

Ứng dụng mô hình toán trong đánh giá ổn định đường bờ sông Hậu, đoạn qua phường Long Xuyên và Bình Đức, tỉnh An Giang

Huỳnh Văn Vẽ^{1,2}, Trần Văn Tuấn^{2,*}, Lâm Tấn Phát², Huỳnh Vương Thu Minh², Trần Văn Tỷ²

¹ Công ty Cổ phần Tư vấn và Đầu tư Phát triển An Giang (ADICO)

² Đại học Cần Thơ

TỪ KHOÁ

Sạt lở bờ sông
Slope/W
Seep/W
Ổn định bờ sông
Sông Hậu
Phường Long Xuyên và Bình Đức

TÓM TẮT

Nghiên cứu này ứng dụng kết hợp hai mô hình toán MIKE 3 và GeoSlope nhằm phân tích diễn biến thủy động lực, vận chuyển bùn cát và ổn định mái dốc bờ sông. Dữ liệu đầu vào bao gồm thông tin về thủy văn, địa hình, địa chất và kế thừa kết quả hiệu chỉnh từ mô hình MIKE 11. Trên cơ sở đó, mô hình MIKE 3 được sử dụng để mô phỏng sự biến đổi hình thái lòng dẫn trong các điều kiện mùa khô và mùa lũ. Đồng thời, mô hình GeoSlope được áp dụng để kiểm tra độ ổn định mái bờ sông với các kịch bản có và không có giải pháp công trình. Kết quả nghiên cứu cho thấy khu vực nghiên cứu có nguy cơ sạt lở cao trong điều kiện không có công trình bảo vệ, đặc biệt trong mùa kiệt khi mực nước xuống thấp. Việc áp dụng các giải pháp công trình giúp nâng cao đáng kể hệ số ổn định mái dốc, đảm bảo an toàn và giảm thiểu rủi ro sạt lở. Nghiên cứu khẳng định hiệu quả và tính khả thi của việc kết hợp mô hình MIKE – GeoSlope trong dự báo, đánh giá và đề xuất giải pháp bảo vệ bờ sông. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học phục vụ quản lý rủi ro, quy hoạch không gian ven sông và phát triển bền vững đô thị ven sông tại khu vực phường Long Xuyên và Bình Đức, tỉnh An Giang.

KEYWORDS

Riverbank erosion
Slope/W
Seep/W
Riverbank stability
Bassac River
Long Xuyen and Binh Duc wards

ABSTRACT

This research focuses on the integrated application of the MIKE 3 and GeoSlope mathematical models to analyze hydrodynamic processes, sediment transport, and riverbank stability. Input data include hydrological, topographic and geological data, and inherited calibration results from the MIKE 11 simulation. Based on these datasets, the MIKE 3 model was employed to simulate channel morphological changes under both dry and flood season conditions. In addition, the GeoSlope model was applied to evaluate riverbank slope stability under different scenarios with and without structural protection measures. The results indicate that the study area is exposed to a high risk of riverbank failure under unprotected conditions, particularly during the dry season when water levels are significantly lowered. The implementation of structural countermeasures substantially increases the riverbank safety factor, thereby enhancing stability and reducing erosion risk. The study confirms the effectiveness and practical feasibility of integrating MIKE and GeoSlope models for predicting river channel changes, assessing riverbank stability, and proposing appropriate riverbank protection solutions. The findings provide a robust scientific basis for risk management, riverside spatial planning, and the sustainable development of urban river corridors in Long Xuyen and Binh Duc wards, An Giang Province.

1. Giới thiệu

Sạt lở bờ sông hiện nay là một trong những thách thức môi trường và kỹ thuật nghiêm trọng tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), nơi có hệ thống sông ngòi và kênh rạch phát triển mạnh, nền địa chất yếu và chịu tác động tổng hợp của cả yếu tố tự nhiên và hoạt động nhân sinh. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng quá trình xói lở gia tăng tại châu thổ sông Mê Kông có mối liên hệ chặt chẽ với sự suy giảm nguồn phù sa, biến đổi chế độ dòng chảy và các hoạt động khai thác tài nguyên làm thay đổi cân bằng bồi xói tự nhiên của hệ thống sông [1-

3]. Sự mất cân bằng này đặc biệt rõ nét tại các đoạn sông chính và khu vực chuyển tiếp giữa sông lớn và hệ thống kênh rạch nội đồng, nơi hình thái lòng dẫn có xu hướng biến đổi nhanh theo thời gian [4-6].

Tại Việt Nam, sạt lở bờ sông không chỉ tập trung trên các tuyến sông lớn mà còn lan rộng vào các kênh rạch nội đồng, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến đất ở, đất sản xuất, hệ thống giao thông và công trình hạ tầng ven sông. Nhiều nghiên cứu trong nước đã ghi nhận rằng hiện tượng mất ổn định bờ sông thường liên quan đến đặc điểm địa chất yếu, cấu trúc đất bão hòa nước, cũng như sự thay đổi đột ngột mực nước sông trong các giai đoạn chuyển mùa [2, 4, 7]. Đặc biệt tại tỉnh

*Liên hệ tác giả: tvantuan@ctu.edu.vn

Nhận ngày 11/01/2026, sửa xong ngày 24/01/2026, chấp nhận đăng ngày 26/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1220>

đầu nguồn như An Giang, tần suất và quy mô các điểm sạt lở có xu hướng gia tăng, cho thấy nhu cầu cấp thiết phải có các công cụ đánh giá và quản lý mang tính tổng hợp hơn [8, 9].

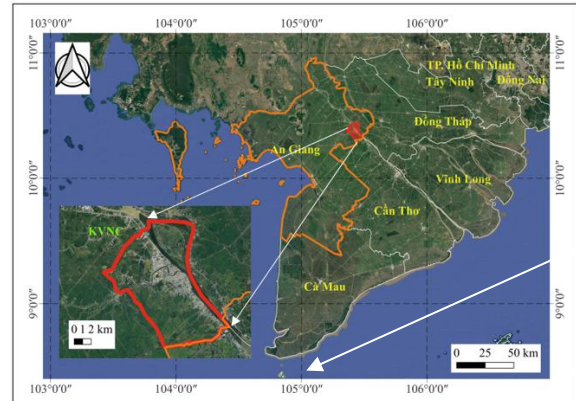
Song song với các khảo sát thực địa, mô hình toán thủy lực và hình thái lòng dẫn đã được ứng dụng rộng rãi nhằm phân tích diễn biến dòng chảy và quá trình vận chuyển bùn cát trong hệ thống sông. Các mô hình dựa trên nền tảng MIKE cho phép mô phỏng chi tiết trường dòng chảy, phân bố lưu tốc và ứng suất đáy, qua đó hỗ trợ nhận diện các khu vực có nguy cơ xói lở cao [10, 11]. Nhiều nghiên cứu ứng dụng tại lưu vực sông Mê Kông và các hệ thống sông ở Việt Nam cho thấy mô hình hai chiều và ba chiều mang lại ưu thế rõ rệt so với mô hình một chiều trong việc mô tả không gian dòng chảy phức tạp và biến động hình thái lòng dẫn [12].

Tuy nhiên, các mô hình thủy lực và hình thái lòng dẫn chủ yếu tập trung vào động lực dòng chảy và quá trình bồi xói đáy, trong khi chưa phản ánh đầy đủ các cơ chế mất ổn định bờ sông liên quan đến đặc tính cơ học của đất và điều kiện thấm trong khối đất bờ. Trên thực tế, nhiều sự cố sạt lở nghiêm trọng được ghi nhận xảy ra trong điều kiện lưu tốc không lớn, đặc biệt trong giai đoạn mực nước sông hạ thấp nhanh sau lũ, làm gia tăng chênh lệch áp lực nước trong đất và kích hoạt quá trình trượt bờ [2, 5, 9]. Điều này cho thấy việc phân tích và đánh giá ổn định bờ sông cần được tiếp cận theo hướng tích hợp, kết hợp giữa thủy lực dòng chảy và ổn định địa kỹ thuật của mái bờ.

Khu vực sông Hậu và vùng Tứ Giác Long Xuyên chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy thượng nguồn, chế độ lũ kiệt theo mùa và các hoạt động can thiệp công trình như đê bao, chỉnh trị dòng chảy và khai thác lòng dẫn. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy rằng sự thay đổi chế độ dòng chảy và vận hành công trình có thể làm biến đổi đáng kể đặc trưng thủy lực và hình thái lòng dẫn trong khu vực, từ đó tác động gián tiếp đến trạng thái ổn định của bờ sông [13, 14]. Ngoài ra, sự thay đổi mực nước theo các kịch bản vận hành công trình cũng được ghi nhận là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến điều kiện thấm và ổn định bờ [13].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu tiếp cận từ các góc độ khác nhau, mối liên hệ định lượng giữa diễn biến thủy động lực, vận chuyển bùn cát và cơ chế mất ổn định bờ sông tại đoạn sông Hậu qua tỉnh An Giang vẫn chưa được làm rõ một cách toàn diện [5-7, 9, 14]. Đặc biệt, các nghiên cứu tích hợp đồng thời mô hình thủy động lực ba chiều với phân tích ổn định bờ sông vẫn còn hạn chế, trong khi đây là hướng tiếp cận có tiềm năng cao trong việc giải thích cơ chế sạt lở và hỗ trợ đề xuất giải pháp quản lý hiệu quả hơn.

Xuất phát từ các khoảng trống nghiên cứu nêu trên, nghiên cứu này tập trung kết hợp mô hình thủy động lực ba chiều MIKE 3 với phân tích ổn định bờ sông nhằm đánh giá một cách toàn diện diễn biến dòng chảy, bồi xói và nguy cơ sạt lở tại khu vực nghiên cứu (Hình 1). Cách tiếp cận tích hợp này cho phép liên kết kết quả mô phỏng thủy lực với các đặc trưng mất ổn định bờ sông, qua đó góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho việc nhận diện khu vực có nguy cơ cao và hỗ trợ đề xuất các giải pháp quản lý, bảo vệ bờ sông phù hợp với điều kiện thực tế của ĐBSCL.



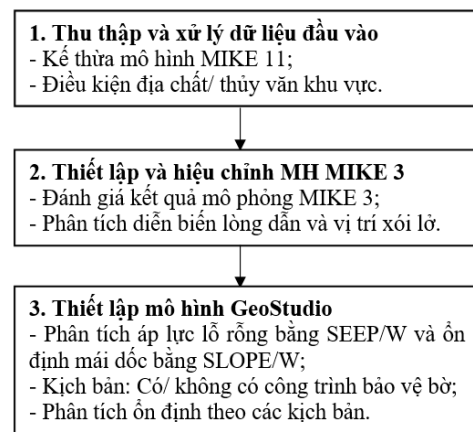
Hình 1. Khu vực nghiên cứu.

2. Phương pháp nghiên cứu

Sơ đồ các bước thực hiện nghiên cứu được trình bày trên Hình 2. Chi tiết các bước như sau:

2.1. Kế thừa mô hình thủy lực

- *Mô hình MIKE 11 cho hệ thống sông*: Toàn bộ hệ thống sông – kênh được mô hình hóa trong MIKE 11. Mạng lưới sông, rạch, kênh và mương được biểu diễn bằng 6.890 mặt cắt; các tuyến sông, kênh và rạch được số hóa gồm 1.415 nhánh. Mô hình được hiệu chỉnh theo các số liệu thực đo vào các tháng mùa lũ từ tháng 7-11 năm 2000 và kiểm định với chuỗi số liệu thực đo vào năm 2011 và 2020 [15]. Thời gian mô phỏng: 7-11/2000: hiệu chỉnh mực nước; 7-12/2011: kiểm định mực nước và hiệu chỉnh bùn cát; 01-7/2020: kiểm định mực nước (Kết quả được kế thừa từ Báo cáo lưu hành nội bộ của Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi, 2020).



Hình 2. Trình tự các bước nghiên cứu.

- *Kế thừa kết quả hiệu chỉnh mô hình vận chuyển bùn cát trên sông chính*: Mô hình mô phỏng vận chuyển bùn cát chỉ bao gồm các sông chính. Phạm vi mô hình cũng tương tự như mô hình MIKE 11 ở trên:

bắt đầu từ Kratie đến các cửa sông, bao gồm cả biển hồ Tonle Sap. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mô hình cho thấy mô hình mô phỏng khá chính xác tải lượng bùn cát tại các trạm Tân Châu, Châu Đốc, Vàm Nao, và Cần Thơ. Tại trạm Mỹ Thuận, kết quả mô phỏng trong mùa lũ 2010 và 2011 là khá phù hợp với số liệu thực đo, riêng trong năm 2009 có xu thế nhỏ hơn số liệu thực đo. Các kết quả hiệu chỉnh và kiểm định trên cũng cho thấy mô hình có thể mô phỏng tải lượng bùn cát với độ tin cậy chấp nhận được (Kết quả được kế thừa từ Báo cáo lưu hành nội bộ của Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi, 2020).

2.2. Mô hình MIKE 3

MIKE 3 là một trong những mô hình toán thủy lực tiên tiến do Viện Thủy lực Đan Mạch (DHI) phát triển, cho phép mô phỏng dòng chảy ba chiều (3D) trong môi trường thủy văn phức tạp như vùng cửa sông, ven biển, hồ, và sông ngòi có tương tác tầng đứng. Mô hình được xây dựng trên cơ sở giải hệ phương trình Navier-Stokes dạng rút gọn (phương trình Reynolds trung bình), tích hợp với các phương trình liên quan đến vận chuyển bùn cát, chất ô nhiễm và biến đổi hình thái đáy sông. Phần cốt lõi của MIKE 3 là hệ phương trình Navier-Stokes được đơn giản hóa theo giả thiết chất lỏng không nén và biến thiên chậm, bao gồm:

- Phương trình liên tục (bảo toàn khối lượng):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

- Phương trình động lượng theo ba phương:

Phương trình động lượng theo phương x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (2)$$

Phương trình động lượng theo phương y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \quad (3)$$

Phương trình động lượng theo phương z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (4)$$

Trong đó: u, v, w lần lượt là các vận tốc dòng chảy theo các phương x, y và z (m/s); p là áp suất (kN/m²); ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m³); ν là hệ số khuếch tán động học (m²/s); và F_x, F_y, F_z lần lượt là các thành phần của lực tác dụng theo các phương x, y và z (m/s²).

2.2.1. Vận chuyển bùn cát lơ lửng

MIKE 3 mô phỏng quá trình vận chuyển bùn cát lơ lửng và bùn cát đáy, dựa trên phương trình vận chuyển bùn sét:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \nabla \cdot (D \nabla C) + S \quad (5)$$

Trong đó: C là nồng độ bùn cát lơ lửng (kg/m³); D là hệ số khuếch tán (hay hệ số pha trộn) bùn cát (m²/s), phản ánh quá trình lan truyền bùn cát do khuếch tán/pha trộn trong dòng chảy; S là hạng nguồn-bồn (source-sink), đại diện cho các quá trình lắng đọng và xói lở bùn cát trong cột nước, có đơn vị kg/(m³s) (hoặc kg·m⁻³·s⁻¹).

Vận chuyển cát: tải đáy (bed load) được ước tính theo công thức Meyer-Peter & Müller (1948) [16]; phân bố nồng độ bùn cát lơ lửng theo chiều sâu được mô tả theo Rouse (1937) [17].

2.2.2. Thiết lập mạng lưới và phân tầng

Trong mô hình MIKE 3, không gian tính toán được xây dựng bằng cách kết hợp giữa lưới hai chiều theo mặt phẳng ngang (x, y) và phân tầng theo chiều đứng (z). Ngoài ra, các số liệu bùn cát (bao gồm cả số liệu thành phần hạt bùn cát đáy sông) trên hệ thống sông Hậu được kế thừa từ Dự án chỉnh trị dòng chảy nhằm hạn chế sạt lở, bảo vệ đô thị thành phố Long Xuyên (nay là phường Long Xuyên và Bình Đức) thích ứng với biến đổi khí hậu [15] để phân tích đánh giá. Kết quả bản đồ lưới (Mesh) địa hình vùng nghiên cứu được trình bày trên Hình 3.

2.3. Mô hình Slope/W – Seep/W

Slope/W có khả năng kết nối trực tiếp với Seep/W để phân tích ổn định trong điều kiện dòng thấm không ổn định, phản ánh chính xác ảnh hưởng của mực nước biến đổi và áp lực nước đến trạng thái an toàn của mái dốc. Quy trình tính toán và mô phỏng được trình bày trên Hình 4.

- Seep/W giải phương trình vi phân riêng phần mô tả dòng chảy nước xuyên qua môi trường thấm:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

Trong đó: H là cột nước tổng cộng (m); k_x, k_y lần lượt là hệ số thấm bão hòa theo phương x và y (m/s); Q là đại lượng dòng chảy (lưu lượng) tức thời bổ sung vào hoặc thoát ra khỏi hệ thống (m³/s); và θ là độ ẩm thể tích, không thứ nguyên (có thể biểu diễn m³/m³ và t là thời gian (s)).

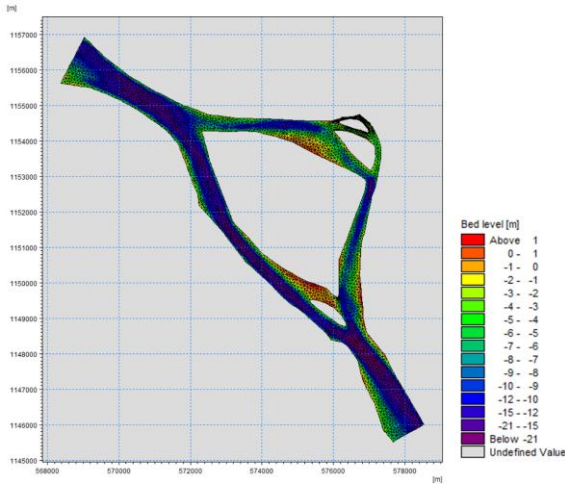
Phương trình này cho phép Seep/W phân tích cả dòng thấm ổn định (steady-state) và không ổn định (transient). Đối với dòng thấm ổn định, thành phần $\partial \theta / \partial t = 0$, đơn giản hóa phương trình. Kết quả từ Seep/W được dùng làm đầu vào cho Slope/W để phân tích ổn định mái dốc.

- Slope/W dựa trên phương pháp giới hạn cân bằng (LEM), tính toán hệ số ổn định (FS - Factor of Safety) là tỷ số giữa lực chống trượt và lực gây trượt. Công thức tổng quát (phương pháp Ordinary):

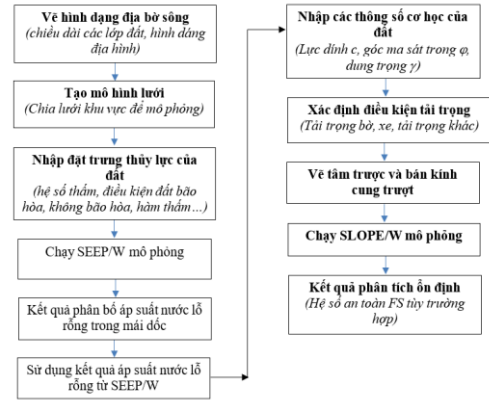
$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i l_i + ((W_i + Q_i) \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \varphi'_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \sin \alpha_i}$$

Trong đó: FS là hệ số an toàn; c'_i là lực dính (kN/m²); φ'_i là góc ma sát trong hiệu dụng (độ); u_i là áp lực nước lỗ rỗng tại mặt trượt

(kPa); l_i là chiều dài hoặc đoạn mặt trượt thứ i (m); α_i là góc nghiêng của mặt trượt tại lát cắt so với phương ngang (độ); W_i là trọng lượng lát cắt (kN/m); Q_i là tải trọng ngoài tác dụng lên lát cắt (kN/m)



Hình 3. Bản đồ lưới Mesh địa hình vùng nghiên cứu.



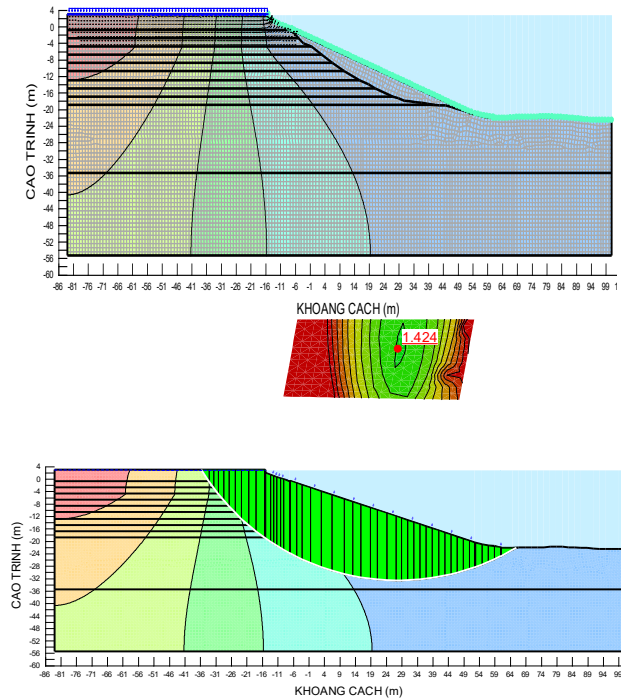
Hình 4. Mô hình Seep/W và Slope/W.

2.4. Xây dựng kịch bản

Nghiên cứu xây dựng bốn kịch bản có xem xét đến các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định được trình bày trong Bảng 1 và quá trình mô phỏng được minh họa trong Hình 5.

Bảng 1. Các kịch bản tính toán.

Kịch bản (KB)	Mô tả
Kịch bản 1a	Địa hình theo hiện trạng, chưa có công trình, mực nước thay đổi theo đặc trưng mùa kiệt.
Kịch bản 1b	Địa hình theo hiện trạng, có công trình, mực nước thay đổi theo đặc trưng mùa kiệt.
Kịch bản 2a	Địa hình theo hiện trạng, chưa có công trình, mực nước thay đổi theo đặc trưng mùa lũ.
Kịch bản 2b	Địa hình theo hiện trạng, có công trình, mực nước thay đổi theo đặc trưng mùa lũ.

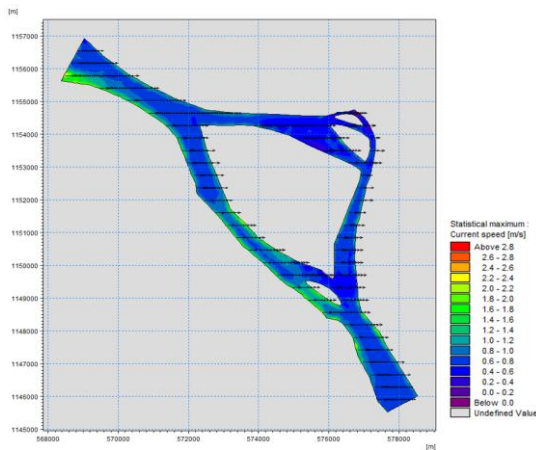


Hình 5. Minh họa mô phỏng trong mô hình Seep/W và Slope/W.

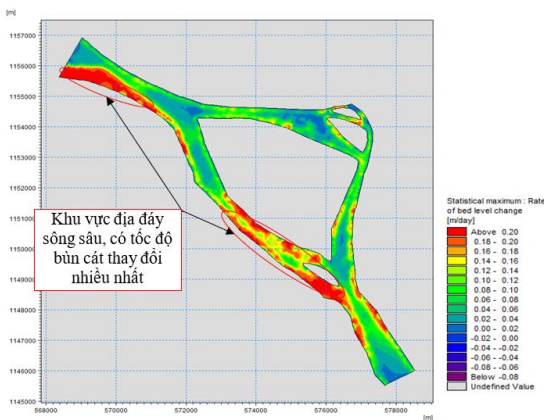
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô hình MIKE 3

3.1.1. Kết quả thủy lực và bùn cát mô phỏng đại diện trong mùa kiệt (năm 2020)



Hình 6. Lưu tốc tức thời lớn nhất theo KB hiện trạng mùa khô.



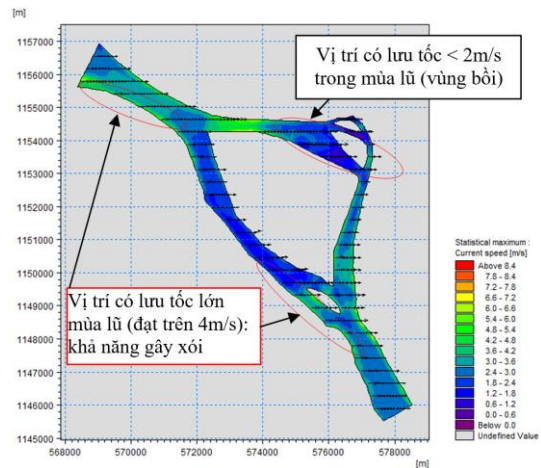
Hình 7. Diễn biến sự thay đổi cao trình bùn cát lòng dẫn nhất trong ngày theo KB hiện trạng mùa khô.

Kết quả này được trình bày trong các Hình 6 và 7. Từ Hình 6 cho thấy kết quả mô phỏng lưu tốc lớn nhất trong mùa kiệt phân bố không đồng đều theo không gian. Giá trị lưu tốc chủ yếu dao động trong khoảng 0,2–0,6 m/s, nhưng tại các đoạn uốn cong hoặc thu hẹp lòng sông, lưu tốc có thể đạt tới 0,8–1,0 m/s. Các khu vực tốc độ cao tập trung ở bờ phải đoạn qua phường Mỹ Bình và Bình Đức (nay là thuộc phường Long Xuyên và phường Bình Đức), phản ánh tác động của hình thái uốn khúc của lòng sông kết hợp với cơ hẹp lòng dẫn, làm gia tăng lưu tốc cục bộ và tiềm ẩn nguy cơ xói lở. Trong khi đó, bờ trái có tốc độ dòng chảy tương đối ổn định và thấp hơn.

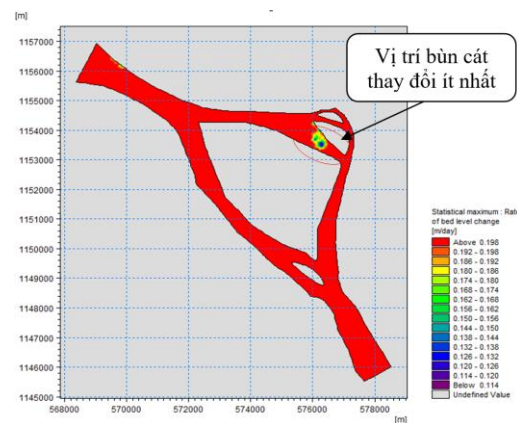
Từ Hình 7 cho thấy phân bố thay đổi cao trình đáy trong mùa kiệt cho thấy hiện tượng bồi và xói vẫn diễn ra mặc dù lưu lượng thấp. Giá trị thay đổi lớn nhất đạt $\pm 0,1-0,2$ m/ngày, tập trung tại các đoạn

cong và sát bờ phải, trong khi vùng giữa dòng và bờ trái có xu hướng bồi nhẹ. Kết quả này cho thấy sự phù hợp với quy luật vận chuyển bùn cát: vùng có lưu tốc cao thường xảy ra xói, trong khi vùng nước tĩnh hoặc vận tốc nhỏ dễ tích tụ trầm tích.

3.1.2. Kết quả thủy lực và bùn cát mô phỏng năm lũ điển hình (năm 2011)



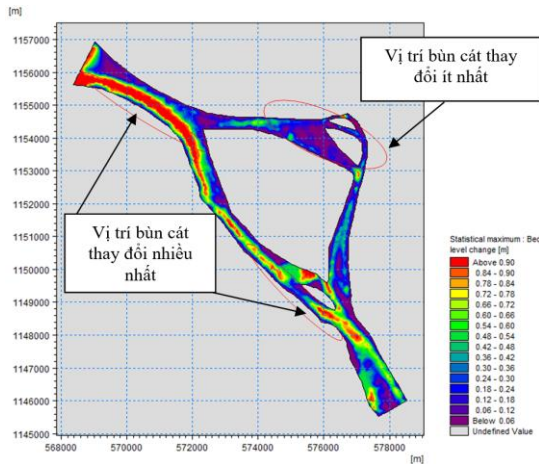
Hình 8. Lưu tốc tức thời lớn nhất theo KB hiện trạng mùa lũ.



Hình 9. Sự thay đổi bùn cát lớn nhất trong 1 ngày theo KB mùa lũ.

Kết quả mô phỏng được trình bày đại diện trong các Hình 8, 9 và 10. Từ Hình 8 cho thấy: trong mùa lũ, lưu tốc tăng mạnh trên toàn vùng nghiên cứu, với nhiều khu vực đạt giá trị từ 2,5–4,0 m/s. Tại các khúc uốn và các đoạn co hẹp lòng dẫn, lưu tốc đạt giá trị lớn nhất; đồng thời, sự đổi hướng đột ngột của dòng chảy có thể hình thành vùng xoáy cục bộ. Lưu tốc lớn làm tăng ứng suất đáy, kích thích vận chuyển bùn cát và gây xói mạnh, đặc biệt ở các điểm chân bờ phải. Hình 9 thể hiện kết quả cho thấy biến đổi nồng độ bùn cát lớn nhất trong một ngày tập trung ở các đoạn cong và nơi có lưu tốc cao, đạt $\pm 0,15-0,3$ kg/m³/ngày. Các dòng xoáy tạo điều kiện huy động trầm tích đáy, làm gia tăng vận chuyển lơ lửng, nhất là vào thời điểm đỉnh lũ. Hình 10 cho thấy sự thay đổi cao trình đáy lòng dẫn trong mùa lũ thể hiện mức xói lở mạnh tại

hiều vị trí, đặc biệt là bờ phải đoạn qua phường Long Xuyên và phường Bình Đức, với giá trị thay đổi âm lớn hơn -0,2 m/ngày. Một số khu vực khác cho thấy xu hướng bồi nhẹ ở bờ đối diện, phản ánh quá trình dịch chuyển ngang của dòng chính.



Hình 10. Sự thay đổi đáy lòng dẫn lớn nhất theo KB hiện trạng mùa lũ.

Như vậy, từ kết quả mô phỏng MIKE 3 cho thấy: (1) Trong mùa kiệt, mặc dù lưu tốc nhỏ, hiện tượng bồi – xói vẫn diễn ra, tập trung ở các đoạn cong và sát bờ phải; (2) Trong mùa lũ, lưu tốc và năng lực vận chuyển bùn cát tăng mạnh, đặc biệt tại các đoạn co hẹp lòng dẫn hoặc khúc uốn, nơi dòng chảy đổi hướng và tập trung năng lượng, làm gia tăng nguy cơ xói lở bờ; và (3) Các khu vực xói lở mạnh trùng khớp với phân bố lưu tốc cao và biến động lớn về cao trình đáy, cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa thủy động lực và biến đổi hình thái lòng dẫn. So sánh hai mùa cho thấy sự khác biệt về cơ chế và mức độ tác động: mùa kiệt mặc dù có lưu tốc nhỏ hơn nhưng khả năng mất ổn định cục bộ do xói vẫn tồn tại do ảnh hưởng hình học; mùa lũ có độ hoạt động mạnh hơn rõ ràng ở cả lưu tốc và vận chuyển bùn cát, dẫn đến thay đổi hình thái nhanh và tiềm ẩn xói rộng. Việc xác định các “điểm nóng” xói lở và thay đổi cao trình từ mô hình MIKE 3 cung cấp cơ sở định hướng thiết kế vị trí triển khai các giải pháp bảo vệ bờ, đồng thời là đầu vào không gian cho mô hình ổn định Slope/W.

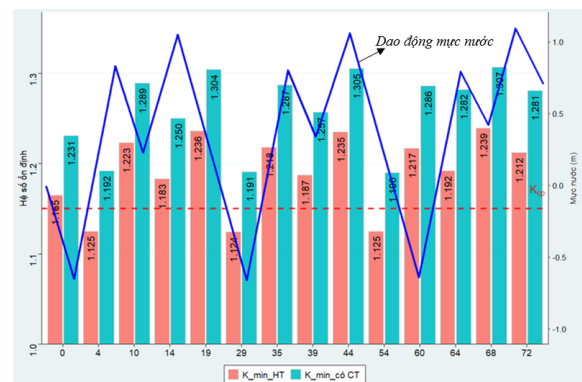
3.2. Kết quả mô hình ổn định

3.2.1. Mùa kiệt

Kết quả mô phỏng ổn định theo các kịch bản tương ứng với mực nước mùa kiệt, trường hợp chưa và có giải pháp bảo vệ bờ sông được trình bày trong Hình 11.

Từ Hình 11 có thể thấy hệ số ổn định phụ thuộc rõ rệt vào biến động mực nước trong điều kiện chưa có giải pháp công trình. Cụ thể, tại các thời điểm mực nước xuống thấp, hệ số ổn định nhỏ nhất (F_S hay K_{min} trên hình) có xu hướng giảm đáng kể; nhiều thời điểm $K_{min} < 1,15$ (ngưỡng yêu cầu tối thiểu để đảm bảo ổn định mái). Điều này cho thấy mái dốc rơi vào trạng thái kém ổn định, nguy cơ xảy ra trượt sụt cao. Nguyên nhân chủ yếu là do chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng giữa

phía trong và phía ngoài mái tăng mạnh khi mực nước sông rút, làm suy giảm lực chống trượt tự nhiên của mái dốc. Ngược lại, khi mực nước tăng (giai đoạn triều dâng), áp lực nước phía sông tác động lên mái giúp giảm chênh lệch áp suất, từ đó hệ số ổn định được cải thiện và có thể vượt ngưỡng an toàn. Tuy nhiên, dao động mực nước trong ngày khiến mái dốc liên tục thay đổi trạng thái ứng suất, có thể gây suy giảm dần sức kháng cắt của đất và làm tăng nguy cơ trượt sụt lặp lại. Vì vậy, có thể kết luận rằng trong điều kiện không có giải pháp công trình bảo vệ, mái dốc bờ sông trong mùa kiệt có nguy cơ mất ổn định đáng kể tại các thời điểm mực nước thấp. Đây là cơ sở thực tiễn để xem xét và đề xuất các giải pháp gia cố, bảo vệ bờ nhằm đảm bảo ổn định lâu dài cho khu vực nghiên cứu



(K_{min_HT} : Hệ số ổn định khi chưa có công trình; $K_{min_có CT}$: Hệ số ổn định khi có công trình; K_{cp} : Ngưỡng an toàn tối thiểu)

Hình 11. Kết quả mô phỏng Kịch bản 1a và 1b.

Ngược lại, khi có giải pháp công trình, tại mọi thời điểm trong chu kỳ triều, hệ số ổn định nhỏ nhất K_{min} luôn duy trì ở mức cao và tương đối ổn định, dao động trong khoảng 1,20–1,31, và lớn hơn ngưỡng an toàn tối thiểu ($K_{cp} \geq 1,15$). Sự cải thiện này cho thấy các giải pháp công trình bảo vệ bờ sông (như mái kè, rọ đá hoặc tường chắn) phát huy hiệu quả rõ rệt, đặc biệt ở các khía cạnh: (1) giảm ảnh hưởng của biến động mực nước đến áp suất nước lỗ rỗng trong mái dốc; (2) hạn chế xói chân mái, góp phần duy trì ổn định hình thái mái khi mực nước rút nhanh; (3) tăng cường khả năng chống trượt thông qua gia cố vật liệu và cải thiện điều kiện biên cơ học của khối đất. Như vậy, có thể kết luận rằng việc áp dụng các biện pháp công trình là cần thiết và hiệu quả nhằm đảm bảo an toàn cho các đoạn bờ sông có nguy cơ sụt lở cao, đặc biệt trong các giai đoạn mực nước biến động mạnh theo triều và theo mùa (mùa kiệt, mùa lũ).

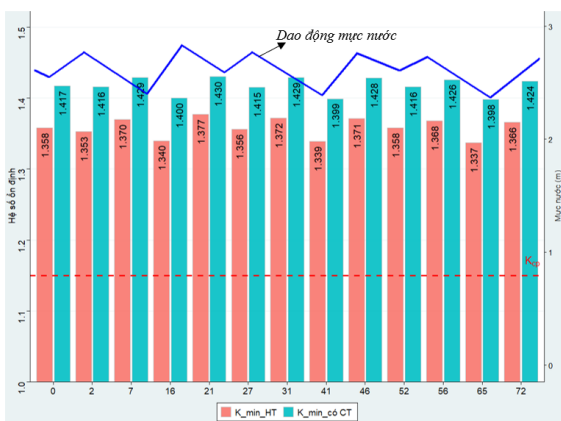
3.2.1. Mùa lũ

Kết quả mô phỏng ổn định theo các kịch bản tương ứng với mực nước mùa lũ, trong hai trường hợp chưa có và có giải pháp bảo vệ bờ sông, được trình bày trong Hình 12. Có thể nhận thấy rằng, trong suốt thời gian mô phỏng: (1) hệ số ổn định ở cả hai trường hợp đều lớn hơn ngưỡng yêu cầu ($K_{cp} = 1,15$), cho thấy mái dốc duy trì trạng thái ổn định

trong toàn bộ thời gian mùa lũ; (2) ở trường hợp chưa có giải pháp công trình, hệ số ổn định dao động quanh mức 1,33–1,37; và (3) khi áp dụng giải pháp công trình, hệ số ổn định tăng lên rõ rệt, dao động trong khoảng 1,40–1,43, thể hiện tác động tích cực của biện pháp kỹ thuật trong việc tăng cường khả năng chống trượt và bảo vệ chân mái.

Ngoài ra, trong mùa lũ, do mực nước sông duy trì ở mức cao và biên độ dao động triều không lớn, áp lực nước phía sông tác động lên mái dốc góp phần làm giảm chênh lệch áp suất và áp lực nước lỗ rỗng trong khối đất. Vì vậy, điều kiện ổn định có xu hướng được duy trì tốt ngay cả khi chưa có biện pháp bảo vệ. Tuy nhiên, việc bổ sung giải pháp công trình vẫn có vai trò quan trọng trong việc nâng cao mức độ an toàn ổn định, đặc biệt tại các vị trí địa chất – địa hình bất lợi hoặc nơi dòng chảy phức tạp. Do đó, có thể khẳng định rằng giải pháp công trình không chỉ cần thiết trong mùa kiệt mà còn góp phần củng cố ổn định trong mùa lũ, đảm bảo an toàn bờ sông trong điều kiện biến động thủy văn bất thường.

Như vậy, kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ ổn định của mái dốc bờ sông giữa các điều kiện thời tiết (mùa kiệt, mùa lũ) và hiện trạng có hoặc không có giải pháp công trình bảo vệ bờ.



(K_{min_HT} : Hệ số ổn định khi chưa có công trình; $K_{min_có CT}$: Hệ số ổn định khi có công trình; K_p : Ngưỡng an toàn tối thiểu)

Hình 12. Kết quả mô phỏng Kịch bản 2a và 2b.

3.3. Thảo luận

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

- Trong mùa kiệt – trường hợp chưa có công trình: Khi mực nước sông xuống thấp, mái dốc bờ sông chịu ảnh hưởng lớn bởi sự chênh lệch áp suất giữa nước trong khối đất và nước mặt sông. Kết quả tính toán cho thấy hệ số ổn định nhỏ nhất K_{min} tại nhiều thời điểm không đạt yêu cầu, do chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng tăng mạnh làm suy giảm độ ổn định mái; K_{min} chỉ dao động trong khoảng 0,98–1,10, thấp hơn ngưỡng an toàn. Điều này cho thấy mái dốc ở trạng thái kém ổn định, nguy cơ sạt lở cao, đặc biệt trong điều kiện nền đất yếu và độ bão hòa cao như tại khu vực nghiên cứu.

- Trong mùa kiệt – trường hợp có công trình: Việc áp dụng các giải pháp công trình (như gia cố mái kè, rọ đá hoặc tường chắn) đã nâng

cao đáng kể độ ổn định mái dốc. Hệ số K_{min} trong các tình huống mô phỏng đều lớn hơn ngưỡng an toàn, dao động trong khoảng 1,19–1,31. Các thời điểm bất lợi trong trường hợp không có công trình (ví dụ : tại thời điểm 4:00 ngày 25/5/2020 và 6:00 ngày 27/5/2020) đã được cải thiện rõ rệt (K_{min} duy trì lớn hơn K_p tại mọi thời điểm trong ngày). Kết quả này cho thấy hiệu quả rõ rệt của các giải pháp công trình trong việc nâng cao mức độ an toàn ổn định mái, góp phần ổn định trạng thái ứng suất của mái dốc, hạn chế thấm và giảm khả năng hình thành các mặt trượt tiềm năng.

- Trong mùa lũ – trường hợp chưa có công trình: Trong mùa lũ, mặc dù tại một số vị trí xuất hiện dòng chảy xoáy và xói mạnh, mái dốc có thể chưa xảy ra sạt lở do mực nước sông duy trì ở mức cao, tạo áp lực nước phía sông giúp giảm chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng; vì vậy K_{min} vẫn duy trì trong vùng ổn định trong suốt thời gian mô phỏng. Tuy nhiên, khi mực nước sông giảm, chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng có xu hướng tăng và làm giảm độ ổn định mái; do đó cần xem xét các giải pháp công trình nhằm gia cố và bảo vệ đường bờ tại các vị trí xung yếu.

- Trong mùa lũ – trường hợp có công trình: Khi triển khai các giải pháp công trình, kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả rõ rệt về mặt ổn định bờ sông. Hệ số K_{min} duy trì ổn định và an toàn trong suốt thời gian mô phỏng, dao động trong khoảng 1,23–1,35, lớn hơn giá trị yêu cầu. Các công trình phát huy hiệu quả trong việc bảo vệ chân mái bờ sông, giảm xói lở do dòng chảy mạnh, đồng thời phân tán tác động thủy lực và cải thiện trạng thái ứng suất trong mái dốc.

Việc so sánh các kịch bản trước và sau khi áp dụng công trình cho thấy các giải pháp kỹ thuật bảo vệ bờ có vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn cho tuyến bờ sông, đặc biệt trong các điều kiện thủy văn bất lợi. Các giải pháp đề xuất trong nghiên cứu là phù hợp, có tính khả thi và cần thiết nhằm bảo vệ bền vững bờ sông Hậu đoạn qua thành phố Long Xuyên (nay thuộc phường Long Xuyên và phường Bình Đức), góp phần giảm thiểu thiệt hại về người và tài sản, đồng thời ổn định hạ tầng đô thị ven sông.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu ứng dụng kết hợp mô hình toán MIKE 3 và mô hình ổn định mái dốc GeoSlope để đánh giá diễn biến lòng dẫn và kiểm tra tính ổn định bờ sông Hậu đoạn qua thành phố Long Xuyên (nay thuộc phường Long Xuyên và phường Bình Đức), tỉnh An Giang, cho thấy:

- Mô hình đã mô phỏng phù hợp diễn biến thủy lực và vận chuyển bùn cát trong các mùa kiệt và mùa lũ. Kết quả cho thấy lòng dẫn có sự bồi lắng – xói lở phức tạp, đặc biệt tại các khúc uốn (đoạn cong của lòng dẫn), các đoạn sông co hẹp lòng dẫn hoặc nơi chịu ảnh hưởng mạnh của dòng chảy xoáy. Cụ thể, bờ phải sông Hậu đoạn qua khu vực nghiên cứu có xu hướng xói lở. Biến động hình thái lòng dẫn trong mùa lũ có xu hướng mạnh hơn so với mùa kiệt do lưu lượng lớn và lưu tốc dòng chảy cao. Trong mùa lũ năm 2011, lưu tốc dòng chảy có thể đạt trên 4 m/s tại một số khúc uốn, làm gia tăng nguy cơ xói lở.

- Trong điều kiện chưa có giải pháp công trình, mái dốc bờ sông

trong mùa kiệt và mùa lũ đều tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định; tại một số thời điểm, hệ số ổn định nhỏ nhất thấp hơn ngưỡng yêu cầu tối thiểu. Trong mùa kiệt, hệ số ổn định có xu hướng giảm xuống dưới 1,15 khi mực nước sông xuống thấp, cho thấy nguy cơ trượt sạt tăng cao. Khi áp dụng giải pháp công trình, hệ số ổn định được cải thiện rõ rệt và duy trì trên ngưỡng an toàn trong cả mùa kiệt và mùa lũ. Kết quả mô phỏng từ MIKE 3 cho thấy diễn biến hình thái lòng dẫn có ảnh hưởng trực tiếp đến ổn định bờ sông; nội dung này được phân tích và đánh giá chi tiết thông qua mô hình.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế cần xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo: (1) số liệu bùn cát thực đo trong khu vực dự án phục vụ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình còn hạn chế, có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của mô phỏng vận chuyển bùn cát; (2) mô hình MIKE 3 chưa xét đầy đủ một số yếu tố có thể tác động đến ổn định bờ sông như ảnh hưởng của công trình xây dựng ven bờ, hoạt động khai thác cát và biến đổi khí hậu; (3) thời gian mô phỏng trong mô hình còn tương đối ngắn, chưa đánh giá được đầy đủ ảnh hưởng của biến động mực nước dài hạn đến ổn định bờ sông.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này có kế thừa một phần kết quả mô hình MIKE 11 từ báo cáo lưu hành nội bộ của Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi (năm 2020). Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn đơn vị tư vấn đã hỗ trợ và cung cấp dữ liệu làm cơ sở cho nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. N. H. Khuyên, N. T. Nụ, and B. T. Sơn, "Phân tích khả năng mất ổn định đường bờ sông Tiền qua huyện Cái Bè, tỉnh Tiền Giang," Tạp chí Khí tượng Thủy văn, vol. 755, pp. 13-24, 2023.
- [2]. E. J. Anthony, G. Brunier, M. Besset, M. Goichot, P. Dussouillez, and V. L. Nguyen, "Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities," Scientific reports, vol. 5, no. 1, p. 14745, 2015.
- [3]. Y. Gao, S. Sarker, T. Sarker, and O. T. Leta, "Analyzing the critical locations in response of constructed and planned dams on the Mekong River Basin for environmental integrity," Environmental Research Communications, vol. 4, no. 10, p. 101001, 2022.
- [4]. L. T. Phát, Đ. V. Duy, C. T. Hiếu, N. T. An, K. Lavane, and T. V. Tỳ, "Một số nhận định ban đầu về nguyên nhân gây mất ổn định bờ sông ở huyện Châu Thành tỉnh Hậu Giang," Tạp chí Khí tượng Thủy văn, vol. 740, pp. 57-73, 2022.
- [5]. C. N. Thắng, N. T. Bình, and T. n. V. Tỳ, "Xây dựng bản đồ sạt lở bờ sông, kênh rạch nội đồng tỉnh An Giang-Phương pháp có sự tham gia của cộng đồng," Tạp chí Nông nghiệp và Môi trường, no. 12, pp. 64-72, 2025.
- [6]. C. N. Thắng, P. H. H. Giang, L. H. Trí, and N. P. V. Anh, "Ảnh hưởng của tải trọng đến ổn định bờ sông Ông Chưông, tỉnh An Giang," Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng, vol. 13, no. 06, pp. 84-Trang 89, 2023.
- [7]. C. N. Thắng, N. T. Bình, and T. n. V. Tỳ, "Phân tích nguyên nhân và giải pháp phòng chống sạt lở trên hệ thống kênh rạch nội đồng tỉnh An Giang," Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, vol. 61, no. 5, pp. 37-46, 2025.
- [8]. P. L. M. Duyên, N. V. Bé, Đ. T. Anh, and V. P. Đ. Trí, "Ứng dụng mô hình thủy lực một chiều (1D) kết hợp với hai chiều (2D) trên đoạn Sông Hậu," Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, no. 45, pp. 82-89, 2016.
- [9]. D. V. Duy, T. V. Ty, L. T. Phat, H. V. T. Minh, N. T. Thanh, and N. K. Downes, "Assessing River Corridor Stability and Erosion Dynamics in the Mekong Delta: Implications for Sustainable Management," Earth, vol. 6, no. 2, p. 34, 2025.
- [10]. D. Mike, "Mike 3 Flow Model FM. Hydrodynamic Module Scientific Documentation," ed, 2022.
- [11]. K. Pareta, "Two-dimensional morphological model for prediction of erosion of a reach of Brahmaputra River using MIKE 21C software with hydrodynamics and river morphology modules," River, vol. 2, no. 4, pp. 445-456, 2023.
- [12]. T. A. Dang and T. H. Tran, "Application of the Mike21C model to simulate flow in the lower Mekong river basin," SpringerPlus, vol. 5, no. 1, p. 1982, 2016.
- [13]. D. V. Duy et al., "Evaluating Water Level Variability Under Different Sluice Gate Operation Strategies: A Case Study of the Long Xuyen Quadrangle, Vietnam," Hydrology, vol. 12, no. 5, p. 102, 2025.
- [14]. N.T. Tựu and V. P. Đ. Trí, "Động thái dòng chảy ở vùng Tứ Giác Long Xuyên dưới tác động của đê bao ngăn lũ," Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, no. 25, pp. 85-93, 2013.
- [15]. Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, "Dự án chỉnh trị dòng chảy nhằm hạn chế sạt lở, bảo vệ đô thị thành phố Long Xuyên thích ứng với biến đổi khí hậu," 2013.
- [16]. E. Meyer-Peter and R. Müller, "Formulas for Bed-Load Transport," Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research (IAHR), Stockholm, Sweden, 1948, pp. 39-64.
- [17]. H. Rouse, "Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Turbulence," Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 102, pp. 463-543, 1937.