

MÔ PHỎNG TOÁN SỐ VỚI MÃ NGUỒN MỞ TELEMATAC - 2D CHO BÀI TOÁN NGẬP LŨ, THOÁT NƯỚC ĐÔ THỊ THÍCH ỨNG BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU THÀNH PHỐ CAO BẰNG

NUMERICAL SIMULATION WITH THE OPEN-SOURCE TELEMATAC-2D CODE FOR FLOODING
AND URBAN DRAINAGE ADAPTING TO CLIMATE CHANGE IN CAO BANG CITY



PGS.TS. Nguyễn Thống¹, TS. Đặng Ngọc Lợi¹, ThS. Giang Văn Tuyền¹, TS. Nguyễn Quang Trường²,
ThS. Phan Quang Hưng², TS. Hồ Tuấn Đức², ThS. Trịnh Đình Vũ²

Tóm tắt: Nghiên cứu nhằm xây dựng mô hình mô phỏng toán số phục vụ cảnh báo sớm ngập lụt cho đô thị Cao Bằng do mưa và lũ tại chỗ. Đây là đô thị đang phát triển với hệ thống thoát nước mưa đã xuống cấp và lạc hậu. Về địa hình tự nhiên, khu vực nằm trong thung lũng sông Bằng, có vị trí bất lợi về ngập khi xảy ra mưa lũ với đặc thù miền núi có cường độ tập trung nước nhanh. Hiện tượng ngập càng trở nên trầm trọng hơn trong bối cảnh biến đổi khí hậu với các trận mưa cực đoan ngày càng xảy ra thường xuyên hơn.

Mô hình toán số sử dụng trong nghiên cứu là TELEMATAC-2D, một phần mềm mã nguồn mở cho phép mô phỏng dòng chảy hai chiều theo phương ngang. Việc sử dụng mô hình mã nguồn mở là một ưu điểm quan trọng so với nhiều phần mềm thương mại trong nghiên cứu mô phỏng ngập lụt đô thị.

Kết quả mô phỏng cho thấy một số khu vực trung tâm đô thị Cao Bằng có thể xuất hiện ngập sâu, phù hợp với các số liệu quan trắc thực tế trong thời gian gần đây. Nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc xây dựng hệ thống cảnh báo sớm và quy hoạch thoát nước đô thị thích ứng với biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Telematac-2D, mã nguồn mở, lũ, ngập đô thị, thành phố Cao Bằng.

Abstract: This study develops a numerical simulation model for early warning of urban flooding in Cao Bang City caused by local rainfall and upstream flood. Cao Bang is a developing

mountainous city with an outdated and deteriorating stormwater drainage system. Geographically, the city is located in the Bang River valley, making it vulnerable to flooding during heavy rainfalls due to rapid water concentration from surrounding mountainous areas. Flood risks are further intensified by extreme weather conditions associated with climate change, with increasingly frequent heavy rainfalls.

In this study, the open-source hydrodynamic model TELEMATAC-2D is applied to simulate two-dimensional flow processes. The use of an open-source model provides significant advantages compared with proprietary software in flood simulation studies.

Simulation results indicate that several central areas of Cao Bang City may experience deep inundation during extreme rainfalls. These results are consistent with recent actual survey data. The study provides a scientific basis for developing early flood warning systems and improving urban drainage planning in adaptation to climate change.

Keywords: TELEMATAC-2D, open-source model, urban flooding, Cao Bang City.

Nhận bài ngày 26/1/2026, chỉnh sửa ngày 25/2/2026, chấp nhận đăng ngày 28/3/2026.

I. GIỚI THIỆU

Xây dựng mô hình tính toán mô phỏng ngập do mưa, lũ cho đô thị Cao Bằng được giới hạn trong phạm vi phù hợp với nghiên cứu chế độ thủy động lực dòng chảy như sau:

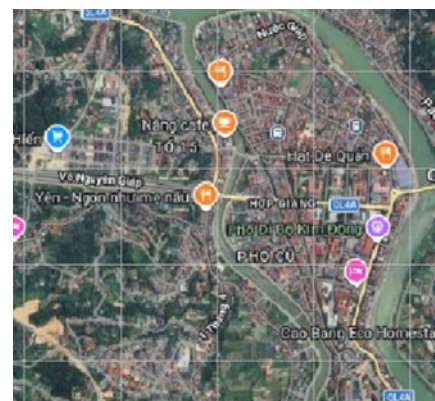
Mô hình 1: Mô phỏng ngập đô thị Cao Bằng do mưa tại chỗ

Phía Tây giới hạn bởi sông Hiến.

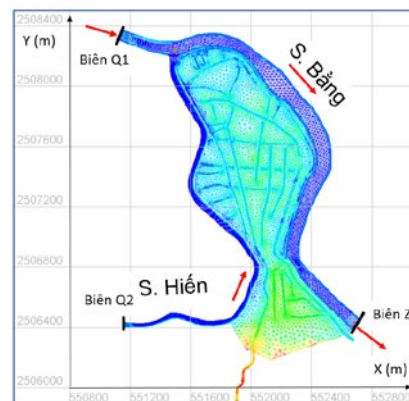
Phía Đông giới hạn bởi sông Bằng.

Diện tích mô phỏng là trung tâm Thành phố Cao Bằng (cũ) với diện tích khoảng 100ha.

Mô hình 2: Mô phỏng ngập do lũ thượng nguồn cho Thành phố Cao Bằng với diện tích lưu vực miền tính khoảng 2500 km²



Hình 1. Thành phố Cao Bằng
(Nguồn: Google Map)

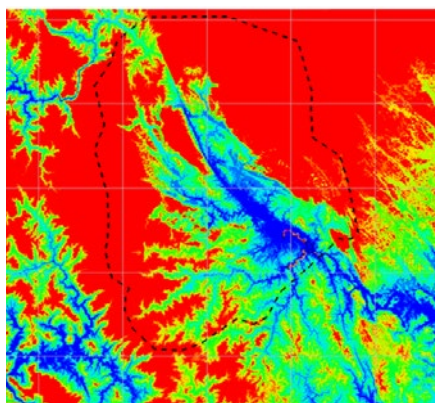


Hình 2. Mô hình 1: Lưới miền tính
(22105 phần tử tam giác phi cấu trúc)

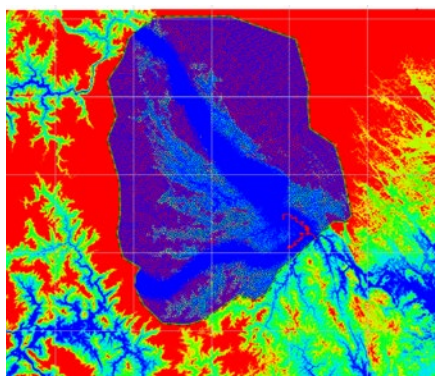
¹ Khoa Kỹ thuật Hạ tầng – Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

² Khoa Kỹ thuật Xây dựng – Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh

Email: thong.n1956@gmail.com



Hình 3. Lưu vực miền tính mô hình mô phỏng ngập đô thị Cao Bằng do lũ (Nguồn: Internet)



Hình 4. Mô hình 2: Lưới miền tính (116991 phần tử tam giác phi cấu trúc)

Mô hình 1 được xây dựng cho phép mô phỏng cảnh báo nhanh ngập đô thị Cao Bằng khi xảy ra mưa cực đoan. Kết quả cảnh báo ngập cho phép đánh giá hiện trạng vận hành thoát nước của hệ thống cống ngầm trong đô thị. Ngoài ra, mô hình xây dựng hoàn thiện còn cho phép xác định được trực thoát nước chính khu vực, đánh giá các tác động phương án quy hoạch thoát nước cho đô thị. Vị trí địa lý cho thấy đây là thành phố nằm trong thung lũng sông Bằng có địa hình bao bọc bởi 2 sông chính là sông Bằng và sông Hiến. Các nhánh sông này giữ vai trò như là trực thoát nước chính cho thành phố (cũ).

Mô hình 2 được xây dựng nhằm mục đích mô phỏng ngập do lũ thượng nguồn cho đô thị Cao Bằng. Đây sẽ là một công cụ cần thiết nhằm nghiên cứu một cách định lượng các phương án thiết kế quy hoạch bảo vệ chống lũ cho thành phố trong tương lai gần và dài hạn.

Mô hình toán số sử dụng là Telemac2D với mã nguồn mở để mô phỏng dòng chảy 2 chiều (2D) theo phương nằm



Hình 5. Lũ ngập ven bờ sông Hiến, TP. Cao Bằng 8/2024 (Nguồn: Internet)

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Giới thiệu mô hình Telemac2D

Telemac-2D là một phần mềm thủy lực dùng để mô phỏng dòng chảy 2 chiều theo phương nằm ngang (trung bình theo phương thẳng đứng) với hệ phương trình

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(h\vec{u}) = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \text{div}[h v_s \text{grad}(u)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \text{div}[h u_s \text{grad}(v)] \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = Q + v_T \Delta(T) \quad (4)$$

Trong đó: $h(m)$ – chiều sâu, u & $v(m/s)$ – thành phần vận tốc theo phương ngang x & y của vận tốc, $q(m/s)$ – lưu lượng đơn vị của nguồn, $Z_s(m)$ – cao độ mặt thoáng, $F_{x,y}(m/s^2)$ – các ngoại lực (không kể trọng lực, ví dụ lực Coriolis,...) tác dụng trên một đơn vị khối lượng chiếu theo phương ngang x & y , $v_e(m^2/s)$ – hệ số khuếch tán, $T(g/l)$ – nồng độ chất, Q – số hạng nguồn, v_T – khuếch tán chất.

Bài toán số được lập trình có thể xử lý được các dạng điều kiện biên như: Biên mực nước Z , biên lưu lượng Q , biên lưu lượng và mực nước ($Q&Z$), biên vận tốc (u,v), biên vận tốc và mực nước ($u,v&Z$) hoặc dạng biên sóng đến.

2.2. Phương pháp giải và các khả năng ứng dụng

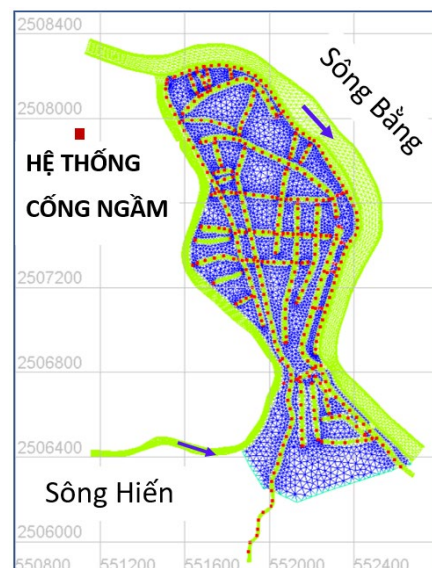
Mô hình toán số sử dụng có thể chọn với các phương pháp số khác nhau như sau: Phương pháp phần tử hữu hạn, Phương pháp thể tích hữu hạn, Phương pháp Boussinesq.

Mô hình tính toán thủy động lực Telemac2D có thể kết hợp (mô phỏng chạy đồng thời hoặc riêng lẻ) với bài toán

tính toán biến hình lòng dẫn, vận chuyển chất với module (Sisyphe, Gaia) hay với bài toán tính toán sóng vùng ven bờ biển hoặc công trình cảng (Tomawac, Artemis) hoặc bài toán mô trường với module (WaqTel). Mô hình cho phép mô phỏng các loại công trình như: Cống, Đập, Siphon, Trạm bơm, Hồ điều hòa. Khi có hiện tượng mưa trong miền tính sẽ được mô phỏng với mô hình thủy văn mưa dòng chảy SCS (The Soil Conservation Service) của Mỹ. Mô hình Telemac-2D có thể áp dụng để tính toán cho những bài toán có miền tính lớn với độ phân giải cao nhờ vào kỹ thuật lập trình tính toán song song chạy trên các hệ thống máy tính lớn (HPCC).

2.3. Mô hình toán số mã nguồn mở Telemac2D mô phỏng ngập do mưa, lũ TP. Cao bằng

Nội thị đô thị Cao Bằng là khu vực đã và đang phát triển, miền tính được xác định giới hạn bởi các nhánh sông Bằng, sông Hiến. Diện tích miền tính khoảng $1km^2$. Miền tính được mô tả bởi 22105 phần tử tam giác phi cấu trúc với lưới lớn nhất có cạnh 30m, cạnh nhỏ nhất là 3m.

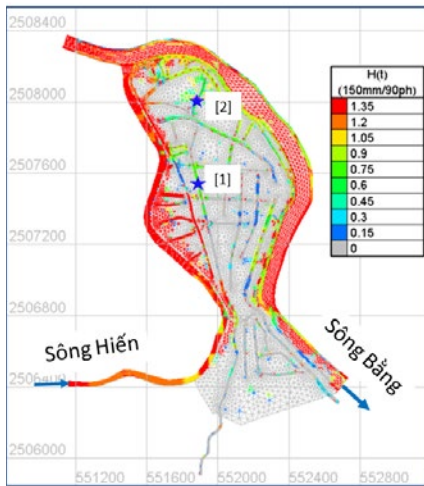


Hình 6. Hệ thống cống thoát nước dưới đường TP. Cao Bằng

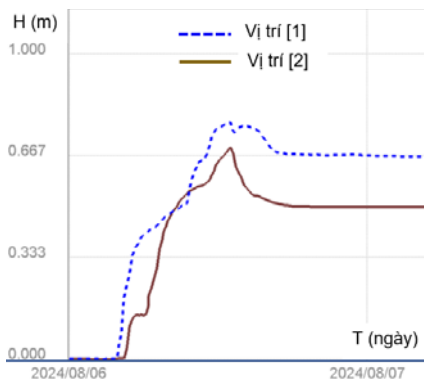
III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả với mô hình 1

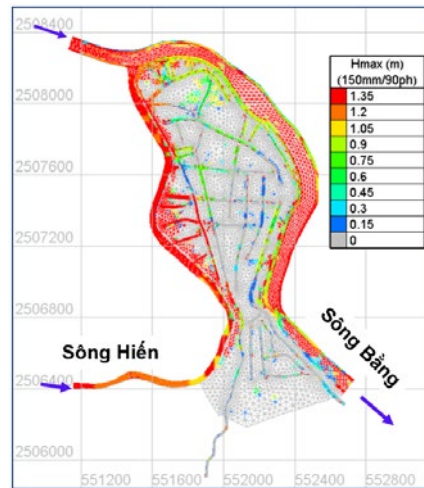
Mô phỏng ngập điển hình được thực hiện với kịch bản mưa 150mm/90ph xảy ra trên miền tính. Thời gian mô phỏng được thực hiện trong 40h. Một số đồ thị và hình ảnh sau trình bày kết quả mô phỏng.



Hình 7. Chiều sâu ngập H (m) sau khi mưa kết thúc (1h30ph)



Hình 8. Chiều sâu ngập H(t) tại một số vị trí tiêu biểu



Hình 9. Bản đồ ngập Hmax với trận mưa 150mm/90ph

Từ kết quả nêu trên có một số nhận xét sau:

⇒ Xu thế bị ngập nhiều khu vực phía Bắc TP. Cao Bang (hợp lưu sông Bằng & sông Hiến)

⇒ Phù hợp với xu thế địa hình của Thành phố (cũ) với địa hình xu thế cao về phía Nam.

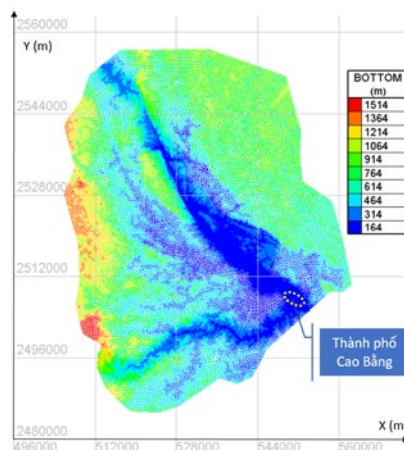
⇒ Khu vực phía Tây tiếp giáp với sông Hiến cho thấy khả năng thoát nước ra sông bất lợi (cần nghiên cứu thêm khi có số liệu địa hình tin cậy).

Nhìn chung, với hiện trạng phát triển đô thị của Cao Bang hiện tại, hiện tượng ngập cục bộ do mưa mưa trận xảy ra trên thành phố nằm trong khả năng kiểm soát của hệ thống thoát nước. Điều này được giải thích với điều kiện là cao trình mực nước trong sông Bằng, sông Hiến là không bị dâng cao do lũ thượng nguồn, nhằm đảm bảo chế độ thủy lực thoát nước ra sông thuận lợi. Cần xem xét phương án lắp đặt cửa van 1 chiều tại các vị trí cống thoát ra sông nhằm tránh hiện tượng nước từ sông chảy ngược vào thành phố khi mực nước sông dâng cao hơn mực nước thoát ra từ thành phố.

Mô hình 2:

3.2. Miền và lưới tính

Lưới tính xây dựng trên cơ sở lưu vực sông Bằng tính đến Thành phố Cao Bang (cũ) với diện tích miền tính khoảng 2340 km². Lưới tính 2D gồm 116991 phần tử tam giác phi cấu trúc, trong đó lưới miền tính cho mô hình 1 được lồng ghép như là một lưới con trong mạng lưới 2D nhằm mô phỏng hiện tượng ngập lụt thành phố Cao Bang do mưa ở thượng lưu.

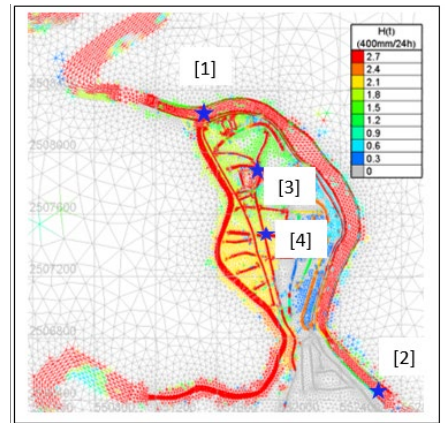


Hình 10. Lưới mô phỏng 2D cho Cao Bang (S=2340 km², 116991 phần tử tam giác phi cấu trúc)

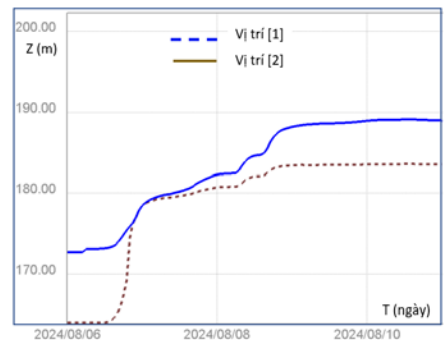
3.3. Kết quả với mô hình 2

Mô phỏng ngập đô thị Cao Bang được xem xét cho kịch bản mưa cường độ 400mm/24h. Mực nước sông Bằng tại vị trí trạm khí tượng thủy văn Cao Bang giả thiết ở mức báo động 3 (183m). Mô phỏng được thực hiện trong 5 ngày và xem xét diễn biến ngập tại các vị trí điển hình trong miền tính.

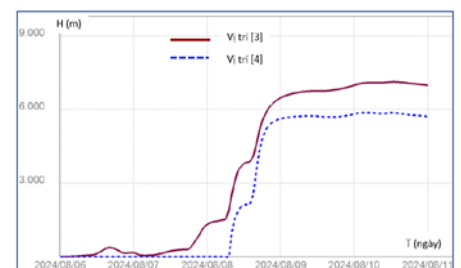
Các đồ thị và hình vẽ sau trình bày một số kết quả mô phỏng điển hình:



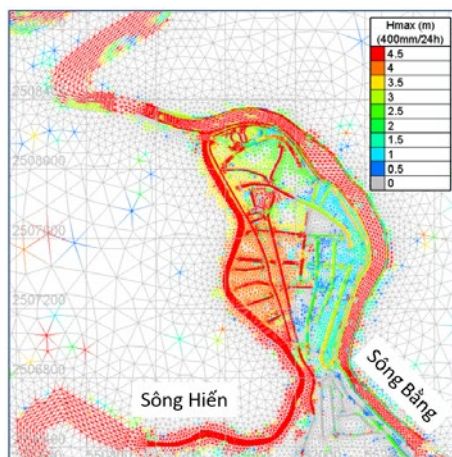
Hình 11. H(m) ngập tại các thời điểm điển hình t1, t2



Hình 12. Diễn biến mực nước Z trên sông Bằng tại vị trí [1], [2]



Hình 13. Diễn biến chiều sâu nước H tại các vị trí điển hình [3], [4] tại Cao Bang



Hình 14: Bản đồ ngập Hmax khu vực TP. Cao Bằng (cũ)

Từ các kết quả mô phỏng nêu trên có thể rút ra một số nhận xét chính sau:

⇒ Tp. Cao Bằng nằm trong thung lũng sông ⇒ Lũ tập trung và lên nhanh
⇒ Cần có cảnh báo sớm nhằm chủ động giảm thiểu rủi ro.

⇒ Xu hướng ngập nặng xuất hiện phía Bắc và khu vực phía Tây gần sông Hiến.

⇒ Với trận lũ điển hình xảy ra với giả thiết cường độ 400mm/24h nêu trên cho thấy chiều sâu ngập Hmax tại một số vị trí bất lợi có thể trên 4m.

IV. KẾT LUẬN

Mô phỏng toán số với mã nguồn mở Telemac-2D thích hợp và hiệu quả nhằm cảnh báo sớm ngập do mưa lũ cho thành phố miền núi có độ dốc địa hình lớn (đòi hỏi mô hình toán số có khả năng mô phỏng thủy lực ổn định số tốt cho dòng chảy có số Courant lớn) dưới tác động

biến đổi khí hậu cực đoan. Kết quả mô phỏng ngập do lũ, mưa tại chỗ của TP. Cao Bằng (cũ) có xu thế xảy ra ngập nặng tập trung khu vực dọc sông Hiến. Với địa hình dốc vùng núi khả năng tập trung nước rất nhanh từ các sườn núi dốc làm cho lũ lên nhanh nguy hiểm, do vậy cần có công cụ cảnh báo sớm trên cơ sở số liệu dự báo thủy văn về mưa trên lưu vực.

Đô thị Cao Bằng với vị trí địa lý đặc thù như một cù lao nằm trong thung lũng và bao bọc các nhánh sông Bằng, sông Hiến, cần có biện pháp công trình kiểm soát mực nước sông. Một trong những giải pháp công trình phù hợp xem xét là xây dựng kè dọc bờ sông với cao trình đỉnh kè thích hợp là dạng giải pháp công trình có tiềm năng phù hợp. Ngoài ra, để chủ động thoát nước cho Thành phố khi bị ngập cục bộ cần có quy hoạch các Trạm Bơm với công suất và vị trí thích hợp nhằm thực hiện bơm thoát nước động lực ra sông khi cần thiết.

Lưu ý kết quả mô phỏng trình bày nêu trên chỉ là bước đầu với các số liệu địa hình (DEM) với tỷ lệ có độ chính xác còn thấp, công trình kiến trúc, hệ thống cống thoát chưa đầy đủ, do vậy kết quả trình bày ở đây chỉ mang tính tham khảo, định hướng. Để kết quả nghiên cứu mô phỏng hiện trạng ngập do lũ, mưa tại chỗ tốt và chi tiết hơn cần phải:

⇒ Bổ sung khảo sát địa hình có tỷ lệ thích hợp cho từng giai đoạn nghiên cứu quy hoạch phát triển cho đô thị Cao Bằng.

⇒ Bổ sung số liệu về hệ thống cống thoát nước đô thị.

⇒ Bổ sung các thông tin về xây dựng, kiến trúc, hồ điều hòa (quy hoạch nếu có).

⇒ Bổ sung các số liệu quan trắc trong quá khứ để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình một cách định lượng chính xác.

Hướng phát triển tiếp theo có thể xem xét kết hợp kỹ thuật AI và kết quả mô phỏng thủy động lực của mô hình mã nguồn mở Telemac-2D mô phỏng, nhằm xây dựng công cụ cảnh báo ngập sớm do mưa, lũ cho đô thị Cao Bằng để đáp ứng nhu cầu vận hành, quản lý trong bối cảnh biến đổi khí hậu bất thường, phức tạp trên khu vực.

Nguyễn Linh (BT)

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J.-M. Hervouet (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method*. Wiley.
- [2]. L. P. Meissner (1995). *FORTAN 90*. McGraw-Hill.
- [3]. P. Lang et al. (2020). *Telemac-2D User Manual v8.0*. EDF.
- [4]. Thanh Niên (2024). *Mưa lớn kéo dài, thành phố Cao Bằng chìm trong nước*. <https://thanhnien.vn>
- [5]. Vietnamnet (2024). *Toàn cảnh trung tâm Cao Bằng ngập lụt lớn nhất 40 năm*. <https://vietnamnet.vn>
- [6]. Quy hoạch chung xây dựng thành phố Cao Bằng. <https://guland.vn>
- [7]. Nguyễn Thống, Nguyễn Quang Trưởng, Phan Quang Hưng et al. *Ứng dụng TELEMAC-2D mô phỏng hệ thống thoát nước mưa cho thành phố Cần Thơ*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Xây dựng Miền Tây.