



Đánh giá ảnh hưởng của khai thác cát đến biến đổi hình thái lòng dẫn và ổn định bờ sông Hậu khu vực Long Xuyên – Chợ Mới bằng mô hình MIKE 21 và Geo-Slope

Phạm Đức Hùng¹, Phạm Thị Thu Hằng^{1*}, Bùi Thị Bảo Anh¹, Nguyễn Thị Nhân¹,
Phan Kiều Ngân¹, Trần Thị Thúy Hương¹, Nguyễn Thùy Linh¹

¹*Viện Các Khoa học Trái đất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST)*

Email tác giả liên hệ: ptthang0105@ies.vast.vn

Tóm tắt:

Hoạt động khai thác cát lòng sông trong những năm gần đây đã gây ra nhiều biến động về hình thái lòng dẫn và làm gia tăng nguy cơ sạt lở bờ sông tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Nghiên cứu này sử dụng mô hình thủy động lực hai chiều MIKE 21 để mô phỏng chế độ dòng chảy và vận chuyển trầm tích tích tụ đoạn sông Hậu khu vực Long Xuyên – Chợ Mới, tỉnh An Giang nhằm đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến biến đổi địa hình đáy sông. Đồng thời, mô hình địa kỹ thuật Geo-Slope/W được áp dụng để tính toán độ ổn định bờ sông dưới tác động của các kịch bản khai thác cát khác nhau. Kết quả hiệu chỉnh mô hình cho thấy sự phù hợp tốt giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo với hệ số tương quan $R^2 > 0,85$ đối với mực nước và $R^2 \approx 0,86$ đối với hàm lượng trầm tích lơ lửng (SSC). Kết quả mô phỏng cho thấy hoạt động khai thác cát có thể làm hạ thấp cục bộ địa hình đáy sông với độ sâu lớn nhất khoảng 2,5 m sau 270 ngày khai thác, tuy nhiên phạm vi biến đổi chủ yếu tập trung tại khu vực khai thác và giảm dần về phía hai bờ sông. Sau khi kết thúc khai thác, khu vực đáy sông có xu hướng được bồi lấp trở lại bởi trầm tích từ thượng nguồn và các nhánh sông lân cận. Kết quả tính toán ổn định bờ sông bằng mô hình Geo-Slope/W cho thấy hệ số an toàn nhỏ nhất đạt $FS_{\min} = 1,448-1,761$, lớn hơn giá trị giới hạn thiết kế, cho thấy bờ sông vẫn đảm bảo điều kiện ổn định trong các kịch bản khai thác. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá tác động của khai thác cát đến hình thái lòng dẫn và hỗ trợ công tác quản lý khai thác cát bền vững tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: Khai thác cát lòng sông; biến đổi hình thái sông; mô hình MIKE 21; ổn định bờ sông; Đồng bằng sông Cửu Long.

Ngày nhận bài: 24/02/2026 Ngày sửa lại: 11/03/2026 Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2026 Ngày xuất bản: 30/04/2026

Assessment of the Impacts of Sand Mining on Riverbed Morphology and Riverbank Stability in the Hau River Reach between Long Xuyen and Cho Moi Using MIKE 21 and Geo-Slope Models

Pham Duc Hung¹, Pham Thi Thu Hang^{1*}, Bui Thi Bao Anh¹, Nguyen Thi Nhan¹,
Phan Kieu Ngan¹, Tran Thi Thuy Huong¹, Nguyen Thuy Linh¹

Institute of Earth Sciences, VAST

Corresponding Author Email: ptthang@ies.vast.vn

Abstract:

Sand mining in river channels has increasingly altered river morphology and intensified riverbank erosion in many areas of the Mekong Delta. This study applies the two-dimensional hydrodynamic model MIKE 21 to simulate flow dynamics and sediment transport in the Hau River reach between Long Xuyen City and Cho Moi District, An Giang Province, in order to evaluate the impacts of sand mining on riverbed morphology. In addition, the geotechnical model Geo-Slope/W was used to assess riverbank stability under different sand-mining scenarios. Model calibration results show good agreement between simulated and observed data, with a correlation coefficient $R^2 > 0.85$ for water level and $R^2 \approx 0.86$ for suspended sediment concentration (SSC). Simulation results indicate that sand mining may locally lower the riverbed elevation by up to approximately 2.5 m after 270 days of excavation, while the morphological changes are mainly concentrated within the mining area and gradually decrease toward both riverbanks. After the mining activities cease, the riverbed tends to be naturally refilled by sediments transported from upstream sections and adjacent channels. The riverbank stability analysis using the Geo-Slope/W model shows that the minimum safety factor ranges from 1.448 to 1.761, which is higher than the design safety threshold, indicating that the riverbanks remain stable under the considered mining scenarios. The

results provide a scientific basis for assessing the impacts of sand mining on river morphology and support sustainable river-sand management in the Mekong Delta.

Key words: Sand mining; river morphology; MIKE 21 model; riverbank stability; Mekong Delta.

Submission received: 24/02/2026

Revised: 11/03/2026

Accepted: 15/03/2026

Published: 30/04/2026

1. Giới thiệu.

Hệ thống sông Mê Kông là một trong những hệ thống sông lớn nhất thế giới, đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp nguồn nước, trầm tích và duy trì sự ổn định hình thái cho vùng Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). Trong hệ thống này, sông Tiền và sông Hậu là hai nhánh chính khi sông Mê Kông chảy vào lãnh thổ Việt Nam, mang theo một lượng lớn nước và phù sa từ thượng nguồn, góp phần duy trì sự phát triển và ổn định của hệ sinh thái cũng như các hoạt động kinh tế – xã hội trong khu vực [1,2].

Quá trình vận chuyển và phân bố trầm tích trong hệ thống sông Mê Kông đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành và duy trì hình thái lòng dẫn. Trầm tích được vận chuyển từ thượng nguồn theo dòng chảy và lắng đọng tại các khu vực khác nhau của hệ thống sông, tạo nên các dạng địa hình như bãi bồi, cồn cát và các vùng tích tụ trầm tích. Sự cân bằng giữa quá trình vận chuyển và lắng đọng trầm tích quyết định sự ổn định của lòng sông và bờ sông. Khi cân bằng trầm tích bị phá vỡ, các quá trình xói lở hoặc bồi tụ sẽ diễn ra mạnh mẽ, dẫn đến sự thay đổi hình thái lòng dẫn và làm gia tăng nguy cơ sạt lở bờ sông [3,4].

Trong những thập kỷ gần đây, nhiều nghiên cứu cho thấy lượng trầm tích từ thượng nguồn sông Mê Kông về ĐBSCL đang có xu hướng suy giảm đáng kể do tác động của các hoạt động nhân sinh, đặc biệt là sự phát triển của các công trình thủy điện và khai thác cát lòng sông [5,6]. Sự suy giảm nguồn trầm tích này làm thay đổi cân bằng trầm tích trong hệ thống sông, dẫn đến hiện tượng hạ thấp đáy sông, gia tăng xói lở bờ và làm mất ổn định hình thái lòng dẫn tại nhiều khu vực của ĐBSCL [7,8].

Sông Hậu là một trong hai nhánh chính của hệ thống sông Mê Kông tại Việt Nam và đóng vai trò quan trọng trong việc vận chuyển nước và trầm tích về khu vực hạ lưu. Đoạn sông Hậu chảy qua thành phố Long Xuyên và huyện Chợ Mới, tỉnh An Giang là khu vực có chế độ thủy động lực phức tạp do chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy từ thượng nguồn, thủy triều và quá trình phân lưu dòng chảy. Trong khu vực này, các quá trình xói lở và bồi tụ diễn ra mạnh mẽ, đặc biệt tại các đoạn sông cong, khu vực hợp lưu và các đoạn sông phân lạch. Những biến động này làm thay đổi trực động lực dòng chảy, dẫn đến sự biến dạng hình thái lòng dẫn và làm gia tăng nguy cơ sạt lở bờ sông [9,10].

Bên cạnh các yếu tố tự nhiên, hoạt động khai thác cát lòng sông trong những năm gần đây đang diễn ra ngày càng mạnh mẽ tại nhiều khu vực của ĐBSCL. Hoạt động này có thể làm thay đổi chế độ thủy động lực, làm mất cân bằng trầm tích và dẫn đến sự hạ thấp cao trình đáy sông. Nhiều nghiên cứu cho thấy khai thác cát với quy mô lớn có thể làm gia tăng quá trình xói lở lòng dẫn và gây mất ổn định bờ sông, đặc biệt tại các khu vực có điều kiện thủy động lực phức tạp [11,12].

Để đánh giá và dự báo các quá trình biến đổi hình thái lòng dẫn, các mô hình thủy động lực hai chiều hiện nay được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu thủy văn – địa mạo sông. Các mô hình như MIKE 21 cho phép mô phỏng chi tiết trường dòng chảy, vận chuyển bùn cát và sự biến đổi địa hình đáy sông dưới các điều kiện thủy lực khác nhau. Tuy nhiên, các mô hình thủy động lực chủ yếu tập trung vào

mô phỏng quá trình vận chuyển trầm tích và biến đổi lòng dẫn, trong khi việc đánh giá nguy cơ mất ổn định bờ sông cần được xem xét thêm dưới góc độ địa kỹ thuật. Vì vậy, việc kết hợp mô hình thủy động lực với các mô hình phân tích ổn định mái dốc như Geo-Slope cho phép đánh giá toàn diện hơn ảnh hưởng của các biến đổi hình thái lòng dẫn đến nguy cơ sạt lở bờ sông.

Trong nghiên cứu này, mô hình thủy động lực hai chiều MIKE 21 được sử dụng để mô phỏng chế độ dòng chảy và vận chuyển trầm tích tại đoạn sông Hậu thuộc khu vực Long Xuyên – Chợ Mới. Đồng thời, mô hình Geo-Slope được áp dụng để đánh giá độ ổn định bờ sông dưới tác động của các kịch bản khai thác cát khác nhau. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến diễn biến hình thái lòng sông và nguy cơ sạt lở bờ sông, từ đó cung cấp cơ sở khoa học phục vụ công tác quản lý và khai thác bền vững tài nguyên cát lòng sông trong khu vực nghiên cứu.

2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu nằm trên đoạn sông Hậu chảy qua xã Mỹ Hòa Hưng (thành phố Long Xuyên) và xã Long Giang (huyện Chợ Mới, tỉnh An Giang). Đây là đoạn sông có đặc điểm phân lạch với chế độ thủy động lực phức tạp do chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy từ thượng nguồn, thủy triều và sự phân lưu giữa các nhánh sông trong hệ thống sông Mê Kông.

Đoạn sông nghiên cứu có chiều dài khoảng 3,3 km, chiều rộng lòng sông dao động từ 260 m đến 480 m. Địa hình đáy sông tương đối phức tạp với sự xen kẽ giữa các vùng vực sâu và các bãi bồi cát ngầm. Trắc diện ngang lòng sông có xu hướng nghiêng về phía bờ trái, trong khi trục dòng chảy chính thường lệch về phía bờ phải. Tại nhiều vị trí, đặc biệt là các đoạn sông cong hoặc khu vực hợp lưu, vận tốc dòng chảy lớn có thể tạo ra các xoáy nước mạnh, làm gia tăng quá trình xói lở đáy và sạt lở bờ sông.

Khu vực này cũng ghi nhận nhiều biến động hình thái trong những thập kỷ gần đây, với sự hình thành và phát triển của các cồn cát như cồn Sóc Chét và cồn An Thạnh Trung. Những biến động này cho thấy sự thay đổi đáng kể trong chế độ vận chuyển và phân bố trầm tích của sông Hậu.

2.2. Số liệu sử dụng

Các loại số liệu được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm số liệu địa hình, thủy văn và trầm tích nhằm phục vụ việc thiết lập và hiệu chỉnh mô hình thủy động lực.

(1) Số liệu địa hình

Số liệu địa hình đáy sông được thu thập từ các bản đồ địa hình tỷ lệ 1:10.000 và 1:5.000 do các cơ quan chuyên môn cung cấp. Ngoài ra, dữ liệu DEM khu vực hạ lưu sông Mê Kông do Ủy hội sông Mê Kông (MRC) phát hành cũng được sử dụng để xây dựng địa hình nền cho mô hình.

Các dữ liệu địa hình được chuẩn hóa về hệ tọa độ VN2000, múi chiếu UTM zone 48 để đảm bảo tính thống nhất trong quá trình thiết lập mô hình.

(2) Số liệu thủy văn

Số liệu thủy văn sử dụng trong nghiên cứu bao gồm:

- Mức nước theo giờ tại các trạm thủy văn Châu Đốc, Tân Châu, Cần Thơ và Mỹ Thuận;
- Lưu lượng dòng chảy tại các trạm thượng nguồn;
- Số liệu thủy triều khu vực hạ lưu.

Các số liệu này được sử dụng để thiết lập điều kiện biên cho mô hình thủy động lực.

(3) Số liệu trầm tích

Số liệu hàm lượng trầm tích lơ lửng (SSC) được thu thập từ các trạm quan trắc thủy văn tại Châu Đốc, Tân Châu và Cần Thơ. Ngoài ra, các mẫu trầm tích đáy được phân tích nhằm xác định thành phần cấp phối hạt.

Kết quả phân tích cho thấy trầm tích đáy sông chủ yếu là cát hạt nhỏ đến trung bình, chiếm khoảng 70–80% thành phần vật liệu đáy, trong khi hàm lượng bùn sét chiếm tỷ lệ nhỏ hơn.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, hai mô hình toán được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến chế độ thủy động lực và ổn định bờ sông:

- mô hình thủy động lực hai chiều **MIKE 21**
- mô hình phân tích ổn định mái dốc **Geo-Slope**

(1) Mô hình MIKE 21

MIKE 21 là mô hình thủy động lực hai chiều được phát triển bởi Viện Thủy lực Đan Mạch (DHI), được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu thủy văn và hình thái sông. Mô hình này giải hệ phương trình Saint-Venant hai chiều để mô phỏng dòng chảy nông, cho phép tính toán trường vận tốc, mực nước và quá trình vận chuyển trầm tích trong hệ thống sông.

Trong nghiên cứu này, mô hình MIKE 21 được sử dụng để:

- mô phỏng chế độ thủy động lực của đoạn sông nghiên cứu;
- tính toán vận chuyển trầm tích;
- đánh giá sự thay đổi hình thái đáy sông dưới các kịch bản khai thác cát.

(2) Mô hình Geo-Slope

Geo-Slope là phần mềm được sử dụng để phân tích ổn định mái dốc và đánh giá nguy cơ trượt lở. Trong nghiên cứu này, mô hình Geo-Slope được áp dụng để tính toán hệ số ổn định (Factor of Safety – FS) của bờ sông dựa trên phương pháp cân bằng giới hạn Morgenstern–Price.

Phương pháp này cho phép đánh giá khả năng trượt lở của mái dốc bờ sông dưới tác động của sự thay đổi hình thái đáy sông do khai thác cát.

2.4. Thiết lập và hiệu chỉnh mô hình

(1) Thiết lập lưới tính

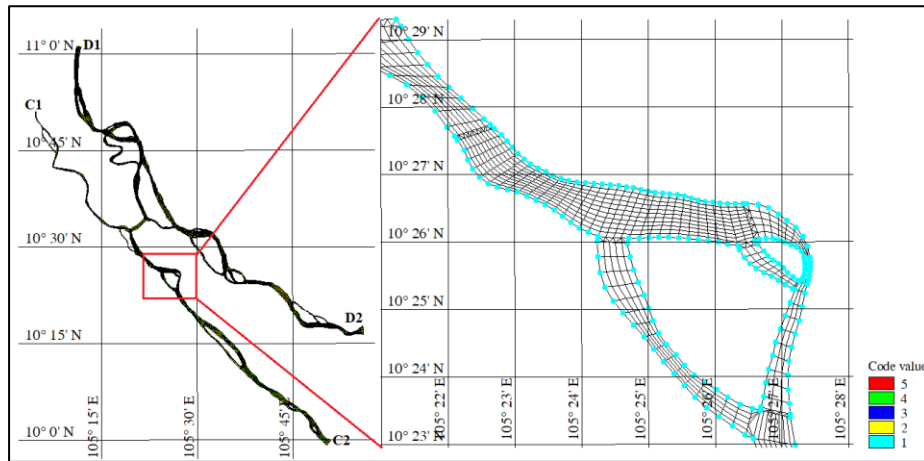
Miền tính toán được xây dựng bao gồm đoạn sông Hậu từ trạm Châu Đốc đến trạm Cần Thơ và đoạn sông Tiền từ trạm Tân Châu đến trạm Mỹ Thuận.

Lưới tính được thiết lập dưới dạng lưới tam giác không đều nhằm mô tả chi tiết địa hình đáy sông và hình dạng lòng dẫn. Tổng số nút lưới khoảng vài nghìn nút, với kích thước ô lưới nhỏ nhất khoảng 100 m tại khu vực nghiên cứu và lớn hơn ở các vùng xa hơn nhằm tối ưu hóa thời gian tính toán.

(2) Điều kiện biên

Các điều kiện biên được thiết lập cho mô hình bao gồm:

- Biên thượng lưu: lưu lượng dòng chảy và hàm lượng trầm tích tại các trạm Châu Đốc và Tân Châu;
- Biên hạ lưu: mực nước triều tại các trạm Cần Thơ và Mỹ Thuận;
- Các biên đóng được giả định có vận tốc pháp tuyến bằng 0.



Hình 2. Lưới tính khu vực nghiên cứu

(3) Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Hiệu chỉnh module thủy động lực (HD)

Việc hiệu chỉnh các thông số của module thủy động lực (HD) đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết lập mô hình, vì độ chính xác của kết quả mô phỏng thủy động lực sẽ quyết định độ tin cậy của các bước mô phỏng tiếp theo như vận chuyển trầm tích và biến đổi hình thái đáy sông. Quá trình hiệu chỉnh được thực hiện thông qua việc điều chỉnh các thông số mô hình và so sánh kết quả mô phỏng với số liệu quan trắc thực đo.

Trước hết, miền tính toán và lưới tính được kiểm tra nhằm đảm bảo tính hợp lý của mô hình. Các dữ liệu đầu vào như địa hình đáy sông, số liệu thủy văn và các điều kiện biên được rà soát để phát hiện và loại bỏ các sai số có thể phát sinh, đặc biệt tại những khu vực có số liệu địa hình cũ hoặc chưa được cập nhật đầy đủ.

Bước thời gian tính toán (Δt) được lựa chọn sao cho đảm bảo điều kiện ổn định của mô hình theo tiêu chuẩn Courant–Friedrichs–Lewy ($CFL \leq 1$). Trong quá trình hiệu chỉnh, nếu cần thiết, cấu trúc lưới tính và vị trí các biên mở hoặc biên đóng được điều chỉnh nhằm tối ưu hóa tốc độ tính toán cũng như đảm bảo tính ổn định của mô hình.

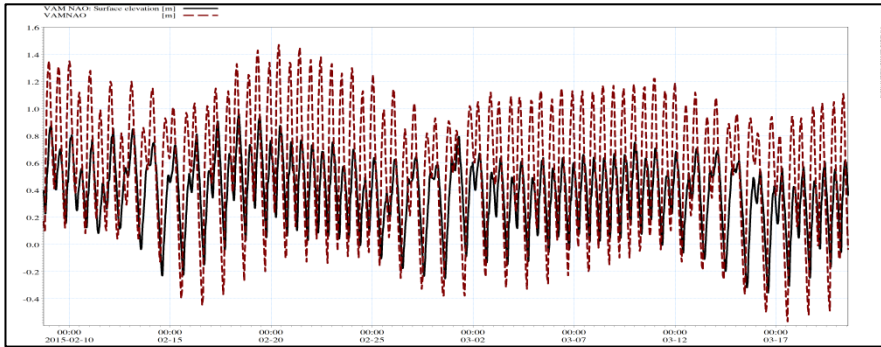
Các thông số thủy lực chính của mô hình được hiệu chỉnh bao gồm hệ số nhám Manning (M), hệ số khuếch tán rối và các ngưỡng khô – ướt của ô lưới. Việc hiệu chỉnh các thông số này được thực hiện theo phương pháp thử – sai nhằm tối thiểu hóa hàm mục tiêu K trong mô hình. Kết quả hiệu chỉnh cho thấy mô hình mô phỏng khá tốt diễn biến mực nước tại các trạm quan trắc.

Kết quả kiểm định mô hình được thực hiện thông qua việc so sánh mực nước mô phỏng với số liệu thực đo tại trạm Vàm Nao. Hệ số tương quan giữa kết quả mô phỏng và số liệu quan trắc đạt giá trị $R^2 > 0$ đối với phương án 1 và $R^2 > 0,87$ đối với phương án 2, cho thấy mô hình có khả năng tái hiện khá chính xác chế độ thủy động lực trong khu vực nghiên cứu.

Miền tính toán và lưới tính được xây dựng đảm bảo các tiêu chí sau: (i) mô tả đầy đủ các đặc trưng thủy động lực của khu vực nghiên cứu; (ii) độ phân giải lưới đủ mịn tại vùng nghiên cứu chính nhằm mô phỏng chi tiết các yếu tố địa hình và

dòng chảy; (iii) tối ưu hóa tốc độ tính toán, đảm bảo điều kiện ổn định với chỉ số CFL $\leq 0,8$ trong quá trình mô phỏng; và (iv) đảm bảo sự phân bố độ phân giải lưới hợp lý nhằm duy trì tính liên tục của các quá trình thủy động lực trong mô hình.

Kết quả so sánh giữa mực nước mô phỏng và mực nước thực đo tại trạm Vàm Nao được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. So sánh kết quả mô phỏng và thực đo mực nước tại trạm Vàm Nao

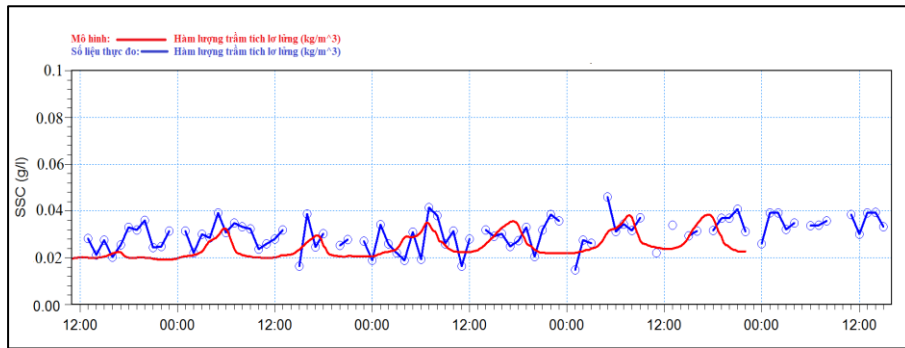
Hiệu chỉnh module vận chuyển trầm tích (MT)

Sau khi hoàn thành hiệu chỉnh module thủy động lực, module vận chuyển trầm tích (MT) được thiết lập và hiệu chỉnh nhằm mô phỏng quá trình vận chuyển và phân bố trầm tích trong khu vực nghiên cứu. Quá trình hiệu chỉnh module MT tập trung vào việc mô phỏng vận chuyển trầm tích lơ lửng kết dính và quá trình trao đổi trầm tích giữa cột nước và đáy sông.

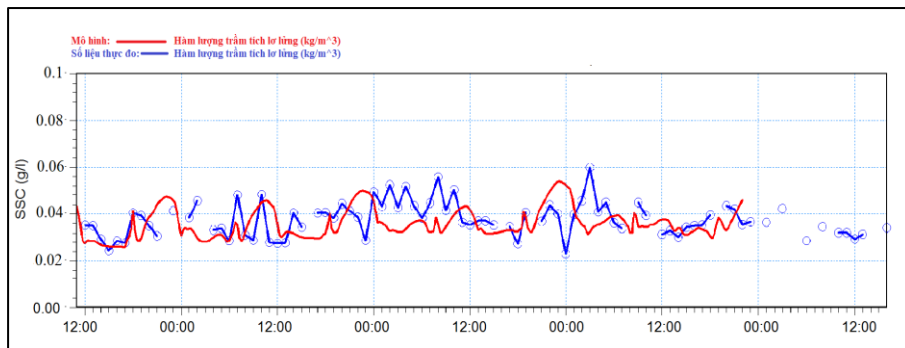
Các thông số liên quan đến vận chuyển trầm tích được điều chỉnh dựa trên việc so sánh kết quả mô phỏng với số liệu quan trắc hàm lượng trầm tích lơ lửng (SSC) tại các trạm đo trong khu vực nghiên cứu. Quá trình hiệu chỉnh được thực hiện lặp lại nhiều lần nhằm đảm bảo sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo.

Kết quả so sánh giữa hàm lượng trầm tích lơ lửng tính toán và số liệu quan trắc tại trạm Vàm Nao và Cần Thơ được thể hiện trong Hình 4 và Hình 5. Kết quả cho thấy mô hình có khả năng mô phỏng khá tốt cả về giá trị SSC và xu thế biến thiên của SSC theo chu kỳ triều.

Độ chính xác của mô hình được đánh giá thông qua hệ số tương quan giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo, với giá trị $R^2=0,86$. Kết quả này cho thấy module MT có khả năng mô phỏng hợp lý quá trình vận chuyển trầm tích lơ lửng trong khu vực nghiên cứu.



Hình 4. So sánh kết quả mô hình và thực đo SSC tại trạm đo Vàm Nao

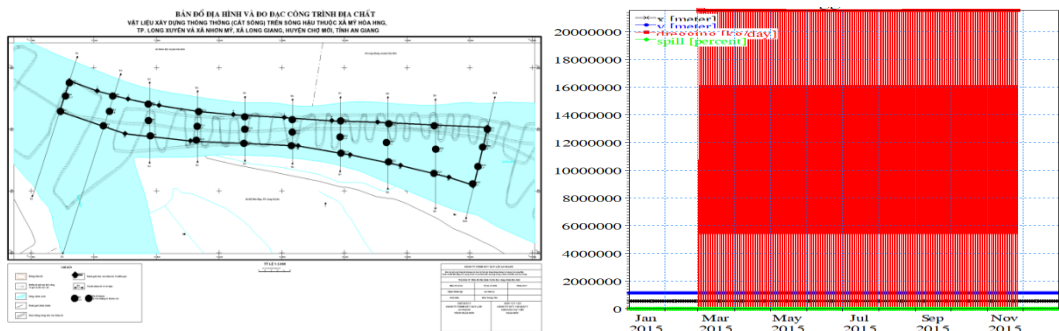


Hình 5. So sánh kết quả mô hình và thực đo SSC tại trạm đo Cần Thơ

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Các kịch bản khai thác cát và biến đổi địa hình đáy sông

Hoạt động khai thác cát tại khu vực nghiên cứu được giả định diễn ra trong khoảng thời gian từ 8h đến 17h hàng ngày, từ 01/3/2015 đến 30/11/2015. Khối lượng khai thác trung bình khoảng 2 tấn hỗn hợp cát và bùn mỗi ngày, tùy thuộc vào vị trí đặt điểm hút cát. Vị trí khai thác và khối lượng khai thác được thể hiện trong Hình 6.

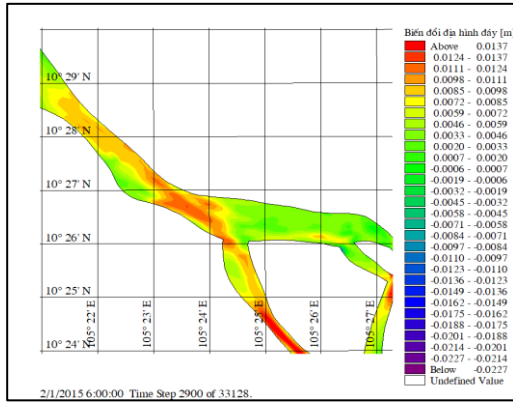


Hình 6. Vị trí và khối lượng khai thác cát

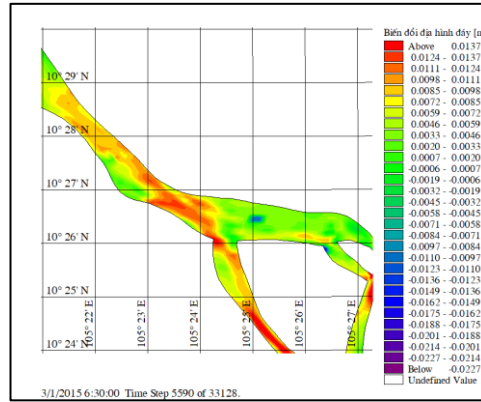
a) Biến đổi địa hình đáy trước khi khai thác

Trước khi tiến hành khai thác, địa hình đáy sông tại khu vực nghiên cứu được mô phỏng nhằm xác định trạng thái ban đầu của lòng dẫn. Kết quả mô phỏng cho thấy đáy sông có sự phân bố độ sâu không đồng đều, với các khu vực hố sâu và bãi bồi xen kẽ nhau trong lòng sông. Sự phân bố này phản ánh đặc điểm thủy động lực và quá trình vận chuyển trầm tích tự nhiên của khu vực nghiên cứu.

Kết quả mô phỏng biến đổi địa hình đáy trong 3 ngày đầu khai thác cho thấy sự thay đổi cục bộ tại vị trí hút cát, trong khi các khu vực lân cận hầu như chưa có sự thay đổi đáng kể về cao trình đáy sông (Hình 7 và Hình 8).



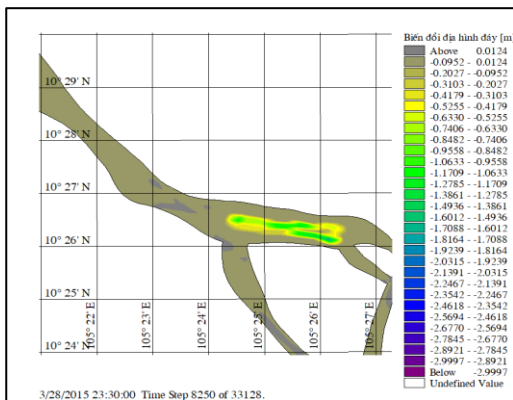
Hình 7. Biến đổi địa hình đáy trước khai thác cát



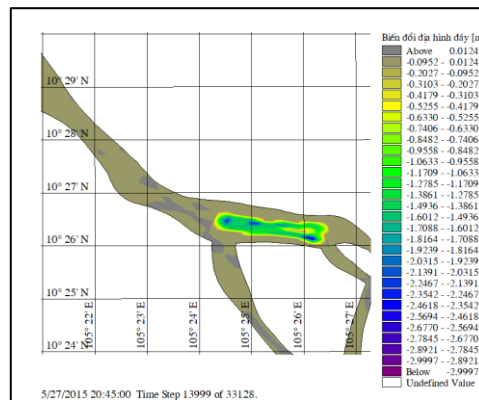
Hình 8. Biến đổi địa hình đáy trong 3 ngày khai thác

b) Biến đổi địa hình đáy trong thời gian khai thác cát

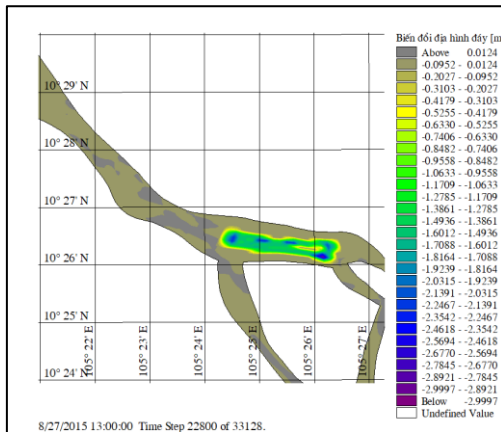
Kết quả mô phỏng cho thấy hoạt động khai thác cát đã làm thay đổi địa hình đáy sông theo thời gian. Các kết quả biến đổi địa hình đáy được thể hiện sau các khoảng thời gian khai thác khác nhau gồm 3 ngày, 1 tháng, 3 tháng, 5 tháng và 9 tháng (Hình 8– Hình 12).



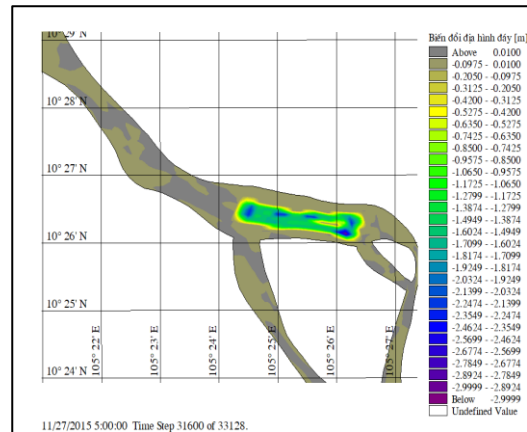
Hình 9. Biến đổi địa hình đáy trong 1 tháng khai thác



Hình 10. Biến đổi địa hình đáy trong 3 tháng khai thác



Hình 11. Biến đổi địa hình đáy trong 5 tháng khai thác



Hình 12. Biến đổi địa hình đáy trong 9 tháng khai thác

Theo kết quả mô phỏng, bề mặt địa hình đáy sông tại khu vực khai thác có xu hướng hạ thấp cao trình so với trạng thái ban đầu, với độ sâu lớn nhất đạt khoảng – 12 m (theo hệ cao độ quốc gia) tại vị trí nạo vét. Sau khoảng 270 ngày khai thác, đáy sông tại vị trí nạo vét được hạ thấp thêm khoảng 2,5 m, sau đó độ sâu giảm dần về hai phía bờ.

Kết quả mô phỏng cũng cho thấy sự biến đổi địa hình chủ yếu tập trung tại khu vực khai thác, trong khi các khu vực xa hơn chỉ chịu ảnh hưởng ở mức độ nhỏ. Điều này cho thấy tác động của hoạt động khai thác cát chủ yếu mang tính cục bộ trong phạm vi khu vực nạo vét.

c) Biến đổi địa hình đáy sau khi kết thúc khai thác cát

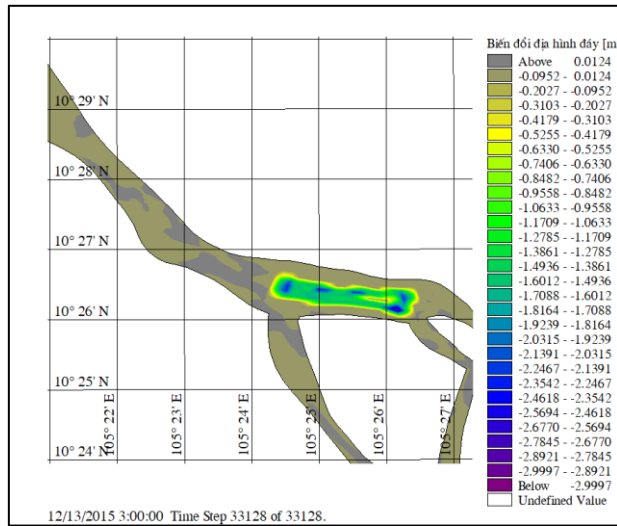
Sau khi kết thúc hoạt động khai thác, mô hình tiếp tục được sử dụng để mô phỏng quá trình biến đổi địa hình đáy sông trong giai đoạn phục hồi tự nhiên của hệ thống sông.

Kết quả mô phỏng cho thấy sau 1 tháng kể từ khi kết thúc khai thác, khu vực đáy sông có xu hướng được bồi lấp trở lại bởi trầm tích được vận chuyển từ thượng nguồn (trạm Châu Đốc) và từ sông Tiền thông qua sông Vàm Nao. Ngoài ra, một phần trầm tích cũng được cung cấp từ các hoạt động nhân sinh tại khu vực lân cận.

Tổng khối lượng trầm tích bị lấy đi trong quá trình khai thác ước tính khoảng 20.500 tấn, với tỷ trọng trung bình của hỗn hợp bùn cát khoảng 1,2 tấn/m³. Sau khi trừ đi khoảng 10% vật liệu rơi trở lại lòng sông trong quá trình khai thác, khối lượng trầm tích thực tế bị lấy đi khoảng 18.450 tấn.

Hình 13. Biến đổi địa hình đáy sau khi kết thúc khai thác 1 tháng

Kết quả mô phỏng cho thấy sự biến đổi lòng dẫn chủ yếu xảy ra tại vị trí khai thác với độ hạ thấp đáy sông lớn nhất khoảng 2,5 m, sau đó giảm dần về hai phía bờ với giá trị khoảng 0,2 m tại vị trí cách bờ khoảng 200 m. Với mức độ biến đổi này, vận tốc dòng chảy trong khu vực hầu như không bị thay đổi đáng kể.



d) Phân tích cân bằng trầm tích trong khu vực nghiên cứu

Theo nguyên lý cân bằng trầm tích của Mayer (1990), sự ổn định của đáy sông phụ thuộc vào quan hệ giữa lượng trầm tích vào (In) và lượng trầm tích ra (Out):

Khi $In = Out$, hệ thống sông đạt trạng thái cân bằng động lực.

Khi $In > Out$, quá trình bồi tụ xảy ra.

Khi $In < Out$, đáy sông có xu hướng bị xói sâu.

Đối với khu vực nghiên cứu, thành phần trầm tích lòng sông chủ yếu là hạt nhỏ đến trung bình, có lẫn một phần nhỏ bùn và mùn hữu cơ. Vì vậy, lượng trầm tích đáy chủ yếu được xác định thông qua lượng cát vận chuyển trong lòng sông.

Kết quả mô phỏng cho thấy khu vực nghiên cứu có quá trình bồi tụ tự nhiên tương đối mạnh, thể hiện qua sự hình thành và phát triển của các cồn cát và bãi bồi trong lòng sông. Các quá trình bồi tụ và xói lở diễn ra xen kẽ và mang tính cục bộ theo không gian.

Tuy nhiên, hoạt động nạo vét có thể mang lại một số tác động tích cực nhất định, chẳng hạn như loại bỏ các phần bồi lắng bất thường giữa lòng sông, góp phần tái lập mặt cắt cân bằng của lòng dẫn và cải thiện điều kiện giao thông thủy trong khu vực.

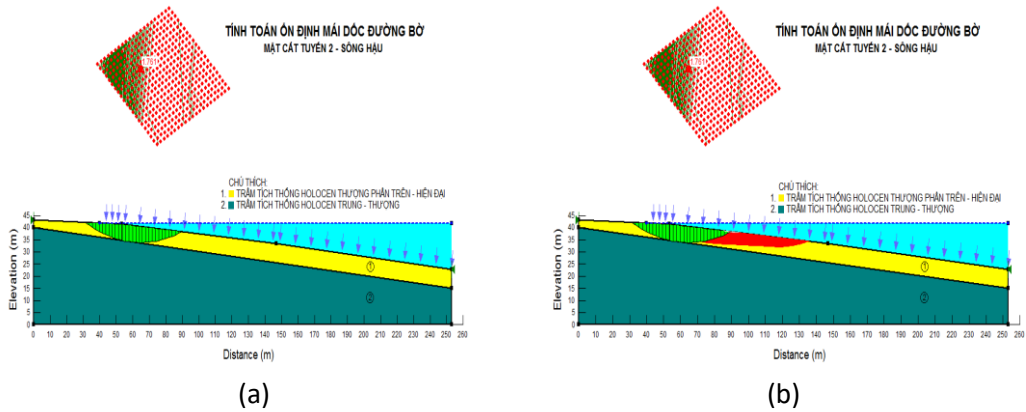
3.2. Kết quả tính toán ổn định bờ sông

Để đánh giá nguy cơ sạt lở bờ sông dưới tác động của hoạt động nạo vét, mô hình Geo-Slope/W đã được sử dụng để tính toán ổn định mái dốc bờ sông và mái dốc luồng đào.

Mức độ ổn định của mái dốc được đánh giá thông qua hệ số an toàn (Factor of Safety – FS) theo phương pháp Morgenstern–Price. Theo tiêu chuẩn thiết kế, khi $FS \geq 1,3 - 1,4$, mái dốc được coi là ổn định và đảm bảo an toàn.

Do phần lớn các mái bờ trong khu vực nghiên cứu nằm dưới mực nước sông, các mô hình tính toán đều xét đến áp lực nước lỗ rỗng dương trong khối đất. Phương pháp Morgenstern–Price cho phép thỏa mãn đồng thời hai điều kiện cân bằng lực và cân bằng mômen trong quá trình tính toán.

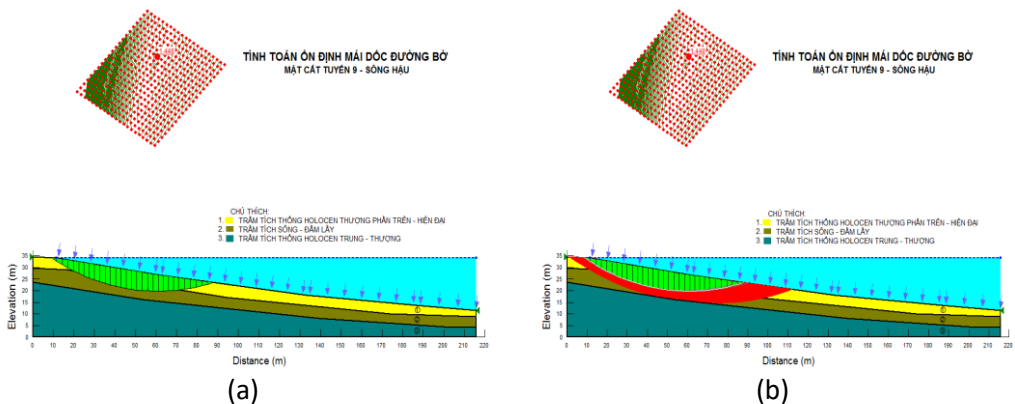
Kết quả tính toán tại các mặt cắt điển hình trong khu vực nghiên cứu cho thấy hệ số an toàn nhỏ nhất đạt $FS_{min} = 1,761$ (Hình 14). Giá trị này tương ứng với cung trượt yếu nhất và vẫn lớn hơn giá trị giới hạn thiết kế, cho thấy mái bờ tại khu vực nghiên cứu đảm bảo điều kiện ổn định trong quá trình khai thác.



Hình 14. Kết quả tính toán độ ổn định bờ trên mặt cắt tuyến 2 tại các vị trí nghiên cứu khi tiến hành hút và nạo vét

a) Hình dạng cung trượt yếu nhất ($FS = 1,761$) ; (b) Mật độ phân bố các cung trượt yếu;

Tương tự, tại các vị trí khác trong khu vực nghiên cứu, hệ số an toàn nhỏ nhất được tính toán đạt $FS_{min} = 1,448$ (Hình 15). Kết quả này cho thấy bờ sông trong khu vực vẫn nằm trong trạng thái ổn định và ít có nguy cơ xảy ra trượt lở lớn dưới tác động của hoạt động nạo vét.



Hình 15. Kết quả tính toán độ ổn định bờ sông Hậu trên mặt cắt tuyến 9 tại khu vực nghiên cứu khi tiến hành nạo vét

(a) Hình dạng cung trượt yếu nhất ($FS = 1,448$) ; (b) Mật độ phân bố các cung trượt yếu;

Nhìn chung, các kết quả mô phỏng cho thấy hoạt động khai thác cát trong phạm vi nghiên cứu chỉ gây ra những biến đổi cục bộ về địa hình đáy sông và không làm suy giảm đáng kể mức độ ổn định của bờ sông.

4. Thảo luận

4.1. Ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến biến đổi hình thái lòng dẫn

4.3. Ý nghĩa đối với quản lý khai thác cát và ổn định lòng dẫn

Kết quả nghiên cứu cho thấy hoạt động khai thác cát với quy mô hợp lý có thể không gây ra những biến đổi lớn về hình thái lòng dẫn và ổn định bờ sông trong khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên, nếu hoạt động khai thác diễn ra với quy mô lớn hoặc kéo dài trong thời gian dài, sự mất cân bằng trầm tích có thể dẫn đến quá trình hạ thấp đáy sông và gia tăng nguy cơ xói lở bờ.

Trong bối cảnh hiện nay, khi nhu cầu khai thác cát phục vụ xây dựng ngày càng gia tăng, việc đánh giá tác động của hoạt động khai thác đến hệ thống sông là hết sức cần thiết. Các mô hình thủy động lực kết hợp với các mô hình địa kỹ thuật như trong nghiên cứu này cho phép mô phỏng và dự báo các kịch bản biến đổi hình thái sông, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc quy hoạch và quản lý khai thác cát một cách bền vững.

Ngoài ra, kết quả nghiên cứu cũng cho thấy việc kết hợp các mô hình thủy động lực và mô hình ổn định mái dốc là một hướng tiếp cận hiệu quả trong nghiên cứu các quá trình biến đổi hình thái sông và đánh giá nguy cơ sạt lở bờ sông. Phương pháp này có thể được áp dụng cho các khu vực khác trong hệ thống sông Mê Kông nhằm hỗ trợ công tác quản lý tài nguyên và giảm thiểu rủi ro thiên tai.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình thủy động lực hai chiều MIKE 21 kết hợp với mô hình phân tích ổn định mái dốc Geo-Slope/W nhằm đánh giá ảnh hưởng của hoạt động khai thác cát đến biến đổi hình thái lòng dẫn và ổn định bờ sông tại đoạn sông Hậu khu vực Long Xuyên – Chợ Mới, tỉnh An Giang. Các kết quả chính của nghiên cứu có thể tóm tắt như sau:

+ Mô hình thủy động lực MIKE 21 sau khi được hiệu chỉnh và kiểm định đã mô phỏng khá tốt chế độ mực nước và vận chuyển trầm tích trong khu vực nghiên cứu. Hệ số tương quan giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo đạt $R^2 > 0,85$ đối với mực nước và $R^2 \approx 0,86$ đối với hàm lượng trầm tích lơ lửng (SSC), cho thấy mô hình có độ tin cậy cao trong việc mô phỏng các quá trình thủy động lực và vận chuyển trầm tích.

+ Kết quả mô phỏng các kịch bản khai thác cát cho thấy hoạt động nạo vét đã làm hạ thấp cục bộ địa hình đáy sông, với độ sâu lớn nhất khoảng 2,5 m sau 270 ngày khai thác. Tuy nhiên, phạm vi biến đổi địa hình chủ yếu tập trung tại khu vực khai thác và giảm dần về phía hai bờ sông.

+ Sau khi kết thúc hoạt động khai thác, đáy sông có xu hướng được bồi lấp trở lại bởi trầm tích từ thượng nguồn và các nhánh sông lân cận, cho thấy hệ thống sông có khả năng tự điều chỉnh nhằm tái lập cân bằng trầm tích trong khu vực nghiên cứu.

Kết quả phân tích ổn định mái bờ bằng mô hình Geo-Slope/W cho thấy hệ số an toàn nhỏ nhất của các mái bờ trong khu vực nghiên cứu đạt $FS_{\min} = 1,448$ –

1,761, lớn hơn giá trị giới hạn thiết kế. Điều này cho thấy hoạt động khai thác cát trong phạm vi nghiên cứu không làm suy giảm đáng kể độ ổn định của bờ sông.

Nhìn chung, các kết quả nghiên cứu cho thấy hoạt động khai thác cát với quy mô hợp lý có thể chỉ gây ra những biến đổi cục bộ về địa hình đáy sông và chưa làm gia tăng đáng kể nguy cơ sạt lở bờ sông. Tuy nhiên, nếu hoạt động khai thác diễn ra với quy mô lớn hoặc kéo dài trong thời gian dài, sự mất cân bằng trầm tích có thể dẫn đến quá trình hạ thấp đáy sông và gia tăng nguy cơ xói lở bờ.

Kết quả của nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá tác động của khai thác cát đến hình thái lòng dẫn và ổn định bờ sông, đồng thời hỗ trợ các cơ quan quản lý trong việc quy hoạch và khai thác bền vững tài nguyên cát lòng sông trong khu vực Đồng bằng sông Cửu Long.

Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. K. Quyết, “Một số tiêu chí lựa chọn lạch chạy tàu trên đoạn sông phân lạch,” *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, no. 46, pp. 12–18, 2014.
- [2] L. M. Hùng, Đ. C. Sân, và N. D. Khang, “Ứng dụng mô hình toán đánh giá tác động của khai thác cát đến diễn biến hình thái sông Tiền đoạn Tân Châu – Hồng Ngự,” *Tạp chí Khoa học Thủy lợi*, no. 32, pp. 45–53, 2015.
- [3] N. V. Manh, N. V. Dung, N. N. Hung, B. Merz, and H. Apel, “Large-scale suspended sediment transport and sediment deposition in the Mekong Delta,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, pp. 3033–3053, 2014.
- [4] N. V. Manh, N. V. Dung, N. N. Hung, M. Kumm, B. Merz, and H. Apel, “Future sediment dynamics in the Mekong Delta floodplains: Impacts of hydropower development, climate change and sea level rise,” *Global and Planetary Change*, vol. 127, pp. 22–33, 2015.
- [5] S. E. Darby et al., “Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity,” *Nature*, vol. 539, pp. 276–279, 2016.
- [6] D. V. Binh, S. Kantoush, T. Sumi, and N. P. Mai, “Impact of Lancang cascade dams on flow regimes of the Vietnamese Mekong Delta,” *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 62, pp. 139–144, 2018.
- [7] C. R. Hackney et al., “River bank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River,” *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 217–225, 2020.
- [8] S. Eslami et al., “Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation,” *Scientific Reports*, vol. 9, p. 18746, 2019.
- [9] L. P. Hoang et al., “Mekong River flow and hydrological extremes under climate change,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 3027–3041, 2016.
- [10] C. Jordan et al., “Sand mining in the Mekong Delta revisited – current scales of local sediment deficits,” *Scientific Reports*, vol. 9, p. 17823, 2019.
- [11] Geo-Slope International Ltd., *Geo-Slope User Guide*. Calgary, Canada, 1999.
- [12] Đ. H. Thanh, “Nghiên cứu tính toán dự báo sạt lở bờ sông dựa trên mô hình MIKE21C và phần mềm Geo-Slope,” Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, 2008.