 103

Với Quy hoạch chung thành phố Cao Bằng năm 2017, và tình hình thực tế thiên tai của đô thị Cao Bằng trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng, có thể thấy các vấn đề trong phát triển đô thị Cao Bằng đặt ra như sau:

(1) Đô thị có địa hình thung lũng lòng máng đặc trưng. Nhiều khu dân cư lõi đô thị hiện hữu đang nằm tại các rốn lũ tự nhiên với cao độ nền thấp hơn đỉnh lũ lịch sử tháng 10/2025 (185,79m). Sự bất tương xứng giữa đặc điểm địa mạo và mật độ nén đô thị này đã biến khu vực trung tâm thành phễu thu nước, làm gia tăng cấp số nhân tính dễ bị tổn thương của cộng đồng trước các hiện tượng thủy văn cực đoan.

(2) Thành phố vẫn sử dụng hệ thống thoát nước chung, phụ thuộc hoàn toàn vào "hạ tầng xám" và thiếu vắng các giải pháp hạ tầng xanh thích ứng. Đồng thời, việc phát triển hạ tầng giao thông thiếu đồng bộ đã chia cắt các lưu vực thoát nước tự nhiên, gây ách tắc dòng chảy mặt và trầm trọng hóa ngập úng cục bộ.

(3) Giữa định hướng quy hoạch không gian và thực tiễn phát triển đô thị trước tác động của biến đổi khí hậu còn một số bất cập. Các công trình kè cứng ven bờ đã làm suy giảm không gian trữ lũ sinh thái của hệ thống sông Bằng, đồng thời cản trở lưu tốc dòng chảy tự nhiên. Đối chiếu với phân tích ảnh radar ngày 01/10/2025, nhiều quỹ đất định hướng phát triển đô thị mới lại nằm trong vùng rủi ro ngập lụt cao.

(4) Năng lực quản lý rủi ro thiên tai bị cản trở do thiếu hụt các dữ liệu nền tảng cốt lõi (IDF, mô hình độ cao số DEM) để chạy mô phỏng thủy lực. Do đó, thành phố gặp khó khăn trong việc xây dựng các kịch bản phát triển đô thị tích hợp đánh giá rủi ro thiên tai, cộng hưởng với việc mạng lưới trạm quan trắc khí tượng thủy văn còn thưa thớt, làm giảm hiệu quả của hệ thống cảnh báo sớm.

Dựa trên 4 rào cản hiện hữu, khung định hướng lồng ghép các giải pháp Dựa vào Thiên nhiên cho đô thị Cao Bằng cấu trúc theo 4 tầng chiến lược được đề xuất như Hình 4.



Hình 4. Đề xuất khung định hướng lồng ghép các giải pháp dựa vào thiên nhiên (NbS) cho đô thị Cao Bằng

Khung định hướng áp dụng giải pháp dựa vào tự nhiên tại đô thị Cao Bằng là một hệ thống kỹ thuật đồng bộ, trong đó các thành phần hạ tầng, quy hoạch, quản lý rủi ro và cơ sở dữ liệu vận hành theo cơ chế tương hỗ dựa trên nền tảng dữ liệu số. Hệ thống cơ sở dữ liệu là nguồn cung cấp thông số đầu vào thiết yếu, bao gồm mô hình số độ cao độ phân giải lớn, chỉ số mua thiết kế và dữ liệu quan trắc thực địa qua thiết bị IoT. Các thông tin này là cơ sở để vận hành mô hình thủy lực nhằm xác lập bản đồ phân vùng rủi ro và xây dựng kịch bản ứng phó thiên tai. Kết quả phân tích rủi ro định lượng được tích hợp trực tiếp vào công tác quy hoạch đô thị thông qua các định hướng không gian đa chức năng và hành

lang thoát lũ tự nhiên. Trên cơ sở đó, các giải pháp hạ tầng cụ thể như hệ thống thoát nước bền vững, công viên lưu giữ nước và kỹ thuật sinh học gia cố mái dốc được triển khai nhằm thực thi các mục tiêu quy hoạch đã đề ra (Hình 5, Hình 6).



Hình 5. Bản đồ đề xuất các giải pháp NBS cho khu vực trung tâm của đô thị Cao Bằng (Nguồn: Tác giả)

Đối với đặc thù địa chất và địa hình tại đô thị Cao Bằng, sự phối hợp giữa các thành phần này tạo ra quy trình vận hành khép kín: Các công trình hạ tầng thực tế giúp giảm áp lực thủy văn bề mặt, đồng thời các thiết bị quan trắc liên tục cung cấp dữ liệu phản hồi để hiệu chỉnh mô hình dự báo và tối ưu hóa các phương án kỹ thuật trong các giai đoạn tiếp theo. Cách tiếp cận đa tầng này đảm bảo tính bền vững và tăng cường khả năng chống chịu của đô thị trước các biến động thủy văn cực đoan. Mặc dù cùng chia sẻ triết lý cốt lõi của NbS và SuDS trong việc quản lý nước bền vững, nhưng việc áp dụng các giải pháp NbS giữa vùng ĐBSCL và đô thị miền núi như Cao Bằng có sự khác biệt. Tại vùng ĐBSCL, các giải pháp SuDS tập trung chủ yếu vào khả năng thẩm thấu tại chỗ, lưu trữ tạm thời và xử lý chất lượng nước thông qua các bề mặt thấm, hồ điều hòa. Tại đô thị miền núi, thay vì chỉ tập trung vào "thấm" và "trữ" như vùng đồng bằng, các giải pháp NbS cần ưu tiên khả năng phá năng lượng dòng chảy và làm chậm nhịp lũ.



(1) Công viên ngập nước (2) Hành lang thoát lũ sinh thái
(3) Kè sinh thái kết tạo không gian trữ nước cho sông
(4) Các giải pháp SuDS quy mô nhỏ:
Mái nhà xanh, vườn thu nước mưa, hệ tự thấm

Hình 6. Minh họa các giải pháp NbS cho khu vực đô thị Cao Bằng (Nguồn: Tác giả)

3.3. Bàn luận kết quả nghiên cứu

Kết quả nghiên cứu đã thiết lập một khung định hướng đa tầng đồng bộ, đánh dấu sự chuyển dịch tư duy từ hạ tầng thoát nước bê tông hóa sang kiểm soát tại nguồn và phục hồi chu trình thủy văn tự nhiên. Việc ứng dụng mô hình số bề mặt DSM kết hợp giải đoán ảnh radar không chỉ giúp nhận diện chính xác các vùng trũng rủi ro trong địa hình lòng máng đặc thù của Cao Bằng mà còn khắc phục triệt để hạn chế về độ che phủ mây của các phương pháp viễn thám thụ động trong mùa mưa bão miền núi.

Mặc dù cùng chia sẻ triết lý NbS, nghiên cứu chỉ ra sự khác biệt chiến lược giữa các vùng địa lý đặc thù. Trong khi các giải pháp tại Đồng bằng sông Cửu Long tập trung vào khả năng thấm thấu và lưu trữ tạm thời do địa hình bằng phẳng, thì tại đô thị miền núi như Cao Bằng, trọng tâm phải là triệt tiêu năng lượng dòng chảy mặt và làm chậm nhịp lũ. Sự kế thừa kinh nghiệm từ các dự án FPP và MCRP cho thấy các nguyên lý quản trị nước tại nguồn có tính linh hoạt cao, tuy nhiên cần điều chỉnh kỹ thuật để tương thích với độ dốc lớn và rủi ro lũ quét đặc thù của khu vực phía Bắc.

Về mặt kinh tế và pháp lý, nghiên cứu khẳng định tính khả thi thực thi khi các giải pháp NbS như SuDS và Thành phố bọt biển đã được chính thức hóa trong QCVN 01:2021/BXD và Nghị quyết 111/2025/UBTVQH15. Việc triển khai không đòi hỏi các tiêu chuẩn kỹ thuật mới mà chủ yếu dựa trên việc lồng ghép vào quy hoạch chung đô thị để tối ưu hóa chi phí đầu tư dài hạn và huy động nguồn lực xã hội hóa. Cách tiếp cận này giúp giảm áp lực tài chính cho các hệ thống kè cứng đắt đỏ, đồng thời tạo ra giá trị gia tăng về cảnh quan và đa dạng sinh học thông qua việc bảo tồn các hành lang thoát lũ sinh thái.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại giới hạn do thiếu hụt chuỗi dữ liệu thủy văn thực địa để thực hiện các mô phỏng định lượng chi tiết về quy mô công trình. Bên cạnh đó, các giải pháp kỹ thuật sinh học cho sạt lở mái dốc vẫn cần những thiết kế cụ thể hơn dựa trên đặc điểm địa chất công trình phức tạp của địa phương. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc số hóa dữ liệu mưa cực đoan và quan trắc thực địa để cụ thể hóa hiệu năng của từng giải pháp, từ đó hoàn thiện quy trình thực thi thực tế tại Cao Bằng.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu khẳng định rằng việc áp dụng các giải pháp NbS, mô hình Thành phố bọt biển và SuDS là phương án khả thi để tăng cường khả năng thích ứng của đô thị Cao Bằng trước các tác động ngày càng gia tăng của biến đổi khí hậu. Thông qua việc đối chiếu kinh nghiệm thực tiễn từ vùng ĐBSCL, bài báo xác định rằng các nguyên lý quản lý nước tại nguồn và hạ tầng xanh hoàn toàn có thể chuyển đổi để phù hợp với đặc thù địa hình dốc và năng lượng dòng chảy cao tại miền núi phía Bắc. Bên cạnh đó, hiện trạng đô thị Cao Bằng đang trong tiến trình mở rộng với các khu vực dự trữ phát triển là điều kiện thuận lợi để thực hiện chuyển đổi mô hình quy hoạch. Thay vì tiếp tục duy trì hạ tầng xám thuần túy, việc chủ động lồng ghép mạng lưới hạ tầng xanh - lam vào quy hoạch phân khu và quy hoạch chi tiết ngay từ giai đoạn đầu sẽ tối ưu hóa chi phí đầu tư dài hạn, đồng thời bảo tồn các hành lang thoát lũ tự nhiên của sông Bằng và sông Hiến.

Trong phạm vi bài viết này, các đề xuất mới dừng lại ở khung định hướng và các giải pháp kỹ thuật điển hình cho quản lý nước

mặt đô thị. Mặc dù đã xác định được các vùng rủi ro và định hướng kỹ thuật, nghiên cứu vẫn còn giới hạn do thiếu hụt chuỗi dữ liệu thủy văn định lượng để thực hiện các mô phỏng thủy lực chi tiết. Bên cạnh đó, do sự phụ thuộc chặt chẽ vào các thông số địa chất công trình và tính chất phức tạp của ổn định mái dốc, bài báo chưa đưa ra các mô hình thiết kế chi tiết cho giải pháp chống sạt lở đất bằng kỹ thuật sinh học. Việc triển khai thực tế đòi hỏi các khảo sát địa chất chuyên sâu và dữ liệu quan trắc hiện trường để đảm bảo các yêu cầu về an toàn kỹ thuật. Định hướng tiếp theo cần tập trung vào việc định lượng hóa các giải pháp thông qua mô hình mô phỏng thủy văn - thủy lực dựa trên cơ sở dữ liệu số để cụ thể hóa các giải pháp NbS vào thực tiễn xây dựng tại địa phương.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SuDS, LID, BMPs, WSUD and more – *The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. Urban Water Journal, 12(7), 525–542.
- [2]. Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). *Life cycle assessment: Past, present, and future*. Environmental Science & Technology, 45(1), 90–96.
- [3]. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN.
- [4]. Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C., & Wang, H. (2017). *The sponge city program: From an innovative concept to regional implementation in China*. Nature, 4(1), 1–14.
- [5]. International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006)*. ISO.
- [6]. GIZ. (2025). *Mekong Climate Resilience Programme (MCRP) project report*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- [7]. GIZ. (2019). *Flood Proofing Programme (FPP) project report*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- [8]. European Space Agency. (2021). *Copernicus Global DEM (GLO-30) dataset documentation*. Retrieved from <https://spacedata.copernicus.eu>
- [9]. Filipponi, R., et al. (2019). *Flood monitoring via Sentinel-1 SAR imagery: A case study*. Remote Sensing, 11(13), 1533.
- [10]. Clement, J. (2020). *Terrain correction and slope masking for SAR flood mapping in mountainous regions*. Hydrology and Earth System Sciences, 24, 412–428.
- [11]. Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2020). *Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam*. Nhà xuất bản Tài nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam.
- [12]. Lê Anh Tuấn. (2019). *Quản lý tài nguyên nước bền vững, ứng phó với biến đổi khí hậu ở Đồng bằng sông Cửu Long*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [13]. World Bank. (2021). *Vietnam: Toward a safe, clean, and resilient water system*. World Bank Group.
- [14]. Hoàng Nam Bình. (2025). *Nhìn lại tình hình mưa lũ cực đoan năm 2025 và một số vấn đề tồn tại trong thiết kế thủy lực công trình giao thông*. Trường Đại học Giao thông Vận tải.