

Đánh giá ảnh hưởng của tải trọng và dao động mực nước đến ổn định bờ sông: Trường hợp nghiên cứu tại sông Ô Môn, thành phố Cần Thơ

Huỳnh Minh Hoàng^{1,2}, Lâm Tấn Phát², Trần Hoàn Bách³, Trần Văn Tỷ², Trần Văn Tuấn^{2,*}

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

² Đại học Cần Thơ

³ UBND xã Tân Thuận, tỉnh Cà Mau

TỪ KHOẢ

Tải trọng
Dao động mực nước
Ổn định mái dốc
Sông Ô Môn
Thành phố Cần Thơ

TÓM TẮT

Mục tiêu của nghiên cứu này nhằm đánh giá ổn định bờ 1ong Ô Môn, thành phố Cần Thơ, kết hợp số liệu khảo sát thực địa với phân tích ổn định mái dốc được mô phỏng theo các mô hình tính toán chuyên ngành (GeoSlope và Plaxis 2D) theo các kịch bản mực nước và tải trọng khác nhau. Các thông số địa kỹ thuật thu thập từ hiện trường được sử dụng để phân tích ổn định bờ trong điều kiện thấm ổn định và giai đoạn mực nước hạ thấp nhanh, nhằm đánh giá ảnh hưởng của dao động mực nước và tải trọng bổ sung đến hệ số ổn định mái dốc. Kết quả nghiên cứu cho thấy quá trình hạ thấp nhanh mực nước làm suy giảm đáng kể ổn định bờ 1ong do áp lực nước lỗ rỗng trong 1ong bờ không kịp tiêu thoát, ngay cả khi lưu tốc dòng chảy không lớn. Tải trọng bổ sung trên bờ tiếp tục làm gia 1ong nguy cơ mất ổn định, đặc biệt tại các đoạn có lớp đất mềm bão hòa. Sự tương đồng trong kết quả phân tích giữa hai mô hình (GeoSlope và Plaxis 2D) khẳng định tính tin cậy của các cơ chế mất ổn định được nhận diện. Nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng cho việc đánh giá ổn định bờ 1ong dưới tác động tổng hợp của yếu tố thủy văn và địa kỹ thuật, góp phần hỗ trợ công tác quản lý và giảm thiểu rủi ro sạt lở bờ 1ong tại các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của dao động mực nước theo triều ở Đồng bằng Sông Cửu Long.

KEYWORDS

Surcharge
Water-level fluctuation
Slope stability
O Mon River
Can Tho city

ABSTRACT

The objective of this study is to assess riverbank stability along the O Mon River in Can Tho City by integrating field investigation data with numerical simulation for slope stability analyses (GeoSlope and Plaxis 2D) under different water-level and surcharge scenarios. Geotechnical parameters obtained from site investigations were employed to evaluate riverbank stability under steady-state seepage conditions and rapid water-level drawdown. The effects of water-level fluctuation and additional surface loads (surcharge) on the factor of safety were analyzed to identify dominant instability mechanisms. The results highlight that rapid water-level drawdown causes a pronounced reduction in riverbank stability due to delayed dissipation of pore water pressure within the riverbank, even when river flow velocities are relatively low. Additional surface loads (surcharge) further aggravate slope instability, particularly in sections characterized by soft, saturated soil layers. The consistency of results obtained from both (GeoSlope and Plaxis 2D) simulations confirms the robustness of the identified failure mechanisms. This study provides a quantitative basis for evaluating riverbank stability under combined hydrological and geotechnical influences and supports more effective riverbank management and erosion risk mitigation in tide-affected river systems of the Mekong Delta.

1. Giới thiệu

Hiện nay, sạt lở bờ sông tại Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đã trở thành một trong những thách thức về môi trường và kỹ thuật địa chất cấp bách nhất. Với đặc trưng mạng lưới sông ngòi, kênh rạch thứ cấp dày đặc trên nền địa chất yếu, khu vực này đang chịu tác động cộng hưởng từ các quá trình địa mạo tự nhiên và các hoạt động nhân sinh [1, 2]. Nhiều công trình nghiên cứu đã xác nhận sự gia tăng cường độ xói lở tại châu thổ sông Mê Kông trong những thập kỷ gần đây. Hiện

tượng này có mối tương quan mật thiết với sự sụt giảm hàm lượng phù sa lơ lửng từ thượng nguồn, sự biến đổi tiêu cực của chế độ thủy văn và hoạt động khai thác tài nguyên quá mức, dẫn đến sự phá vỡ trạng thái cân bằng động trong quá trình bồi - xói của hệ thống [3, 4]. Sự mất cân bằng này biểu hiện rõ rệt tại các phân đoạn sông chính, các đoạn sông cong và các khu vực chuyển tiếp thủy lực - nơi hình thái lòng dẫn có sự biến động phức tạp cả về không gian lẫn thời gian [5, 6].

Tại Việt Nam, phạm vi ảnh hưởng của sạt lở không chỉ giới hạn ở các trục sông chính mà còn lan rộng sang hệ thống kênh rạch nội đồng,

*Liên hệ tác giả: tvtu@ctu.edu.vn

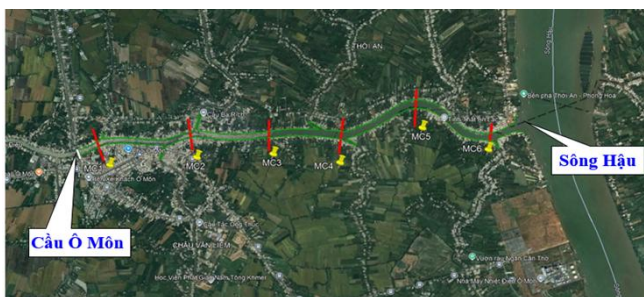
Nhận ngày 14/01/2026, sửa xong ngày 24/01/2026, chấp nhận đăng ngày 26/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1223>

gây ra những tổn thất nghiêm trọng về quỹ đất định cư, đất canh tác và làm suy yếu hệ thống hạ tầng kỹ thuật ven sông [7, 8]. Các kết quả khảo sát thực địa chỉ ra rằng cơ chế mất ổn định bờ sông thường liên quan đến các chỉ tiêu cơ lý của đất yếu, trạng thái bão hòa nước và sự dao động mực nước sông đột ngột trong giai đoạn chuyển mùa [9, 10]. Đặc biệt, tại các tỉnh thượng nguồn ĐBSCL như An Giang, tần suất và quy mô của các điểm sạt lở đang có xu hướng gia tăng đáng kể dưới áp lực từ hoạt động phát triển kinh tế - xã hội và khai thác tài nguyên [11]. Những tác động này không chỉ làm biến dạng hình thái lòng dẫn mà còn gia tăng cường độ xói chân mái bờ sông, trực tiếp làm suy giảm hệ số ổn định mái dốc và dẫn đến các sự cố trượt lở quy mô lớn.

Về phương diện nghiên cứu, các cách tiếp cận truyền thống trong đánh giá sạt lở bờ sông thường dựa trên tổng hợp số liệu hiện trạng, khảo sát thực địa và phân tích ảnh viễn thám nhằm theo dõi biến động đường bờ theo thời gian [1, 5, 8]. Trên cơ sở đó, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các phương pháp phân tích đa tiêu chí kết hợp với công nghệ GIS để phân vùng nguy cơ xói lở và hỗ trợ công tác quản lý rủi ro [7, 9]. Các yếu tố như biến đổi khí hậu, dao động mực nước, khai thác cát và điều kiện địa chất thủy văn cũng được xem xét như những nguyên nhân quan trọng thúc đẩy quá trình mất ổn định bờ sông [2, 6, 7, 10].

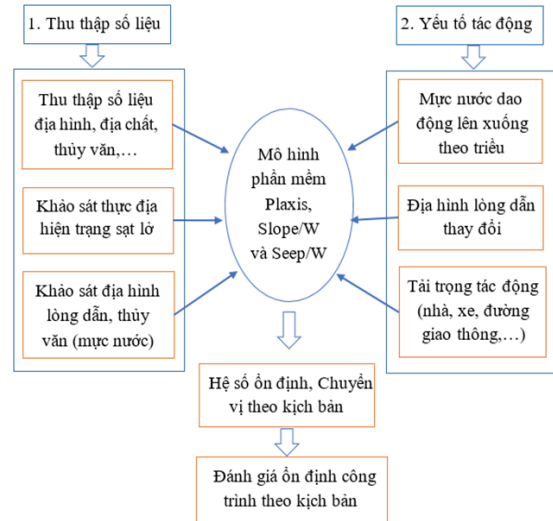
Đối với khu vực sông Hậu và vùng Tứ Giác Long Xuyên, các nghiên cứu cho thấy dao động mực nước trên trục sông Hậu có ảnh hưởng lan truyền rõ rệt đến các nhánh sông hạ lưu [12-14]. Trong mối liên hệ đó, sông Ô Môn (Hình 1), một nhánh sông nối trực tiếp với sông Hậu tại khu vực Cần Thơ được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu (KVNC) nhằm làm rõ cơ chế mất ổn định bờ sông trong điều kiện chịu tác động mạnh của biến động mực nước và các yếu tố địa chất địa phương. Nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở định lượng cho việc kiểm soát tải trọng và thiết kế ổn định bờ sông trong điều kiện dao động mực nước mạnh theo triều.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu.

2. Phương pháp nghiên cứu

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



Hình 2. Tiến trình các bước nghiên cứu.

2.1. Thu thập số liệu

Các nguồn số liệu sơ cấp như địa hình, địa chất của KVNC, thống kê tình hình sạt lở của khu vực được thu thập từ các nguồn thể hiện ở Bảng 1.

KVNC ở giữa trạm thủy văn Cần Thơ và Long Xuyên xét tương quan mực nước hai trạm. Kết quả mực nước cao hơn thiên về bất lợi cho công trình. Do vậy, đề xuất lựa chọn mực nước phục vụ thiết kế tương ứng công trình cấp IV của công trình kè như sau: (1) Cao trình mực nước lớn nhất thiết kế ứng với tần suất $P = 2,0\%$: +2,35 m và (2) Cao trình mực nước thấp nhất thiết kế ứng với tần suất $P = 90\%$: -1,52 m.

2.2. Khảo sát địa hình, mặt cắt ngang sông và mực nước

Phương pháp đo mặt cắt ướn sông được xác định theo Tiêu chuẩn ngành 14TCN 141-2005 [17]. Trong đó, máy siêu âm Hondex PS-7 được sử dụng để đo độ sâu. Độ sâu được đo từ mặt nước đến đáy sông tại các thủy trực và khoảng cách giữa các thủy trực là 5-10 m tính từ mép bờ phải (Hình 3a). Ghi nhận và chỉnh lý số liệu cho phù hợp để vẽ mặt cắt sông.

Đo mực nước thay đổi theo triều bằng thiết bị Sensor dựa trên nguyên lý phản hồi sóng. Cảm biến được đặt chìm trong nước khi mực nước thay đổi và được cảm biến ghi nhận (Hình 3b). Do công trình nằm cách trạm thủy văn Cần Thơ khoảng 18 km sử dụng số liệu đo và số liệu mực nước khảo sát tại trạm làm tương quan.

2.3. Mô hình phân tích ổn định bờ sông

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:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

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 (m^3/s); θ là hàm ẩm thể tích (m^3/m^3); 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, 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):

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i l_i + ((W_i + Q_i) \cos \alpha_i - u_i l_i) \tan \varphi'_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i + Q_i) \sin \alpha_i} \quad (2)$$

Trong đó: FS là hệ số an toàn; c'_i là lực dính (kN/m^2); 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).

- Plaxis 2D: Sử dụng phần mềm địa kỹ thuật Plaxis 2D để phân tích bài toán theo phương pháp phần tử hữu hạn. Đất nền, cọc và kết cấu tường được chia thành các phần tử nút. Theo hồ sơ thiết kế công trình, kích thước mô hình được xác định với chiều rộng là 60,0m; chiều cao là 30,0m. Mô hình bài toán ứng suất phẳng được sử dụng cho tuyến công trình kéo dài theo phương. Trong bài toán 2D, xem hàng cọc trong đất như một dầm nhúng trong đất khoảng cách bước cọc 1,7 m theo mô hình kè sông Ô Môn. Nghiên cứu này dùng phần tử Embedded pile (cọc chôn ngầm) để mô phỏng cọc bê tông làm việc như kết cấu chịu uốn, nén,... các phần tử phân giới (interface) được sử dụng để mô phỏng sự làm việc đồng thời giữa cọc và đất nền. Rọ đá mô phỏng như lớp đất làm việc đồng thời với vải địa kỹ thuật và phương pháp Mohr – Coulomb được sử dụng để phân tích.

2.4. Xây dựng kịch bản

Các dữ liệu thu thập về địa chất; địa hình mặt cắt sông; mực nước sông; mực nước ngầm và tải trọng của các công trình ven như đường dân sinh và nhà ở của cư dân,... được đưa vào mô hình phần tử hữu hạn GeoSlope/W và Plaxis để tính toán sự ổn định của mái bờ khi chưa có giải pháp công trình, ổn định và chuyển vị công trình khi có giải pháp công trình. Cụ thể theo Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 2737:2023

[18], tải trọng nhà cấp IV và đường dân sinh được tính toán và khai báo vào mô hình phần tử hữu hạn lần lượt là $P_1 = 8,0 kN/m$, $P_2 = 11,4 kN/m$, $P_3 = 23,9 kN/m$ và $P_4 = 44,8 kN/m$. Các kịch bản được đề xuất thể hiện như Bảng 2.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Diễn biến lòng dẫn và sạt lở sông Ô Môn

Kết quả khảo sát sáu mặt cắt ở sông Ô Môn trình bày ở Hình 5 cho thấy MC6-6 có chiều rộng lớn hơn các mặt khác do đây là đầu sông Ô Môn tiếp giáp sông Hậu tạo ra các xoáy nước khoét sâu vào bờ. Nhìn chung các mặt cắt ở sông Ô Môn có mái dốc mái khá cao, khi kết hợp với tải trọng công trình ven bờ có thể tạo ra cung trượt sát bờ sông rất nguy hiểm. Các đoạn cong của sông ở MC2-2 và MC5-5 cho thấy sự bất đối xứng giữa hai mái bờ sông với một bờ khá thoải có mái dốc lớn và bờ còn lại có mái dốc nhỏ hơn. Tại MC2-2, bờ phải có độ dốc $m = 1,70$ trong khi đó bờ trái có độ dốc 2,60 lớn hơn 1,5 lần so với bờ phải. Tương tự tại MC5-5 với bờ trái có độ dốc $m = 1,54$ còn bờ phải là $m = 2,90$. Diễn biến lòng dẫn trước và sau xây dựng công trình nhận thấy tại các vị trí lòng dẫn có hố xói mái dốc $m < 2,0$ được bù lấp chứng tỏ giải pháp công trình có bù đắp tại các vị trí hố xói nguy hiểm.

3.2. Kết quả phân tích ổn định bờ sông khi chưa có giải pháp công trình

3.2.1. Kịch bản 1, 2, 3 và 4

Kết quả phân tích ổn định mái bờ bằng phần mềm Slope/W cho thấy hệ số ổn định tại các mặt cắt MC1–MC6 có sự thay đổi đáng kể trong điều kiện chưa có giải pháp công trình. Các yếu tố tác động chính bao gồm diễn biến hình thái lòng dẫn kết hợp với tải trọng tác động tăng dần theo các kịch bản tính toán: KB1 – bờ sông tự nhiên; KB2 – có tải trọng hoạt tải xe giao thông; KB3 – có nhà lán sông kết hợp tải trọng hoạt tải xe giao thông; Mực nước tính toán mực nước thấp (Bảng 2 và Hình 7).

Từ Hình 7 cho thấy: Theo KB1: Trong điều kiện mái bờ tự nhiên, không chịu tải trọng bổ sung, hệ số ổn định dao động trong khoảng $1,10 \div 1,26$. Tại một số mặt cắt có mái bờ dốc lớn (hệ số mái $m < 2,0$) hệ số ổn định chỉ đạt $1,10 \div 1,16$ (nhỏ hơn K_{cp}) cho thấy các vị trí bờ sông bị xói sâu kết hợp với điều kiện địa chất yếu đã tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định, ngay cả khi chưa chịu tác động của tải trọng bên ngoài. Ngược lại, tại các mặt cắt có mái bờ thoải ($m > 2,0$) hệ số ổn định (lớn hơn K_{cp}) bờ sông vẫn đảm bảo điều kiện an toàn.

- KB2: Khi xét đến tải trọng xe giao thông phía trong đường dân sinh, hệ số ổn định của mái bờ bắt đầu suy giảm rõ rệt, với hệ số ổn định trong khoảng $1,06 \div 1,18$ (nhỏ hơn K_{cp}). Phần lớn các mặt cắt từ MC1-1 đến MC6-6 đều có hệ số ổn định thấp, cho thấy mái bờ sông gần trạng thái mất ổn định và nguy cơ sạt lở ở mức cao.

- KB3: Trong trường hợp xét đồng thời tải trọng nhà lán sông và tải trọng xe giao thông phía trong đường dân sinh, hệ số ổn định giảm xuống mức rất thấp, hệ số ổn định chỉ còn trong khoảng $0,90 \div 1,14$ (nhỏ hơn K_{cp}). Hầu hết các mặt cắt đều không đảm bảo ổn định, bờ

sông rơi vào trạng thái mất ổn định và có nguy cơ sạt lở rất cao. Đặc biệt, tại một số vị trí cục bộ có mái bờ bị xói hàm ếch ($m < 2,0$) hệ số ổn định nhỏ hơn 1,00, cho thấy tình trạng mất ổn định nghiêm trọng và nguy cơ sạt lở xảy ra là rất lớn.

Các biểu đồ trong Hình 8a, b và c thể hiện mối quan hệ giữa dao động mực nước sông theo triều trong các mùa và hệ số ổn định bờ sông trong điều kiện chưa có giải pháp công trình bảo vệ (KB4). Kết quả cho thấy hệ số ổn định mái bờ phụ thuộc chặt chẽ vào diễn biến mực nước sông theo thời gian. Cụ thể, tại các thời điểm mực nước sông xuống thấp, hệ số ổn định nhỏ nhất (FS_{min}) có xu hướng giảm đáng kể; tại nhiều thời điểm ($FS_{min} < K_{cp}$), thấp hơn ngưỡng yêu cầu tối thiểu để đảm bảo ổn định mái bờ. Điều này cho thấy mái dốc rơi vào trạng thái không ổn định và có nguy cơ trượt sạt cao. Nguyên nhân chủ yếu là do khi mực nước sông rút nhanh, áp lực nước lỗ rỗng trong thân bờ chưa kịp tiêu thoát, làm gia tăng chênh lệch áp suất giữa phía trong và phía ngoài mái, dẫn đến suy giảm lực chống trượt của mái dốc. Ngược lại, trong giai đoạn mực nước triều dâng, áp lực nước phía ngoài tác động lên mái giúp giảm chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng, từ đó hệ số ổn định được cải thiện và có thể vượt ngưỡng an toàn. Tuy nhiên, sự dao động mực nước lớn và liên tục theo chu kỳ triều khiến trạng thái ứng suất trong đất nền thay đổi thường xuyên, gây hiện tượng “mỏi” đất và tiềm ẩn nguy cơ trượt sạt lặp lại theo thời gian.

Từ đó có thể thấy rằng: Trong điều kiện chưa có giải pháp công trình bảo vệ, tại các thời điểm mực nước thấp vào mùa kiệt và phía trong bờ có mưa, áp lực nước lỗ rỗng gia tăng đáng kể, làm hệ số ổn định giảm xuống ($FS_{min} = 1,10 < K_{cp}$); mái dốc bờ sông có nguy cơ mất ổn định nghiêm trọng. Trong trường hợp mực nước thấp mùa kiệt nhưng phía trong không có mưa, áp lực nước lỗ rỗng được hạn chế, hệ số ổn định đạt ($FS_{min} = 1,18 < K_{cp}$); mái dốc vẫn tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định nhưng ở mức độ không quá nghiêm trọng. Đối với mùa lũ, tại các thời điểm mực nước thấp kết hợp với mưa phía trong, do chênh lệch mực nước nhỏ nên áp lực nước lỗ rỗng không gia tăng đáng kể, hệ số ổn định đạt ($FS_{min} = 1,33 > K_{cp}$); mái dốc nhìn chung đảm bảo ổn định. Trong trường hợp xảy ra sạt lở, nguyên nhân chủ yếu có thể liên quan đến các yếu tố khác như xói mòn lòng dẫn, tương tự các kịch bản 1, 2 và 3.

3.2.2. Kịch bản 5, 6, 7, 8 và 9

Kết quả mô phỏng ổn định và chuyển vị các mặt cắt theo kịch bản 5 và 6 được thể hiện trên Hình 9. Từ các Hình 9 (KB5) cho thấy, sự thay đổi lòng dẫn tại các mặt cắt có hệ số mái trong khoảng ($m = 2,25 \div 3,58$), giá trị tính toán dao động trong khoảng ($FS = 1,22 \div 1,31$ và $Ux = 2,91 \div 4,50$ cm), vượt ngưỡng an toàn tối thiểu (hệ số ổn định cho phép (K_{cp}) và chuyển vị ngang cho phép ($[Ux]_{gh} = 5,7$ cm)). Kết quả này chứng tỏ các giải pháp công trình kè bảo vệ bờ sông Ô Môn đã phát huy hiệu quả rõ rệt, thể hiện ở các khía cạnh sau: (1) Giảm thiểu ảnh hưởng của dao động mực nước đến phân bố áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc; (2) Hạn chế xói chân mái, duy trì ổn định hình học của mái khi mực nước rút; và (3) Tăng cường khả năng chống trượt

thông qua việc gia cố cọc bê tông cốt thép và cải thiện điều kiện biên cơ học của khối đất. Từ kết quả trên có thể thấy rằng việc áp dụng các giải pháp công trình là cần thiết và hiệu quả trong việc đảm bảo an toàn cho các đoạn bờ sông có nguy cơ sạt lở cao, đặc biệt trong điều kiện mực nước biến động mạnh theo triều.

Kết quả KB6 cho thấy, tại các mặt cắt có mái sông tương đối thoải (hệ số mái $m > 2,5$) hệ số ổn định và chuyển vị ngang vẫn được duy trì trong giới hạn cho phép (với $FS = 1,21 \div 1,29$ và $Ux = 4,20 \div 5,63$ cm), tiệm cận nhưng vẫn đáp ứng ngưỡng an toàn tối thiểu. Tuy nhiên, tại các mặt cắt có mái sông dốc hơn ($m < 2,5$), hệ số ổn định và chuyển vị ngang suy giảm rõ rệt (với $FS = 1,10 \div 1,16$ và $Ux = 6,18 \div 6,44$ cm), không đáp ứng yêu cầu an toàn. Kết quả này cho thấy việc gia tăng tải trọng sau kè làm tăng áp lực tác dụng lên bờ sông và nền kè, dẫn đến suy giảm khả năng chống cắt của hệ thống cọc gia cố. Đối với các vị trí lòng dẫn ít bị xói mòn ($m > 2,5$), đối trọng của khối đất sau kè vẫn đủ để cân bằng và duy trì ổn định công trình. Ngược lại, tại các vị trí lòng dẫn bị xói mòn mạnh ($m < 2,5$), công trình tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định cao. Do đó, các kết quả trên có thể rút ra kết luận rằng việc gia tăng tải trọng sau kè, ngoài tác dụng tăng đối trọng chống trượt, còn làm suy giảm sức chống cắt của nền và hệ thống cọc gia cố, do đó tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định cho công trình. Để đảm bảo an toàn, cần xem xét các giải pháp như tăng hệ số mái dốc lên $m > 2,5$ (ví dụ: đắp bao cát kết hợp rọ đá), hoặc gia cố nền và giảm tải phía sau kè bằng các biện pháp như sà giảm tải, cọc neo, cọc xi măng – đất.

Từ Hình 10 cho thấy hệ số ổn định phụ thuộc rõ rệt vào cả mực nước sông và mức độ gia tăng hoạt tải giao thông. Cụ thể, tại các thời điểm mực nước sông xuống thấp, hệ số ổn định nhỏ nhất FS_{min} có xu hướng giảm đáng kể; tại một số thời điểm FS_{min} nhỏ hơn ngưỡng yêu cầu tối thiểu, cho thấy mái dốc tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định. Nguyên nhân chủ yếu là do khi mực nước sông rút, áp lực nước lỗ rỗng trong thân bờ chưa kịp tiêu thoát hoàn toàn, kết hợp với hoạt tải xe làm gia tăng ứng suất cắt trong khối đất sau kè. Ngược lại, trong giai đoạn triều dâng, áp lực nước phía ngoài tác động lên mái giúp giảm chênh lệch áp suất nước lỗ rỗng, từ đó hệ số ổn định được cải thiện và vượt ngưỡng an toàn. Tuy nhiên, do mực nước dao động lớn theo chu kỳ triều, trạng thái ứng suất trong đất nền liên tục thay đổi, tiềm ẩn nguy cơ trượt sạt lặp lại khi chịu tác động của tải trọng giao thông lớn.

Như vậy, theo KB7, trong điều kiện có giải pháp công trình bảo vệ, tại các thời điểm mực nước thấp trong mùa mưa và phía trong bờ có mưa, áp lực nước lỗ rỗng gia tăng nhưng hệ số ổn định vẫn đạt $FS_{min} = 1,21$ lớn hơn ngưỡng yêu cầu. Mái dốc bờ sông cơ bản ổn định, kè có thể vận hành bình thường. Tiếp đến KB8 (tải trọng xe 15T), khi hoạt tải xe tăng lên 15T, hệ số ổn định giảm xuống còn $FS_{min} = 1,16$. Kết quả cho thấy tại một số thời điểm cao trình mực nước cao hơn ($H_{(t)} = 0,0$ m, tương ứng $FS \approx 1,26$), xe tải 15T vẫn có thể lưu thông tạm thời trên tuyến đường sau kè. Tuy nhiên, tại các thời điểm mực nước thấp hơn, nguy cơ mất ổn định tăng cao và cần hạn chế hoạt động của xe tải. Đến KB9 (tải trọng xe 30T), trong trường hợp tải trọng xe tăng lên 30T, hệ số ổn định nhỏ nhất là 1,16 ($FS_{min} = 1,16$). Kết quả cho thấy chỉ tại một số thời điểm cao trình mực nước cao hơn ($H_{(t)} = 0,5$ m, tương ứng FS

$\approx 1,23$), xe tải 30T mới có thể lưu thông tạm thời. Khi mực nước sông xuống thấp, mái bờ tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định cao và không đảm bảo an toàn cho việc vận hành giao thông.

3.2.3. Thảo luận

Từ phân tích đề xuất đánh giá các biện pháp xử lý mô hình kè trên đoạn sông Ô Môn giúp giảm thiểu các tác động tiêu cực cho khu vực dự án hiện tại và tương lai. Kết quả KB6 khẳng định rằng ổn định của công trình kè phụ thuộc chủ yếu vào sự cân bằng đối trọng của khối đất và áp lực ngang gây ra bởi dao động mực nước sông kết hợp với tải trọng giao thông gia tăng, đặc biệt trong điều kiện hình thái lòng dẫn bất lợi. Trên cơ sở kết quả phân tích, một số phương án tăng đối trọng và giảm áp lực ngang được đề xuất nhằm đảm bảo ổn định công trình khi tải trọng tác dụng gia tăng, kết quả mô phỏng cụ thể như sau (Hình 11):

- Trường hợp 1 (TH1): Đối với các vị trí lòng sông có nguy cơ sạt lở cao, mái dốc tương đối lớn (hệ số mái $m = 2,0 \div 2,5$), cần áp dụng giải pháp tăng đối trọng bằng cách thoải hóa mái kết hợp xử lý gia cố nền bằng cọc xi măng – đất nhằm nâng cao khả năng chống trượt và giảm chuyển vị ngang.

- Trường hợp 2 (TH2): Đối với các vị trí lòng sông có nguy cơ sạt lở thấp, mái dốc tương đối thoải (hệ số mái $m > 3,0$), có thể áp dụng giải pháp “thoải hóa” mái đơn thuần, không cần xử lý gia cố nền sâu, vẫn đảm bảo ổn định công trình khi gia tăng tải trọng giao thông.

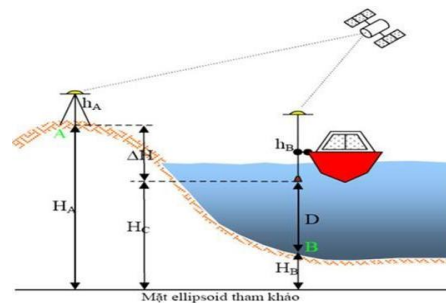
Trên cơ sở kết quả phân tích trong Hình 11, nhằm giảm thiểu nguy cơ sạt lở và đảm bảo ổn định lâu dài cho bờ sông Ô Môn (đoạn từ vàm sông Hậu đến cầu Ô Môn, thành phố Cần Thơ), kiến nghị các nhóm giải pháp sau:

Giải pháp công trình khi nhu cầu gia tăng tải trọng sau kè: Áp dụng các giải pháp gia cố nền sau kè như sàn giảm tải, cọc neo hoặc cọc xi măng – đất tại các khu vực có nguy cơ xói lở cao đã được xác định trong nghiên cứu, đặc biệt là khu vực bờ phải sông Ô Môn tại các đoạn cong và khu vực đầu kênh giao cắt với sông. Ngoài ra, xây dựng các giải pháp bảo vệ mái sông nhằm hạn chế xói chân và bào mòn mái lòng sông dưới tác động của dòng chảy mạnh trong mùa lũ và sự dao động mực nước lớn trong mùa kiệt.

Giải pháp phi công trình khi nhu cầu gia tăng tải trọng sau kè: Quy hoạch sử dụng đất ven sông hợp lý, từng bước dịch chuyển tuyến giao thông ra xa mép bờ, hạn chế xây dựng các công trình kiên cố quá gần bờ sông. Đồng thời, tăng cường công tác quản lý và kiểm soát hoạt động khai thác cát lòng sông, nhằm giảm thiểu các tác động bất lợi đến ổn định hình thái lòng dẫn và bờ sông.

Bảng 1. Số liệu và nguồn số liệu.

TT	Tên số liệu	Thời gian/Địa điểm	Nguồn
1	Địa chất	Khu vực sông Ô Môn	Chi cục thủy lợi TP Cần Thơ [15]
2	Địa hình	Địa hình lòng dẫn khu vực sông Ô Môn	
3	Thủy văn	2000-2024, trạm Thủy văn Long Xuyên và Cần Thơ	Viện Khoa học Tài nguyên Môi trường và Biến đổi khí hậu [16]



a) Thiết bị đo các vị trí các mặt cắt khảo sát



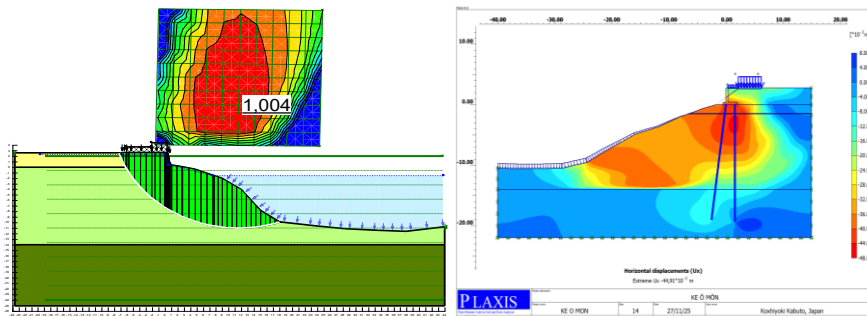
b) Đo mực nước thay đổi theo triều bằng thiết bị Sensor

Hình 3. Các thiết bị và phương pháp khảo sát mặt cắt và mực nước.

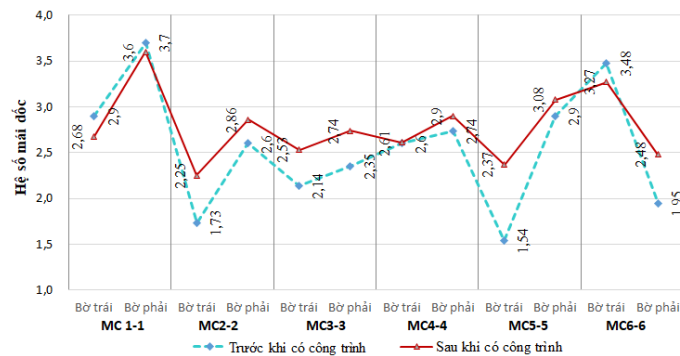
Bảng 2. Tổng hợp các kịch bản.

Kịch bản (KB)	Mức nước tác động		Tải trọng tác động				
	Min $P_{90\%}$ (-1,52 m)	Dao động mức nước	Nhà lấn sông P_1 (kN/m)	Xe 6 T P_2 (kN/m)	Xe 15 T P_3 (kN/m)	Xe 30 T P_4 (kN/m)	Mở rộng đường (4,5 m - 9,0 m)
1	x						
2	x		x				
3	x		x	x			
4		x	x	x			
5	x			x			
6	x			x			x
7		x		x			
8		x			x		
9		x				x	

- Ổn định được đánh giá tại 6 mặt cắt cho tất cả các kịch bản;
- Kịch bản 1-4: Trước khi xây dựng công trình;
- Kịch bản 5-9: Sau khi xây dựng công trình.



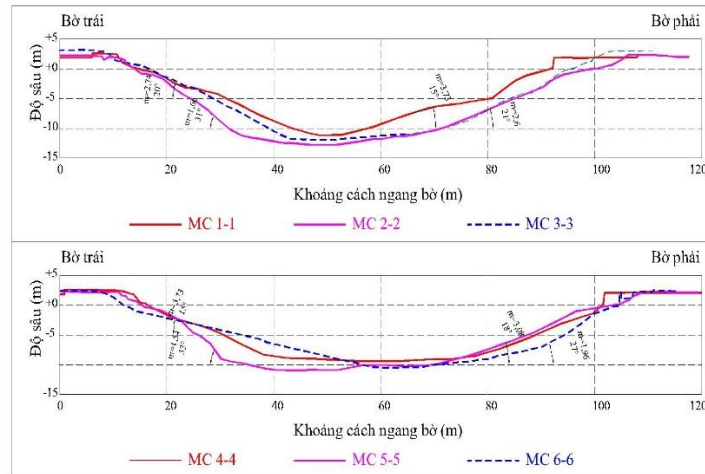
Hình 4. Minh họa mô phỏng trong mô hình GeoSlope và Plaxis 2D.



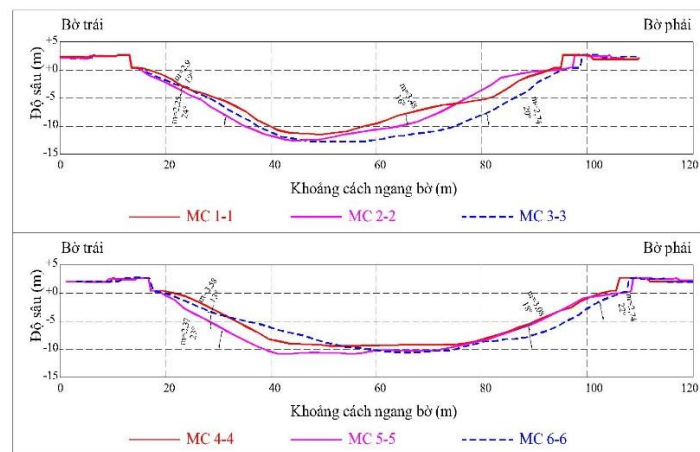
a) Sự thay đổi hệ số mái dốc trước và sau khi có công trình



b) Bản đồ các vị trí mặt cắt xói lở và nhà lấn sông, năm 2020



c) Mặt cắt khi chưa có công trình, năm 2020



d) Mặt cắt khi có công trình, năm 2025

Hình 5. Kết quả khảo sát các mặt cắt tại KVNC.

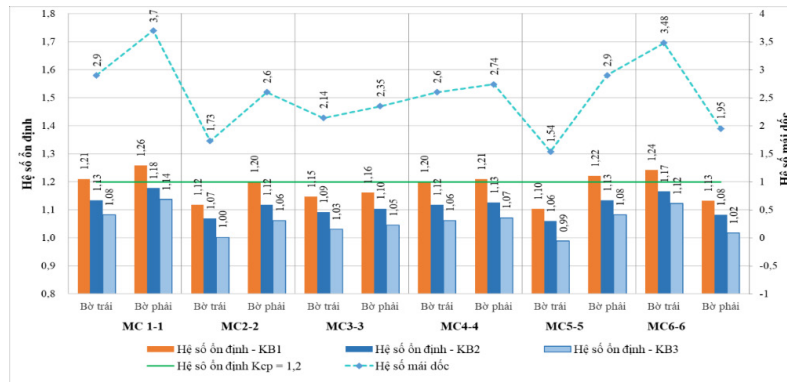


a) Hiện trạng sạt lở ảnh hưởng các nhà dân xây lún lòng sông

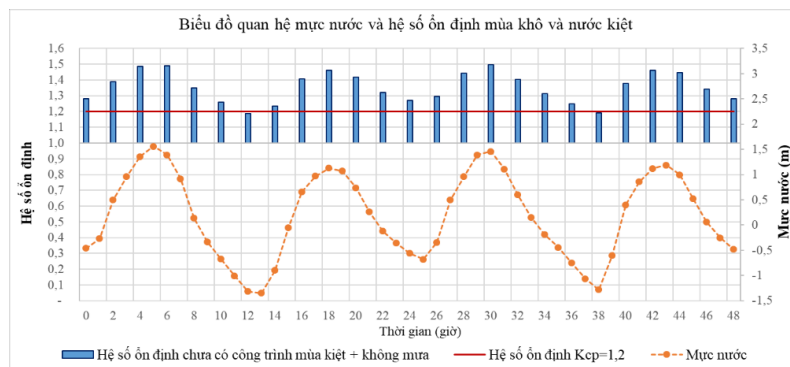


b) Hiện trạng sạt lở ảnh hưởng đường giao thông

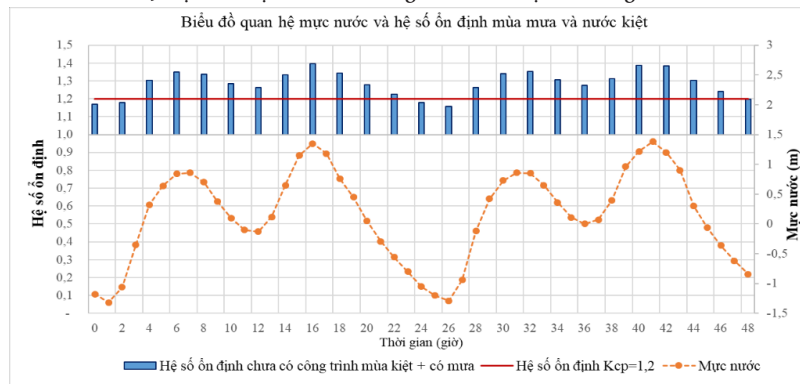
Hình 6. Hiện trạng sạt lở tại KVNC (Tác giả khảo sát năm 2020).



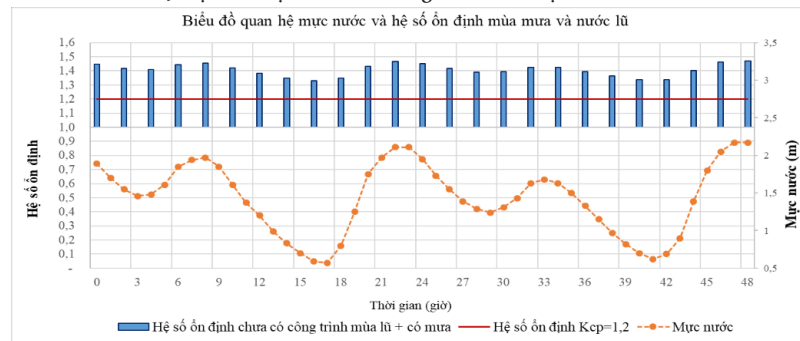
Hình 7. Hệ số ổn định các mặt cắt sông theo kịch bản 1, 2, 3.



a) Hệ số ổn định chưa có công trình mùa kiệt + không mưa

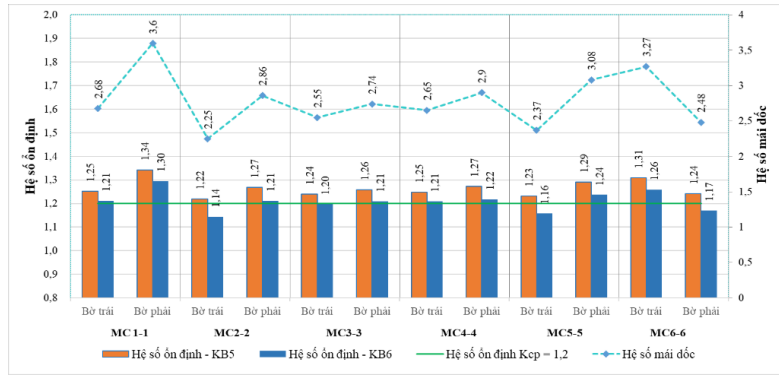


b) Hệ số ổn định chưa có công trình mùa kiệt + có mưa

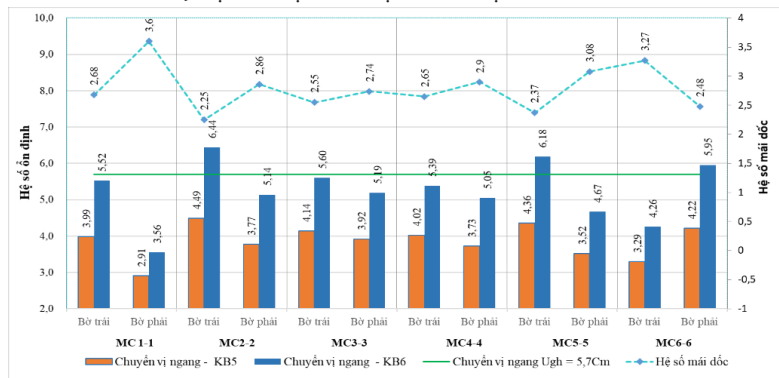


c) Hệ số ổn định chưa có công trình mùa nước lũ + có mưa

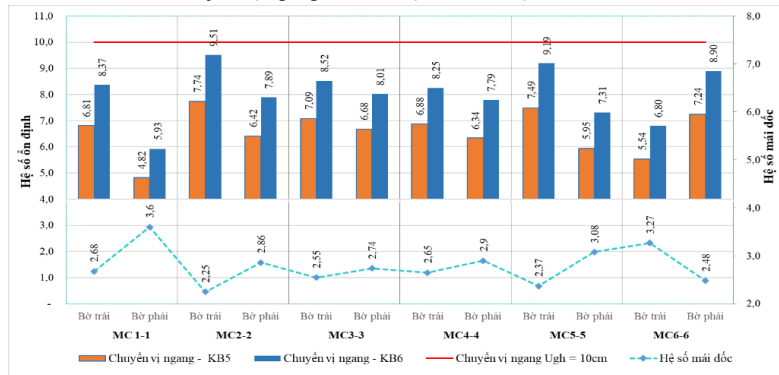
Hình 8. Hệ số ổn định các mặt cắt sông kịch bản 4.



a) Hệ số ổn định các mặt cắt theo kích bản 5 và 6



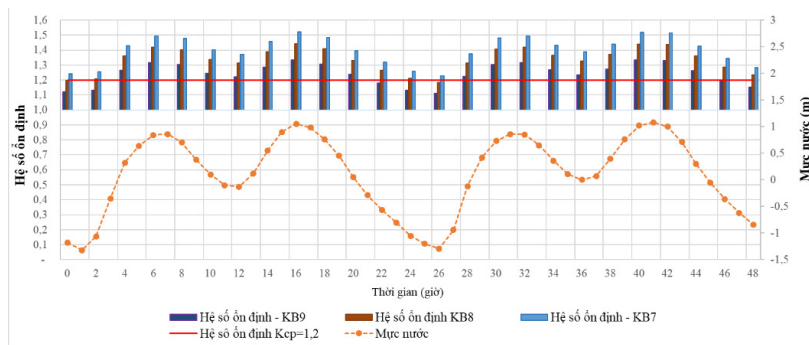
b) Chuyển vị ngang U_x các mặt cắt theo kích bản 5 và 6



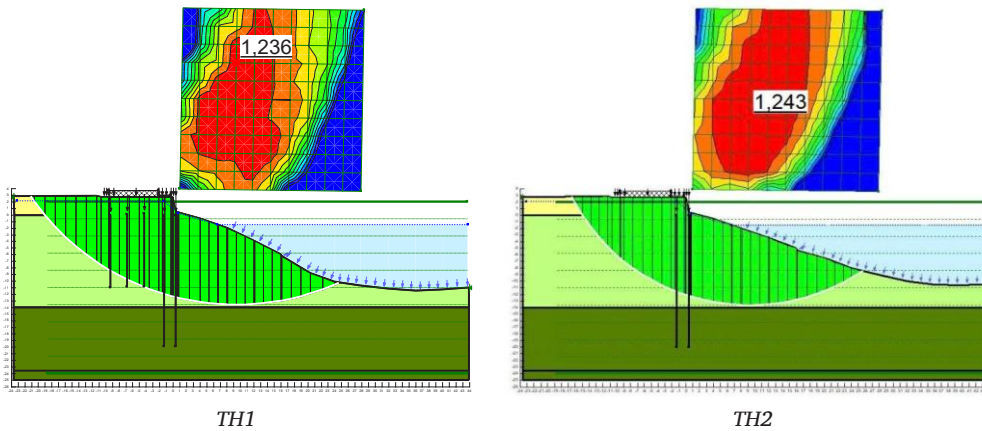
c) Chuyển vị đứng U_y các mặt cắt theo kích bản 5 và 6

Hình 9. Kết quả mô phỏng ổn định và chuyển vị các mặt cắt theo kích bản 5 và 6.

Kết quả mô phỏng ổn định và chuyển vị các mặt cắt theo kích bản 7, 8 và 9 được thể hiện trên Hình 10.



Hình 10. Hệ số ổn định mặt cắt theo kích bản 7, 8 và 9.



Hình 11. Kết quả mô phỏng các đề xuất (Slope/W - KB6).

4. Kết luận

Trên cơ sở phân tích ổn định mái dốc bờ sông Ô Môn dưới các kịch bản mực nước và tải trọng khác nhau, nghiên cứu rút ra một số kết luận chính như sau:

Trong điều kiện chưa có công trình bảo vệ, bờ sông thể hiện mức độ ổn định thấp và nhạy cảm cao với tải trọng nhân tạo và dao động mực nước. Khi hệ số mái dốc m nhỏ hơn 2,0, nguy cơ sạt lở là rõ rệt, trong khi các giá trị m từ 2,0 đến 3,0 phản ánh trạng thái ổn định giới hạn. Việc bổ sung tải trọng ven sông, bao gồm nhà ở và hạ tầng giao thông, làm suy giảm đáng kể ổn định bờ, và khi xét thêm ảnh hưởng của áp lực thấm do dao động mực nước triều, mức độ mất ổn định tiếp tục gia tăng. Kết quả này khẳng định vai trò chi phối của cơ chế thấm và điều kiện mực nước trong quá trình mất ổn định bờ sông, ngay cả trong trường hợp vận tốc dòng chảy không lớn.

Sau khi áp dụng các giải pháp công trình, hệ số ổn định bờ sông được cải thiện rõ rệt. Tại các vị trí hố xói có hệ số mái nhỏ, việc gia cố và bù đắp hình học kết hợp với xét đến tải trọng giao thông cho thấy các chỉ tiêu ổn định và chuyển vị đều nằm trong giới hạn cho phép. Các giải pháp kè hiện hữu phát huy hiệu quả trong việc giảm tác động của áp lực thấm, hạn chế xói chân mái và làm suy giảm áp lực ngang do tải trọng giao thông. Đáng chú ý, trong các kịch bản dao động mực nước và gia tăng hoạt tải vượt mức thiết kế, công trình vẫn duy trì trạng thái ổn định, cho thấy mức độ an toàn và khả năng thích ứng tương đối tốt của hệ thống bảo vệ bờ hiện tại.

Tuy nhiên, nghiên cứu chưa xem xét đầy đủ ảnh hưởng của quá trình bào mòn lòng sông theo thời gian dưới tác động đồng thời của vận tốc dòng chảy và áp lực thấm trong phân tích ổn định. Bên cạnh đó, thời gian mô phỏng trong các mô hình thấm và ổn định còn hạn chế, chưa phản ánh toàn diện tác động của biến đổi mực nước dài hạn và xu thế phát triển hình thái lòng dẫn đến ổn định bờ sông. Đây là những hướng nghiên cứu cần được tiếp tục xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao độ tin cậy của đánh giá ổn định bờ sông trong điều kiện biến đổi thủy văn ngày càng phức tạp.

Tài liệu tham khảo

- [1]. 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.
- [2]. C. N. Thảng, N. T. Bình, và T. V. Ty, "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.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. N. T. H. Điệp, V. Q. Minh, P. N. Trường, L. Thành, và L. Vinh, "Diễn tiến tình hình sạt lở ven bờ sông Tiền và sông Hậu, vùng Đồng bằng sông Cửu Long," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, vol. 55, pp. 125-133, 2019.
- [6]. H. C. Hoài, N. T. Bảy, Đ. N. Khôi, và T. N. Q. Nga, "Phân tích nguyên nhân gây gia tăng xói lở bờ sông ở đồng bằng sông Cửu Long," *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, vol. 703, pp. 42-50, 2019.
- [7]. L. T. Phát, Đ. V. Duy, C. T. Hiếu, N. T. An, K. Lavane, và T. V. Ty, "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.
- [8]. C. N. Thảng, N. T. Bình, và T. V. Ty, "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.
- [9]. N. H. Khuyên, N. T. Nụ, và 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.
- [10]. C. N. Thảng, P. H. H. Giang, L. H. Trí, và N. P. V. Anh, "Ảnh hưởng của tải trọng đến ổn định bờ sông Ông Chường, tỉnh An Giang," *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*, vol. 13, no. 06, pp. 84-Trang 89, 2023.
- [11]. T. T. Kim *et al.*, "Modifying BEHI (Bank Erosion Hazard Index) to map and assess the levels of potential riverbank erosion of highly human impacted rivers: a case study for Vietnamese Mekong river system," *Environmental Earth Sciences*, vol. 82, no. 23, p. 554, 2023.

- [12]. 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.
- [13]. P. L. M. Duyên, N. V. Bé, Đ. T. Anh, và 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.
- [14]. N. T. Tựu và 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]. Chi cục Thủy lợi Thành phố Cần Thơ. "Hồ sơ thiết kế kè sông Ô Môn" 2025.
- [16]. Viện Khoa học Tài nguyên Môi trường và Biến đổi khí hậu. "Mức nước đặc trưng năm trạm Long Xuyên – sông Hậu," 2024.
- [17]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn. "Tiêu chuẩn ngành 14TCN 141-2005 Quy phạm đo vẽ mặt cắt, bình đồ địa hình công trình thủy lợi các tỷ lệ 1:200; 1:500; 1:1000; 1:2000; 1:5000," 2005.
- [18]. Bộ Khoa học và Công nghệ. "Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 2737:2023 về tải trọng và tác động," 2023.