

## Study and assessment of the situations and causes of erosion along the Hau riverbank in An Giang province during the period 2009–2019

Nguyen Ngoc Tien<sup>1,\*</sup>, Do Huy Cuong<sup>1</sup>, Pham Duc Hung<sup>1</sup>, Pham Viet Hong<sup>1</sup>, Do Ngoc Thuc<sup>1</sup>,  
Nguyen The Luan<sup>1</sup>, Vu Duy Vinh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics, VAST, Vietnam*

<sup>2</sup>*Institute of Marine Environment and Resources, VAST, Vietnam*

\*E-mail: [nntien@imgg.vast.vn](mailto:nntien@imgg.vast.vn)

Received: 26 December 2020; Accepted: 30 June 2021

©Vietnam Academy of Science and Technology (VAST)

### Abstract

This paper presents the results of applying a statistic, remote sensing (RS) technology, and 3D (three-dimensional) numerical model to study and assess the situations and the causes of riverbank erosion of Hau river in An Giang province during the period 2010–2019, chronologically and spatially. The results show that the erosion of the Hau river in An Giang province during the period 2010–2019 has steadily and widely occurred both in seasons. There is a significant difference in the Hau river's bank changing compared with the popular one in the past. The riverbank erosion process has occurred increasingly, with solid intensity, in a complex way, and even more in the dry season. It is identified that the causes of the erosion are from hydrological characteristics, river flow dynamics, the geological structure, soil characteristics, and the form of the riverbed and economic - social activities. The finding is a scientific foundation to resolve the riverbank stabilization.

**Keywords:** Erosion of river bank, Hau river, An Giang.

## Nghiên cứu, đánh giá hiện trạng và nguyên nhân xói lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang giai đoạn 2009–2019

Nguyễn Ngọc Tiến<sup>1,\*</sup>, Đỗ Huy Cường<sup>1</sup>, Phạm Đức Hùng<sup>1</sup>, Phạm Việt Hồng<sup>1</sup>, Đỗ Ngọc Thực<sup>1</sup>, Nguyễn Thế Luân<sup>1</sup>, Vũ Duy Vĩnh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Viện Địa chất và Địa vật lý biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam*

<sup>2</sup>*Viện Tài nguyên và Môi trường biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam*

\*E-mail: [nntien@imgg.vast.vn](mailto:nntien@imgg.vast.vn)

Nhận bài: 26-12-2020; Chấp nhận đăng: 30-6-2021

### Tóm tắt

Bài báo trình bày một số kết quả của việc áp dụng công nghệ viễn thám, mô hình số ba chiều và phân tích số liệu thống kê để nghiên cứu, đánh giá hiện trạng và xác định nguyên nhân xói lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang giai đoạn 2010–2019 theo không gian và thời gian. Kết quả cho thấy: Sạt lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang trong giai đoạn này từ năm 2010–2019 xảy ra trên diện rộng, xuất hiện trong cả hai mùa. Biến động bờ sông Hậu hiện nay so với trước đây có sự khác biệt lớn: Quá trình sạt lở bờ sông đang ngày càng ưu thế, phổ biến với cường độ mạnh, gia tăng nhanh, phức tạp và xảy ra nhiều vào mùa kiệt. Đồng thời, nguyên nhân gây xói lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang đã được xác định là do đặc điểm thủy văn, chế độ dòng chảy, cấu tạo địa chất, thổ nhưỡng và quá trình thay đổi hình thái lòng dẫn sông do các hoạt động khai thác cát và phát triển kinh tế - xã hội. Đây là cơ sở khoa học cho việc đề xuất giải pháp để ổn định bờ sông.

**Từ khóa:** Xói lở bờ sông, sông Hậu, An Giang.

### MỞ ĐẦU

Trong giai đoạn từ năm 1998–2008, diễn biến lòng dẫn với đặc trưng là xói lở, bồi tụ ở đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đang là một trong những tác nhân ảnh hưởng xấu đến môi trường sinh thái cũng như phát triển kinh tế - xã hội (KT-XH) bền vững của khu vực. Trước những thiệt hại và diễn biến phức tạp đó, đã có nhiều công trình nghiên cứu diễn biến lòng dẫn, nhất là xói lở bờ sông của một số tác giả như Nguyễn Sinh Huy bước đầu nghiên cứu những diễn biến lòng sông Cửu Long thuộc đề tài “Nghiên cứu quá trình hoạt động và tình hình sạt lở của sông Tiền và sông Hậu”, Nguyễn Văn Huân nghiên cứu và ứng dụng công nghệ mới (MIKE 21) vào đánh giá và dự báo phòng

chống sạt lở bờ sông (miền Bắc, miền Trung và miền Nam), Lê Mạnh Hùng nghiên cứu, dự báo xói lở - bồi lắng lòng dẫn và đề xuất các giải pháp phòng chống xói lở bờ sông Cửu Long. Các kết quả nghiên cứu đã đánh giá được hiện trạng, quá trình diễn biến xói lở, bồi tụ bờ sông; dự báo xói lở (dựa trên các mô hình toán thủy văn, thủy lực; công thức thực nghiệm). Trong những năm gần đây, một số các kết quả nghiên cứu về sạt lở và định hướng giải quyết vấn đề xói lở bờ của hệ thống sông vùng ĐBSCL cho một số khu vực trọng điểm; đánh giá tác động khai thác cát đến thay đổi lòng dẫn sông của Lê Mạnh Hùng, Nguyễn Ngọc Trân và Nguyễn Nghĩa Hùng đã đóng góp nhiều cơ sở lý luận và giải pháp khoa học công nghệ để điều chỉnh và

ôn định các đoạn sông có cù lao đang biến động lớn về hình thái trên sông Tiên và sông Hậu phòng chống giảm nhẹ thiệt hại [1, 2], đặc biệt là những nghiên cứu về quy luật biến động, xác định các vấn đề về dự báo diễn biến lòng dẫn khu vực sông Tiên thuộc tỉnh Đồng Tháp [3–10] và mối tương quan xói lở - bồi tụ một số khu vực lòng sông Tiên, sông Hậu [11].

Cũng trong giai đoạn này, khu vực sông Hậu được nhóm tác giả G. Brunier [12] công bố một số kết quả nghiên cứu về sự thay đổi hình thái lòng sông. Trong nghiên cứu của J-P. Bravard và M. Goichot [13], vật liệu đáy sông Hậu mất khoảng 110 triệu tấn, tốc độ khai thác cát hàng năm mất khoảng 90 triệu tấn. Phạm Đức Anh Huy [14] đã công bố một số kết quả về biến động bờ sông khu vực Vàm Nao trong thời gian 20 năm (từ 1995–2015) bằng phương pháp viễn thám và GIS và đánh giá thay đổi địa hình lòng dẫn, xác định các nguyên nhân gây ra sạt lở tại xã Bình Thủy bằng phương pháp nội suy từ đó đề xuất một số giải pháp định hướng nhằm hạn chế sạt lở. Từ các dữ liệu ảnh vệ tinh Landsat đa thời gian trong thời gian từ 1989 đến 2016 với 4 ảnh (1989, 2001, 2009, 2016), tác giả Nguyễn Ngọc Tiên [15] đã phân tích biến động đường bờ khu vực bờ biển cửa sông Hậu, các kết quả nghiên cứu này sẽ tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo về sự thay đổi địa hình đáy sông khu vực sông Hậu.

Từ năm 2016 đến nay, theo số liệu của Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh An Giang, trên địa bàn xảy ra 38 vụ sạt lở bờ sông, cuốn trôi 142 căn nhà và nhiều tài sản của người dân, ước thiệt hại hơn 200 tỷ đồng. Riêng vụ sạt lở ở xã Mỹ Hội Đông từ 21/4/2017 đã nhấn chìm 16 căn với chiều dài 70 m, lún sâu vào bờ trên 35 m. Ngoài ra, còn có 2 điểm sạt lở rất nguy hiểm với chiều dài hơn 270 m cũng được lực lượng chức năng bảo vệ nghiêm ngặt. Toàn tỉnh hiện có 51 đoạn có nguy cơ sạt lở với tổng chiều dài hơn 160 km (chiếm 40% đường bờ sông trên địa bàn). Trong đó, 15 đoạn dài 30 km nằm trong tình trạng sạt lở nguy hiểm, uy hiếp hơn 20.000 hộ dân, tạo nhiều áp lực cho sự phát triển kinh tế, xã hội. Trong bối cảnh đó, đề tài “Nghiên cứu, xác định nguyên nhân và dự báo xói lở bờ sông Hậu” trong giai đoạn 2018–2019 do Viện Hàn lâm Khoa học

và Công nghệ Việt Nam quản lý được triển khai nhằm đưa ra những căn cứ khoa học một cách khách quan trong việc đánh giá được thực trạng của hiện tượng sạt lở dọc tuyến sông, xác định nguyên nhân, cơ chế và các nhân tố ảnh hưởng tới quá trình xói lở bờ sông Hậu bằng các phương pháp điều tra khảo sát thực địa, phương pháp viễn thám và phương pháp mô hình số ba chiều. Một số kết quả nghiên cứu của đề tài được trình bày chi tiết trong bài báo này.

## TÀI LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

### Tài liệu

*Cơ sở tài liệu xác định diễn biến đường bờ:*

Bản đồ địa hình tỷ lệ 1:5.000, lưới chiếu UTM, kinh tuyến trục trung ương  $105^{\circ}$  múi  $3^{\circ}$ , hệ tọa độ, độ cao Quốc gia VN2000 năm 2009 do Trung tâm Dịch vụ tư vấn Công nghệ viễn thám và địa tin học - Trung tâm Viễn thám Quốc gia cung cấp;

Ảnh viễn thám: Dữ liệu ảnh vệ tinh gồm ảnh Landsat TM với 7 kênh đa phổ có độ phân giải 30 m, ảnh ETM+ gồm 1 kênh toàn sắc với độ phân giải 15 m và 7 kênh đa phổ với độ phân giải 30 m (bảng 2), tần suất thu nhận được ảnh có độ che phủ mây khu vực nghiên cứu nhỏ hơn 10%. Đường bờ thu nhận qua quá trình xử lý ảnh vệ tinh là các vector dạng đường và được làm trơn [16] để giảm thiểu sự khác biệt về độ phân giải mặt đất của ảnh vệ tinh đến sản phẩm đường bờ.

Tài liệu khảo sát thực địa: Đã tiến hành 1 chuyên khảo sát thực địa vào tháng 5 và tháng 6 năm 2018 bao gồm 20 điểm khảo sát thực tế. Trong quá trình khảo sát, đã tiến hành xác định vị trí đường bờ bằng thiết bị định vị cầm tay GPSmap 76C5x, GARMIN. Các số liệu về vị trí các điểm được đưa lên bản đồ địa hình hoặc ảnh viễn thám để xác định tốc độ biến đổi (xói lở hay bồi tụ) đường bờ. Đồng thời, trong quá trình khảo sát thực địa, đã xác định được thành phần vật chất cấu tạo nên đường bờ, độ cao của địa hình ven bờ, đặc điểm hình thái cho từng đoạn khác nhau.

*Cơ sở dữ liệu thống kê:* Số liệu xói lở bờ sông trong giai đoạn từ năm 2009 đến 2019 được thu thập từ Chi cục Thủy Lợi tỉnh An Giang, số liệu thống kê được thể hiện ở bảng 3.

**Bảng 1.** Bảng tọa độ vị trí các điểm khảo sát thực tế khu vực sông Hậu

Tọa độ khảo sát thực địa 2018			
STT	Ký hiệu tên địa điểm	Vĩ độ Bắc	Kinh độ Đông
1	Khu vực chợ Ô Môi	10°23'21''	105°25'51''
2	Sạt lở điểm 1 (Điểm đầu)	10°23'30''	105°26'29''
3	Sạt lở điểm 1 (Điểm cuối)	10°23'38''	105°26'22''
4	Bãi Bồi (Điểm đầu)	10°24'5''	105°26'22''
5	Bãi Bồi (Điểm cuối)	10°24'47''	105°25'13''
6	Sạt lở điểm 2 (Điểm đầu)	10°24'47''	105°25'13''
7	Sạt lở điểm 2 (Điểm cuối)	10°26'5''	105°24'45''
8	Nhà máy gạch (Điểm đầu)	10°26'33''	105°24'28''
9	Nhà máy gạch (Điểm cuối)	10°28'47''	105°21'45''
10	Khu cảnh báo sạt lở (Điểm đầu)	10°31'57''	105°19'51''
11	Khu cảnh báo sạt lở (Điểm cuối)	10°31'55''	105°19'48''
12	Điểm sạt lở Mỹ Hội Đông (đá kê)	10°32'15''	105°19'45''
13	Sạt lở điểm 4 (Điểm đầu)	10°32'18''	105°19'32''
14	Sạt lở điểm 4 (Điểm cuối)	10°30'26''	105°20'03''
15	Sạt lở điểm 5	10°29'0''	105°20'35''
16	Khu nhà bè	10°28'20''	105°21'41''
17	Bờ kè 1 (Điểm đầu)	10°24'48''	105°24'59''
18	Bờ kè 1 (Điểm cuối)	10°24'31''	105°25'12''
19	Bờ kè 2 (Điểm đầu)	10°23'47''	105°25'55''
20	Bờ kè 2 (Điểm cuối)	10°24'15''	105°25'26''

**Bảng 2.** Dữ liệu ảnh Landsat và các thông số tại thời điểm thu ảnh

Bộ cảm	Cột/hàng	Ngày/tháng/năm	Giờ GMT	Độ phân giải (m)	Mức thủy triều (cm)
ETM+	125/53	9/12/2009	04:13:56	30 m	80 cm
OLI	125/53	31/10/2018	10:19:47	30 m	-100 cm

**Cơ sở dữ liệu mô hình:**

Số liệu địa hình ban đầu của hệ thống sông:

Số liệu địa hình hệ thống sông Cửu Long năm 2009 tỷ lệ 1:10.000 của Tổng cục Thủy Lợi.

Đường bờ sông được xác định từ Google mới nhất, so sánh với các bản đồ, các ảnh vệ tinh.

Bản đồ địa hình bờ và lòng sông tỷ lệ 1:5.000 và tỷ lệ 1:25.000 lưới chiếu UTM, kinh tuyến trục trung ương 105° múi 3°, hệ tọa độ, độ cao Quốc gia VN2000 năm 2009 do Trung tâm Dịch vụ tư vấn Công nghệ viễn thám và địa tin học - Trung tâm Viễn thám Quốc gia cung cấp.

Cơ sở dữ liệu biên trên mặt nước trong giai đoạn từ năm 2018 đến năm 2019:

Các điều kiện về lưu lượng phù sa: Lưu lượng phù sa biến đổi theo thời gian 1 giờ/lần ở biên phía trên thượng nguồn tại các trạm Châu Đốc, Tân Châu năm 2018 đến 2019.

Lưu lượng phù sa biến đổi theo thời gian 1 giờ/lần ở biên phía dưới thượng nguồn tại các trạm Cần Thơ và Mỹ Thuận năm 2018 đến 2019.

Các điều kiện mực nước: Mực nước được đưa vào tại các trạm Cần Thơ và Mỹ Thuận.

Điều kiện lưu lượng nước: Lưu lượng nước được đưa vào từ trạm Tân Châu và Châu Đốc.

**Phương pháp**

**Phương pháp sử dụng công nghệ viễn thám và GIS**

Ảnh vệ tinh Landsat các năm 2009 và 2018 được hiệu chỉnh hình học và tăng cường với phần mềm ENVI 5.1 về lưới chiếu UTM, hệ tọa độ VN-2000, zone 48 với độ phân giải 30 m, sau đó được lọc nhiễu bằng phương pháp lọc Sobel Edge Detector trong phần mềm IDRISI [17] làm rõ đường bờ. Ảnh Landsat được hiệu chỉnh khí quyển và hiệu chỉnh phổ nhằm đưa giá trị số về

giá trị phản xạ. Chiết xuất đường bờ bán tự động bằng kết hợp sử dụng ENVI 5.1 và eCognition. Nguyên tắc xử lý ảnh vệ tinh nhằm tách đường bờ từ ảnh là tách biệt các pixel nước với các pixel khác. Biên tập và hiệu chỉnh lại đường bờ

cửa sông Hậu qua các thời kỳ bằng phần mềm ArcGIS. Các polygon nước được chuyển sang dạng đường và được kiểm tra so sánh với ảnh vệ tinh nhằm chỉnh sửa các lỗi phát sinh trong quá trình xử lý số.

Bảng 3. Số liệu sạt lở đất bờ sông Hậu (thống kê từ năm 2010 đến 6/3/2019)

STT	Huyện, thị, thành	Bờ sông	Năm sạt lở	Dài (m)	Rộng (m)	Diện tích (m <sup>2</sup> )	
I	Chợ Mới			7.760	83	29.420	
1	Mỹ Hội, Mỹ Hội Đông	Sông Hậu	1/6/2012	120	3	360	
2	Hòa Bình, Hòa An		2014	3.870	3	11.610	
3	Mỹ Hội Đông		2014	3.500	2	7.000	
4	Ấp Mỹ Hội, xã Mỹ Hội Đông		20/4/2017	70	35	2.450	
5	ấp An Thạnh, xã Hòa An		10/8/2017	200	40	8.000	
II	Long Xuyên			1.942	190	80.527	
1	Khóm Bình Thới 1, P. Bình Khánh	Sông Hậu		34	10		
2	Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Hòa Hưng		2011			44.830	
3	Ấp Mỹ Khánh 2, Mỹ Hòa Hưng					14.675	
4	Ấp Mỹ Thạnh, Mỹ Hòa Hưng					4.890	
5	Sạt lở bờ kè Nguyễn Du				44		
6	Tổ 74, Bình Đức 3, Bình Đức		4/3/2012	80	37	2.940	
7	Khóm Bình Thới 1, Bình Khánh,		26/5/2012	112	30	3.360	
8	Khóm Bình Thới 3, Bình Khánh,		2012	10	5		
9	Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Hoà Hưng		21/10/2013	1.200		990	
10	Ấp Mỹ Khánh 2, Mỹ Hoà Hưng		21/10/2013	100		1.050	
11	Ấp Mỹ Thạnh, Mỹ Hoà Hưng		21/10/2013			652	
12	Xã Mỹ Hòa Hưng		2014		60	25	1.500
13	Ấp Mỹ Khánh 1						1.140
14	Ấp Mỹ Khánh 2						360
15	Tổ 39B, Bình Đức 4, Bình Đức		16/10/2015	30	1	30	
16	Tổ 44, Bình Đức 2, Bình Đức		6/11/2015	30	1	30	
17	Ấp Mỹ Khánh 2, Mỹ Hòa Hưng		11/9/2018	52	25	1.300	
18	Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Hòa Hưng		12/9/2018	50	20	1.000	
19	Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Hòa Hưng		23/9/2018	50	20	1.000	
20	Ấp Mỹ Khánh 2, Mỹ Hòa Hưng		4/10/2018	60	10	600	
21	Tổ 48, Bình Đức 3, Bình Đức		9/02/2019	30	6	180	

Dựa trên tính chất vật lý của phổ ảnh vệ tinh viễn thám và công thức ảnh tỷ số kênh 5/kênh 2 được cải tiến bằng kỹ thuật của Winarso G và các cộng sự để áp dụng phân ranh hai lớp đất và nước [16]. Đối với Landsat TM và +ETM, kênh 5 được thay thế bằng (kênh 5 + kênh 7) trong công thức ảnh tỷ số. Do đó, công thức cải tiến cho Landsat TM và +ETM là (kênh 5 + kênh 7)/kênh 2. Đối với Landsat MSS, công thức ảnh tỷ số cải tiến được thực hiện dựa trên tính chất ảnh tương đồng cho từng kênh phổ. Vì thế, kênh 6 thay thế cho kênh 5 và kênh 4 thay thế cho kênh 2, được

công thức cải tiến cho Landsat MSS là (kênh 6 + kênh 7)/kênh 4 [17]. Kết quả khi đã phân lớp đất và nước, dữ liệu được chuyển từ dạng raster sang vector và xuất ra đường mực nước.

Biến động diện tích vùng bờ (ha), diện tích đất mất đi hoặc diện tích được mở rộng và gắn liền với sự thay đổi vị trí đường bờ, đã được tính toán trong khoảng cách đơn vị là 1 km dọc bờ, giữa các ảnh thuộc hai giai đoạn liên tiếp (2009–2018), sau đó chia diện tích biến động cho thời (tính theo năm) giữa hai khoảng thời gian. Để xác định biến động, đường bờ được qui về một mức thủy triều chung theo phương

pháp nội suy thường áp dụng cho đường bình độ ở một mức độ cao chuẩn nào đó [18]. Trong nghiên cứu này, mức thủy triều cao nhất 80 cm năm 2009 được chọn làm mức chuẩn để quy chiếu các thời điểm khác nhau, đây cũng là thời điểm mà việc khảo sát địa hình đáy biển và địa hình bờ tại thực địa ở khu vực nghiên cứu được thực hiện.

**Phương pháp mô hình toán**

Bài toán đặt ra trong nghiên cứu này là thiết lập mô hình toán ba chiều với biên miền tính được mở rộng cho 4 biên trên sông Tiền và sông Hậu để tính toán lưu lượng, hàm lượng phù sa giữa hai sông thông qua sông Vàm Nao: Tại sông Hậu biên mở được đặt tại trạm Châu Đốc và trạm Cần Thơ, biên mở trên sông Tiền được đặt tại trạm Tân Châu và trạm Mỹ Thuận. Mô hình ba chiều được tích hợp bởi 3 modul chính trong mô hình MIKE 21/3 bao gồm [18]: (1) Modul thủy động lực 3 chiều - MIKE 3D HD (Hydrodynamics) để xác định trường mực nước, dòng chảy 3D có tính đến biến đổi hình thái đáy - bờ; (2) Modul vận chuyển bùn kết dính MIKE 3D MT (Mud transport) và biến đổi hình thái đáy-bờ sông do vận chuyển bùn cát kết dính.

Lưới tính được lập ra bằng công cụ Mesh Generator sử dụng hai loại lưới tính là lưới tam giác và tứ giác với tổng cộng có gần 8 nghìn phần tử với hơn 6 nghìn nút [18]. Các khu vực ngoài vùng nghiên cứu, nhánh sông bao gồm các cù lao, được phủ bởi các ô lưới tứ giác có cạnh ngắn từ 10–100 m theo phương ngang sông và cạnh dài từ 100–300 m theo phương dọc sông. Các ô lưới tam giác được dùng khi không thể dùng ô lưới tứ giác và thường được

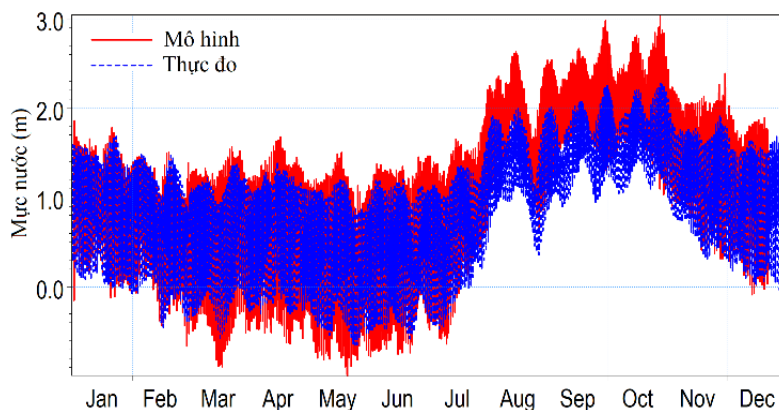
dùng cho các khu vực có địa hình bờ và đáy phức tạp: cửa sông, ngã tư sông, đường bờ quanh co,... Kích thước của các cạnh tam giác là 10–200 m. Tại vùng nghiên cứu, mật độ ô lưới cao, bảo đảm xấp xỉ đầy đủ cấu tạo địa hình đạt tỷ lệ 1:5.000, cạnh ô lưới nhỏ nhất là 10 m và trung bình là 50 m. Lưới tính này đã phủ kín miền tính mô tả ở trên bao gồm: (1) Phủ kín toàn bộ không gian hệ thống sông Mê Kông được giới hạn từ Châu Đốc xuống đến Cần Thơ và từ Tân Châu xuống Mỹ Thuận; (2) Phủ kín vùng khai thác cát bao gồm khu vực Hồng Ngự tỉnh Đồng Tháp và phủ kín vùng khai thác cát Mỹ Hòa tỉnh An Giang, các khu vực có kè (theo số liệu khảo sát năm 2018) để xác định nguyên nhân xói lở do yếu tố nhân sinh.

Để đánh giá mức độ tin cậy trong các tính toán, trong nghiên cứu này sử dụng chỉ số hiệu quả của dự báo- chỉ số Nash và Sutcliffe (1970) [19]. Chỉ số này đánh giá số lượng dự báo đảm bảo độ tin cậy cho phép:

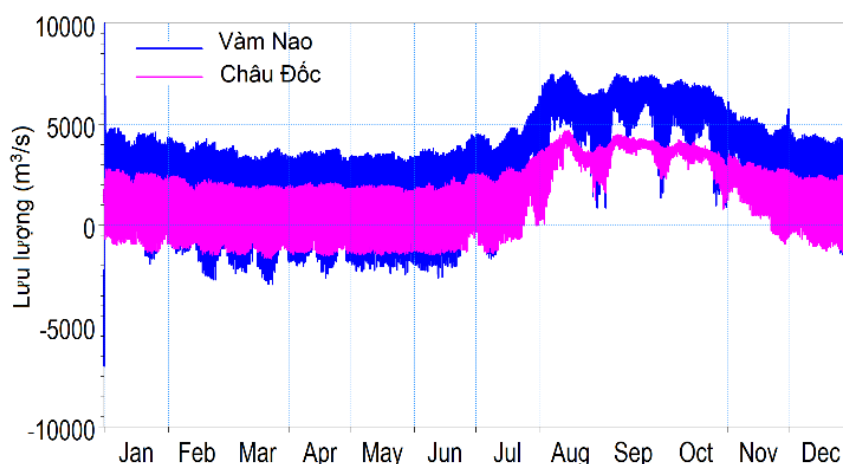
$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Trong đó:  $E$  là hệ số Nash và Sutcliffe;  $O_i$  là giá trị tính toán từ mô hình;  $P_i$  là giá trị quan trắc;  $\bar{O}$  là giá trị quan trắc trung bình.

Giá trị  $E$  tiến tới 1 thì các kết quả dự báo có hiệu quả tốt nhất, ngược lại khi  $E$  tiến tới 0 thì các dự báo không đáng tin cậy. Khi  $E$  mang dấu âm (-), các đặc trưng trung bình tính từ chuỗi quan trắc cho kết quả dự báo tốt hơn từ mô hình [20].



Hình 1. So sánh kết quả tính toán mô hình và số liệu quan trắc mực nước tại trạm Vàm Nao



Hình 2. Lưu lượng tại trạm Châu Đốc và Vàm Nao chảy xuống sông Hậu

Trong nghiên cứu này, số liệu mực nước tại trạm Vàm Nao từ tháng 1 đến tháng 12 năm 2018 được sử dụng để hiệu chỉnh, kiểm chứng kết quả tính của mô hình. Đối với kết quả tính toán dao động mực nước của mô hình, kết quả so sánh cho thấy đã có sự phù hợp cả về pha và biên độ giữa số liệu quan trắc và tính toán (hình 1). Chỉ số NES đối với mực nước quan trắc và tính toán ở các trạm đo trong khu vực biến động trong khoảng 0,8–0,9.

## KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### Tình hình xói lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang giai đoạn 2009–2019

Theo số liệu thống kê do Chi cục Thủy lợi tỉnh An Giang cung cấp (bảng 3). Trong giai đoạn từ năm 2011–2019, tình hình xói lở bờ sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang tiếp tục diễn ra với cường độ mạnh, quy mô rộng lớn và diễn biến phức tạp theo không gian và thời gian.

Năm 2011, tình hình xói lở xảy ra tại Khóm Bình Thới 1 thuộc Phường Bình Khánh, thành phố Long Xuyên với tổng chiều dài 34 m ăn sâu vào đất liền 10 m. Tại các Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Khánh 2 và Ấp Mỹ Thạnh thuộc Phường Mỹ Hòa Hưng diện tích đất bị xói lở khoảng 65 m<sup>2</sup>. Riêng bờ kè Nguyễn Du bị sạt lở 44 m.

Năm 2012, tình hình sạt lở xảy ra ở cả huyện Chợ Mới và thành phố Long Xuyên. Tại huyện Chợ Mới, sạt lở xảy ra ở Mỹ Hội thuộc Mỹ Hội Đông với chiều dài 120 m ăn sâu vào đất liền 3 m, diện tích đất bị sạt lở khoảng 360 m<sup>2</sup>. Tại thành phố Long Xuyên, sạt lở xảy ra ở

Khóm Bình Thới 1 và Khóm Bình Thới 3 thuộc phường Bình Khánh với chiều dài sạt lở 132 m trong đó Khóm Bình Thới 1 sạt lở lên tới 120m ăn sâu vào đất liền 30 m. Tại Khóm Bình Đức 3 thuộc phường Bình Đức, sạt lở cũng xảy ra mạnh mẽ với chiều dài bị xói khoảng 80 m ăn sâu vào đất liền lên tới 37 m.

Năm 2013, tình hình sạt lở chỉ xảy ra ở Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Khánh 2 và Ấp Mỹ Thạnh thuộc phường Mỹ Hòa Hưng, chiều dài sạt lở khoảng 100 m, diện tích sạt lở khoảng 1.000 m<sup>2</sup>.

Năm 2014, sạt lở xảy ra mạnh ở xã Mỹ Hòa Hưng thuộc thành phố Long Xuyên với chiều dài sạt lở khoảng 60 m và ăn sâu vào đất liền 25 m. Ngoài ra, tại xã Mỹ Hội Đông thuộc huyện Chợ Mới cũng có hiện tượng sạt lở, tuy nhiên chiều dài và diện tích sạt lở không đáng kể.

Năm 2015, hiện tượng sạt lở chỉ xảy ra ở Khóm Bình Đức 2 và Khóm Bình Đức 4 thuộc thành phố Long Xuyên với tổng chiều dài sạt lở khoảng 60, ăn sâu vào đất liền 1 m. Theo lãnh đạo Sở Tài nguyên và Môi trường tỉnh An Giang, trong hai năm 2015, 2016 trên địa bàn xảy ra 38 vụ sạt lở bờ sông, cuốn trôi 142 căn nhà và nhiều tài sản của người dân, ước thiệt hại hơn 200 tỷ đồng.

Năm 2017, sạt lở ở xã Mỹ Hội Đông từ 21/4/2017 đã nhấn chìm 16 căn với chiều dài 70 m, lún sâu vào bờ trên 35 m. Ngoài xã Mỹ Hội Đông, xã Hòa An có 2 điểm sạt lở với chiều dài 270 m, ăn sâu vào đất liền 40 m. Theo Ủy ban nhân dân tỉnh, trên toàn tỉnh hiện có 51 đoạn có nguy cơ sạt lở với tổng chiều dài hơn

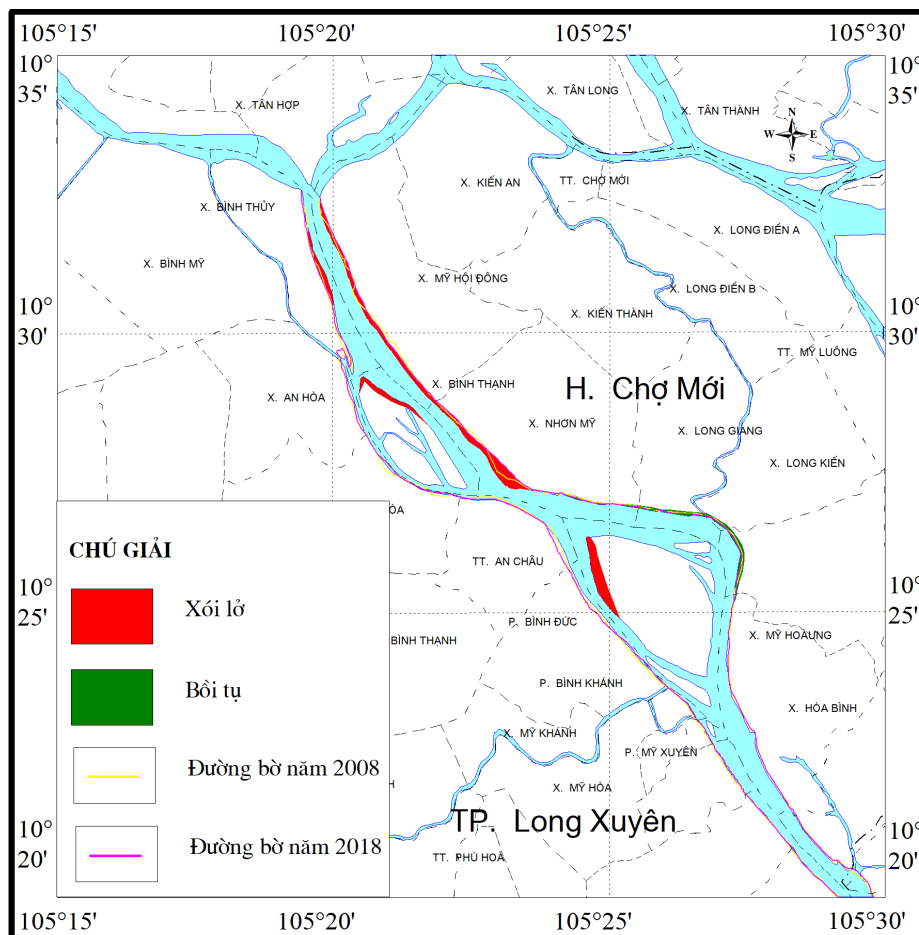


160 km (chiếm 40% đường bờ sông trên địa bàn). Trong đó, 15 đoạn dài 30 km nằm trong tình trạng sạt lở nguy hiểm, uy hiếp hơn 20.000 hộ dân, tạo nhiều áp lực cho sự phát triển kinh tế, xã hội.

Theo số liệu khảo sát do chính tác giả thực hiện năm 2018 và 2019 (bảng 1, hình 4), tình hình sạt lở tiếp tục xảy ra ở xã Bình Thủy với chiều dài khoảng 400 m, ăn sâu vào đất liền 10 m. Điểm sạt lở thứ hai là phường Bình Đức và thị trấn An Châu với chiều dài sạt lở khoảng 450 m, ăn sâu vào đất liền khoảng 15 m. Các điểm sạt lở trong tháng 4 và tháng 8 năm 2017 đã được khắc phục và kè. Ngoài ra, theo số liệu thống kê của chi cục Thủy Lợi tỉnh An Giang, tại các Ấp Mỹ Khánh 1, Mỹ Khánh 2 thuộc phường Mỹ Hòa Hưng với chiều dài sạt lở khoảng 100 m ăn sâu vào đất liền 20 m, diện tích đất sạt xuống sông khoảng 1.000 m<sup>2</sup>.

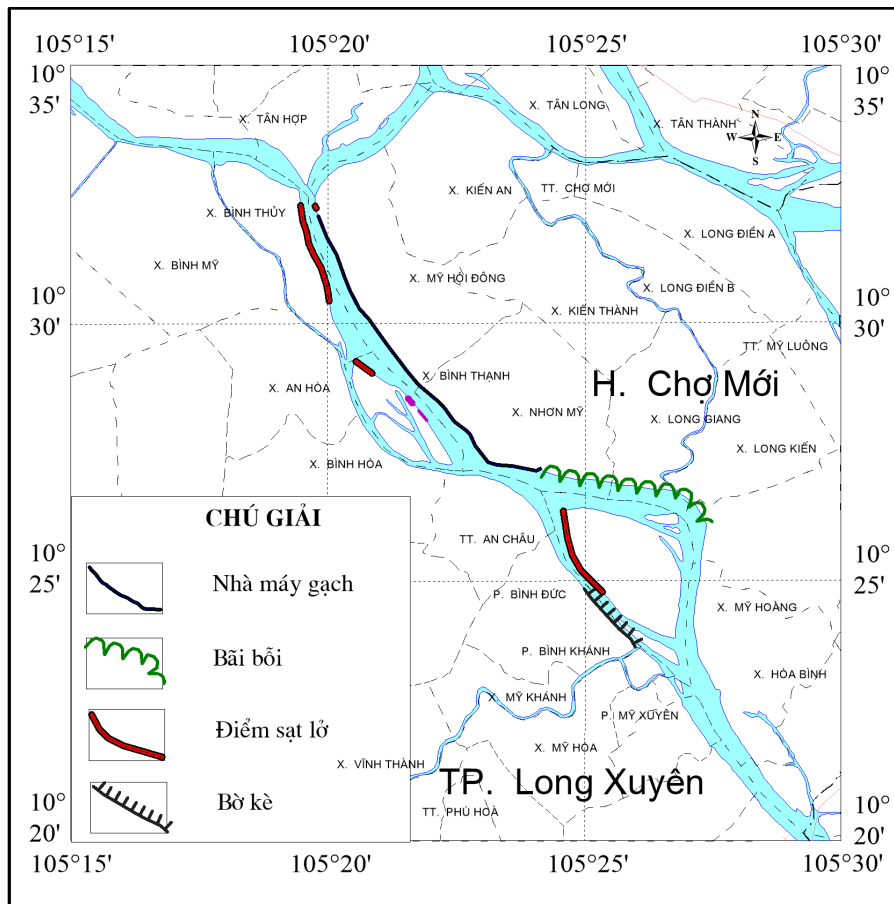
### Đánh giá biến động bờ sông Hậu khu vực tỉnh An Giang trong giai đoạn 2009–2018

Đường bờ sau khi được chiết tách từ các ảnh vệ tinh Landsat và hiệu chỉnh tác động của mực nước được chồng lên nhau thông qua công cụ GIS trong ArcGIS để thành lập sơ đồ biến động đường bờ trong thời điểm 2009–2018 (hình 3). Biến động diện tích vùng bờ (m<sup>2</sup>), diện tích đất mất đi hoặc diện tích được mở rộng và gắn liền với sự thay đổi vị trí đường bờ, đã được tính toán và hiệu chỉnh dựa vào số liệu thống kê của Chi cục Thủy Lợi tỉnh An Giang (bảng 3) cho hai khu vực là Huyện Chợ Mới và thành phố Long Xuyên. Theo kết quả thể hiện ở hình 3, trong giai đoạn từ năm 2009 đến 2018, khu vực xã Mỹ Hội Đông bị sạt lở chậm, diện tích mất đất khu vực này khoảng 2.000 m<sup>2</sup> chủ yếu tập trung ở bờ trái với chiều dài sạt lở khoảng 4 km ăn sâu vào đất liền 5 m.



Hình 3. Diễn biến đường bờ và xu thế xói lở-bồi tụ bờ sông Hậu giai đoạn 2009–2018





Hình 4. Vị trí các điểm sạt lở, bãi bồi, bờ kè và khu nhà máy gạch tại bờ sông Hậu

Theo số liệu thống kê, từ tháng 4 đến tháng 8 năm 2017, khu vực chợ mới thuộc xã Mỹ Hội Đông đã xây ra sạt lở với chiều dài 270 m và ăn sâu vào đất liền 35 m, hiện tại khu vực này đã được bổ sung cát và kè (hình 5), khu vực phía nam đã được xây dựng các nhà máy gạch tự phát và kiên cố nên không xảy ra hiện tượng sạt lở (hình 7). Ở bờ trái thuộc xã Bình Thủy và xã An Hòa (hình 6), diện tích sạt lở khoảng 9.000 m<sup>2</sup>, chiều dài sạt lở khoảng 3 km và chiều rộng ăn sâu đất liền khoảng 3 m. Theo kết quả của Phạm Đức Anh Huy [14]. Tại cù lao Bình Thủy, đoạn sạt lở mạnh nhất ăn sâu vào 90 m và tại Bình Hòa là 130 m. Giai đoạn 1990–2005, tốc độ sạt lở trung bình tại Bình Thủy -3,4 m/năm và tại Bình Hòa lên tới -6,3 m/năm, một số điểm tại đỉnh đầu cù lao Bình Hòa bị sạt lở rất mạnh, lên tới -10 m/năm. Giai đoạn gần đây tốc độ sạt tại hai khu vực trên đều giảm còn lần lượt là -2,4 m/năm và -5 m/năm.



Hình 5. Sạt lở bờ sông Hậu tại xã Mỹ Hội Đông

Đối với khu vực Long Xuyên, tại xã Mỹ Hòa Hưng chiều dài trong giai đoạn từ 2009 đến 2018 diện tích mất đất khoảng 20.000 m<sup>2</sup> với 1 km chiều dài và ăn sâu khoảng 20 m.

Trong khi đó, theo số liệu thông kê của Cục Thủy lợi, diện tích mất đất khu vực này khoảng 45.000 m<sup>2</sup>. Tại phường Bình Đức và thị trấn An Châu, diện tích mất đất trong giai đoạn này khoảng 3.000 m<sup>2</sup> với chiều dài sạt lở 100 m, chiều sâu khoảng 30 m và đang diễn ra sạt lở và chưa có biện pháp kè. Xuống khu vực thành phố Long Xuyên, phường Bình Khánh trong giai đoạn này cũng xảy ra sạt lở với diện tích mất đất khoảng 3.500 m<sup>2</sup>. Tuy nhiên, theo số liệu khảo sát, khu vực này đã được kè kiên cố (hình 4). Cũng theo kết quả chiết tách đường bờ, khu vực bãi bồi (hình 8) ở 3 xã Nhơn Mỹ, Long Giang và Long Kiến với diện tích bồi khoảng 30.000 m<sup>2</sup>, chiều dài bồi tụ khoảng 3 km, chiều rộng 10 m, đây là khu vực được quy hoạch được khai thác cát với chiều sâu đáy sông khoảng 12 m.



Hình 6. Sạt lở bờ sông Hậu tại Xã An Hòa



Hình 7. Khu nhà máy gạch tại xã Bình Thạnh



Hình 8. Khu bãi bồi tại xã Long Giang

### Đánh giá nguyên nhân gây xói lở bờ sông Hậu

Những nghiên cứu trước đây khi xem xét, phân tích các nguyên nhân, các nhân tố ảnh hưởng tới xói lở bờ sông đều dựa vào một trong hai nhóm các yếu tố nội sinh và ngoại sinh hay các yếu tố chủ quan và khách quan. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành phân tích, đánh giá nguyên nhân, các nhân tố ảnh hưởng đến xói lở theo mối quan hệ nhân quả thì các yếu tố khách quan lẫn chủ quan, các yếu tố bên trong lẫn bên ngoài làm thay đổi trong quan giữa lực gây trượt và lực chống trượt của khối đất mái bờ, lực này do chính dòng chảy gây ra. Khi xét yếu tố dòng chảy gây xói lở bờ, cần phải xét tới ba đại lượng đặc trưng: (1) Khả năng vận chuyển trầm tích của dòng chảy; (2) Thời gian duy trì khả năng dòng chảy; và (3) Hướng dòng chảy tác động vào bờ [21]. Để đánh giá được khả năng và tác động của dòng chảy trong mùa mưa, mùa khô tới xói lở bờ, chúng tôi đã áp dụng mô hình ba chiều tại sông Hậu đoạn chảy qua tỉnh An Giang với các kết quả được thể hiện trên các hình 9–12.

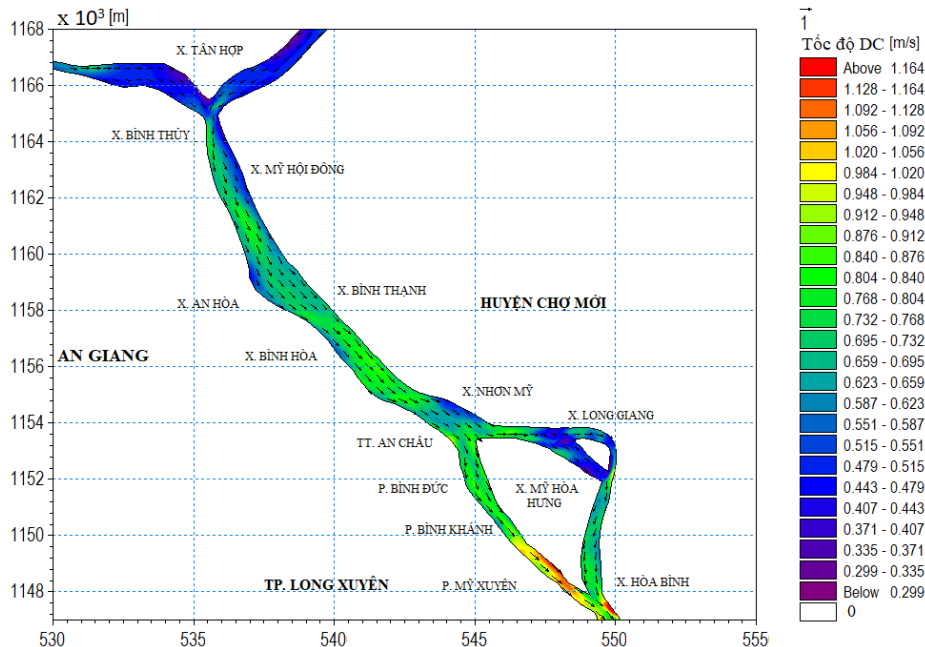
Trong tháng 4 (đại diện cho mùa khô), dòng chảy tầng mặt (hình 9) dao động từ 0,4–0,8 m/s, phía bờ trái sông Hậu thuộc các xã Bình Thủy và An Hòa tốc độ dòng chảy lớn hơn nhiều so với bờ phải thuộc xã Mỹ Hội Đông, xu thế này có thể thấy trong mùa mưa. Trong tháng 9 (đại diện cho mùa mưa) (hình 10), tốc độ dòng chảy dao động từ 0,6–1,2 m/s, bờ trái sông Hậu thuộc các xã Bình Thủy, An Hòa, thị trấn An

Châu và phường Bình Đức, Bình Khánh tồn tại dòng chảy mặt lớn nhất (1,2 m/s vào thời kỳ triều xuống). Đối với dòng chảy đáy, tốc độ dòng chảy vào mùa khô chỉ dao động trong khoảng từ 0,1–0,4 m/s (hình 11). Trong khi đó, vào mùa mưa, tốc độ dòng chảy đáy khi triều xuống lên tới 0,9 m/s, một số khu vực như bãi bồi thuộc xã Long Giang, đoạn chảy qua xã Tân Hợp tốc độ dòng chảy khoảng 0,5 m/s (hình 12). Như vậy, có thể nhận thấy vùng nghiên cứu có chế độ dòng chảy chịu chi phối bởi lưu lượng từ thượng nguồn, lưu lượng tại trạm Châu Đốc và trạm Vàm Nao chảy xuống sông Hậu được thể hiện ở hình 2. Do chế độ dòng chảy sông diễn biến phức tạp, thay đổi trên phạm vi rộng theo cả không gian và thời gian, mặt khác đất cấu tạo lòng sông, bờ sông thuộc loại trầm tích trẻ, tính chất cơ lý thấp, các cù lao được cấu tạo bởi đất, cát chưa được cố kết hoàn toàn, nên tính chất cơ lý rất thấp và dĩ nhiên là rất dễ bị xói lở.

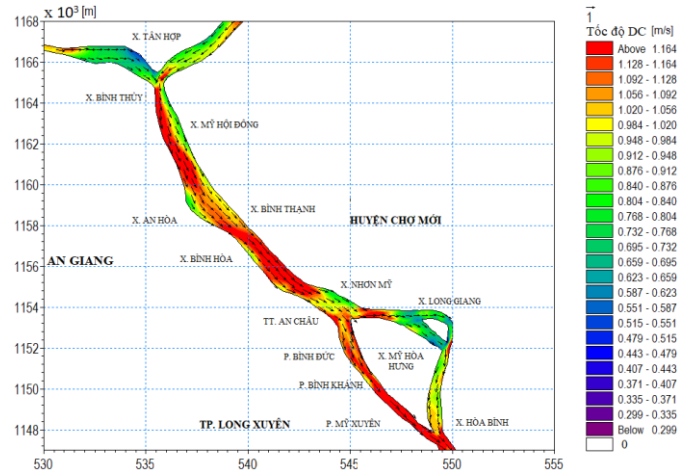
Đối với các khu vực bờ hữu sông Hậu thuộc địa phận thành phố Long Xuyên hiện đang có hiện tượng xói lở phía thượng lưu và hạ lưu đoạn kè gia cố bờ khu vực trung tâm thành phố. Nguyên nhân được xác định là do cù lao Ông Hồ làm dòng chảy phân lưu về nhánh phải nhiều hơn, trong khi đó lòng dẫn nhánh

phải khá nhỏ, mặt khác dòng chảy sau khi xô vào đầu các cù lao sẽ đổi hướng. Với hướng dòng chảy được hình thành như vậy, sẽ gây ra bất lợi rất lớn cho bờ sông Hậu thuộc khu vực thành phố Long Xuyên. Ngoài ra, mấy năm gần đây, phong trào nuôi cá bè trên sông phát triển mạnh, nhiều bè cá có kích thước rất lớn đã và đang xuất hiện ngày càng nhiều trên đoạn sông từ xã An Hòa xuống khu vực thành phố Long Xuyên (tọa độ nuôi cá bè được thể hiện trong bảng 1). Những lồng bè cá làm co hẹp lòng dẫn và ép dòng chảy vào phía bờ sông khu vực trung tâm thành phố gây nhiều bất lợi cho đoạn bờ sông khu vực này.

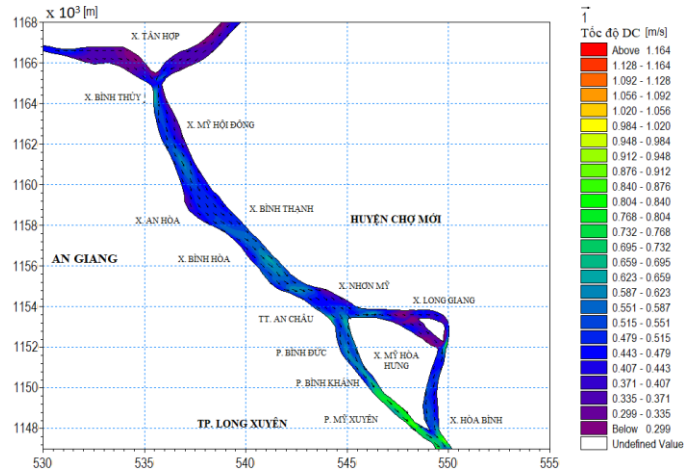
Như vậy, theo các kết quả tính toán tốc độ dòng chảy từ mô hình, số liệu thống kê và số liệu khảo sát, có thể đưa ra một số cơ chế sau: Cơ chế xói lở đoạn sông cong có hồ xói cục bộ sát bờ, đây là hiện tượng xảy ra tại xã Mỹ Hội Đông năm 2017 với hồ sâu 40 m. Sau khi tác động trực diện vào bờ, dòng chảy bị đổi hướng xuống đáy và di chuyển về hạ lưu, khi dòng chảy hướng xuống đáy phá vỡ lòng dẫn tạo hồ xói sâu, theo thời gian hồ xói được mở rộng và dịch chuyển vào sát bờ, gây mất ổn định khối đất mái bờ. Dưới tác động của lực cơ học khối đất bị sụp đổ, khối đất sạt lở với diện tích 2.500 m<sup>2</sup> ở xã Mỹ Hội Đông.



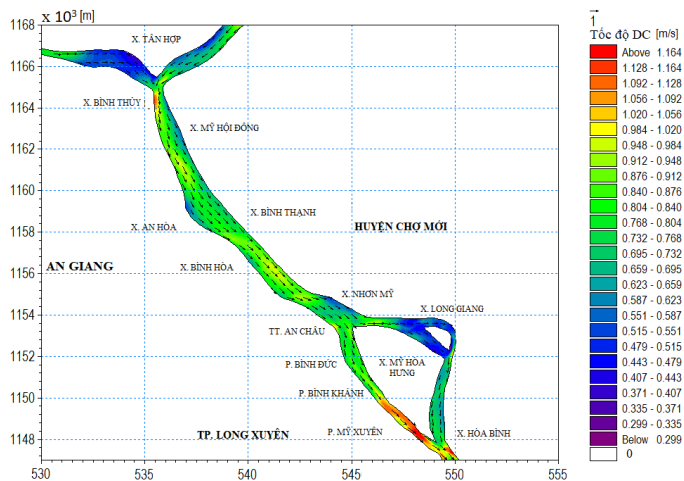
Hình 9. Tốc độ và hướng dòng chảy trung bình tầng mặt tháng 4 năm 2018 ở sông Hậu



Hình 10. Tốc độ và hướng dòng chảy trung bình tầng mặt tháng 9 năm 2018 ở sông Hậu



Hình 11. Tốc độ và hướng dòng chảy trung bình tầng đáy tháng 4 năm 2018 ở sông Hậu



Hình 12. Tốc độ và hướng dòng chảy trung bình tầng đáy tháng 9 năm 2018 ở sông Hậu



Cơ chế xói lở bờ đoạn sông phân lưu, nhập lưu gần nhau, giống như cơ chế xói lở đoạn sông cong có hồ xói cục bộ sát bờ, điểm khác nhau ở đây là hồ xói thường không sâu, vị trí hồ xói luôn biến động khi thì tiến sát bờ trái khi thì sang bờ phải vì thế cả hai bờ đều bị sạt lở nhưng khối đất bị sạt lở không lớn. Cơ chế này có thể thấy rõ ở đoạn sông nhập lưu ở xã Bình Thủy kéo xuống đến xã An Hòa và đoạn sông phân lưu ở thị trấn An Châu kéo xuống phường Bình Đức thuộc thành phố Long Xuyên.

Cơ chế xói lở đoạn sông phân lạch không ổn định, đầu các cù lao bãi bồi thường là sự bào mòn từ dưới tác động của dòng chảy có vận tốc lớn. Cơ chế xói lở bờ dưới tác động của sóng do tàu thuyền qua lại, sóng tác động vào bờ lôi kéo dần đất chân mái bờ trong phạm vi mực nước dao động. Sau thời gian đào xói bờ sông được tạo thành hàm ếch và trượt theo khối lớn hay từng mảnh nhỏ rơi xuống sông tùy theo đất bờ sông là đất kết dính hay bờ rời [22]. Cơ chế này xảy ra cách thành phố Long Xuyên khoảng 7 km về phía thượng nguồn, dòng chảy sông Hậu được phân thành hai nhánh kẹp giữa cù lao Ông Hồ. Nhánh phải đi sát thành phố Long Xuyên là nhánh nhỏ nhưng đang trong giai đoạn phát triển mạnh, trong nhánh phải xuất hiện các bãi giữa là cù lao Phó Ba và cù lao Phó Quế nằm đối diện với thành phố Long Xuyên.

## KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu về biến động đường bờ sông, sử dụng tổ hợp các phương pháp thực địa, mô hình và viễn thám sẽ đánh giá bao quát về hiện trạng, diễn biến đường bờ trong giai đoạn 10 năm và sự thay đổi tức thời của dòng chảy dẫn đến thay đổi lòng dẫn sông xác định nguyên nhân vấn đề.

Về thực trạng xói lở bờ sông Hậu đoạn qua tỉnh An Giang giai đoạn từ 2009–2018 được xác định vẫn tiếp tục diễn ra trên phạm vi rộng, có xu hướng gia tăng và diễn biến phức tạp cả về không gian lẫn thời gian.

Về nguyên nhân và cơ chế của hiện tượng xói lở bờ sông. Ngoài các nguyên nhân chủ quan do sự suy giảm của tải lượng phù sa mịn và lượng cát sỏi mất đi do khai thác cát lòng sông thì nguyên nhân cơ bản được xác định là do dòng chảy có vận tốc lớn, đặc biệt là trong mùa lũ, tốc độ dòng chảy này lớn hơn rất nhiều

vận tốc không xói cho phép của vật liệu cấu tạo nên lòng dẫn. Trong hai yếu tố cơ bản (dòng chảy và vật liệu cấu tạo nên lòng dẫn) thì dòng chảy có động năng lớn hơn, thay đổi liên tục trong phạm vi rất lớn, mang tính ngẫu nhiên theo thời gian và không gian, thường chiếm vị trí chủ đạo, còn yếu tố lòng dẫn có tác dụng chi phối, khống chế dòng chảy, làm thay đổi tính chất và quy mô xói lở bờ và biến đổi lòng dẫn.

Trong tương lai, do nhiều nguyên nhân khác nhau như biến đổi khí hậu, thực hiện các phương án kiểm soát lũ, xây dựng các công trình thủy lợi từ các quốc gia phía thượng nguồn sông Cửu Long,... chắc chắn sẽ gây ra những thay đổi rất lớn về chế độ dòng chảy sông Hậu nói riêng và sông Cửu Long nói chung vào cả mùa lũ và mùa kiệt. Do đó, chúng ta cần thiết phải tiếp tục theo dõi, nghiên cứu về diễn biến lòng sông Cửu Long theo những cách tiếp cận khác nhau.

**Lời cảm ơn:** Công trình nghiên cứu này sử dụng phương pháp và kinh phí bởi đề tài thuộc các hướng KHCN ưu tiên cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam mã số VAST05.06/18–19 và đề tài thuộc chương trình phát triển khoa học cơ bản trong lĩnh vực khoa học trái đất giai đoạn 2017–2015 với mã số KHCBTĐ.01/20–22.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Mạnh Hùng, Trần Bá Hoàng, 2017. Sạt lở bờ hệ thống sông vùng ĐBSCL và những đóng góp của kho học và công nghệ vào việc phòng chống giảm nhẹ thiệt hại. *Tạp chí KH&CN Việt Nam*, (9), 24–46.
- [2] Nguyễn Ngọc Trân, 2017. Chỉ đứng nguyên nhân đồng bằng sông Cửu Long sạt lở và các khuyến nghị. <http://baodatviet.vn>.
- [3] Trịnh Phi Hoàng, Phạm Việt Hòa, Trần Văn Thương, 2018. Định hướng giải quyết vấn đề xói lở bờ sông vùng ĐBSCL theo tiếp cận địa lý tổng hợp. *Kỷ yếu Hội nghị Khoa học Địa lý toàn quốc lần thứ 10* (Quyển 1), tr. 393–403.
- [4] Trịnh Phi Hoàng, Lê Văn Ân, 2012. Tính bất thường trong sự biến động bờ sông Tiền đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp. *Tạp chí Khoa học trường Đại học Sư phạm thành phố Hồ Chí Minh*, 36(70), 131–140.

- [5] Trịnh Phi Hoàng, 2012. Các hoạt động kinh tế - xã hội làm gia tăng xói lở bờ sông Tiền đoạn chảy qua lãnh thổ tỉnh Đồng Tháp. *Thông tin Khoa học & Công nghệ, Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Đồng Tháp*, (3), 10–13.
- [6] Trịnh Phi Hoàng, 2014. Hiện trạng xói lở bờ sông Tiền đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp giai đoạn 2009–2013. *Tạp chí Khoa học trường Đại học Sư phạm thành phố Hồ Chí Minh*, 58(92), 161–171.
- [7] Trịnh Phi Hoàng, 2014. Tác động của các hoạt động kinh tế - xã hội đến biến động lòng dẫn sông Tiền đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp. *Tạp chí Khoa học trường Đại học Sư phạm thành phố Hồ Chí Minh*, 64(98), 127–138.
- [8] Trịnh Phi Hoàng, Nguyễn Thám, Vũ Thị Thu Lan, Phạm Thế Hùng, La Văn Hùng Minh, 2014. Giải pháp tổng thể phòng tránh, giảm nhẹ thiệt hại do biến động bờ sông Tiền đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp. *Kỷ yếu Hội nghị Khoa học Địa lý toàn quốc lần thứ 8 (Quyển 2)*, 244–250.
- [9] Trịnh Phi Hoàng, 2017. Xác định vấn đề nghiên cứu dự báo diễn biến lòng dẫn sông Tiền (đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp) trên quan điểm địa lý tổng hợp. Trong sách *Những thách thức cho sự phát triển bền vững vùng ĐBSCL (Chủ biên Võ Văn Sen, Lê Thanh Hòa, Phạm Gia Trân)*. Nxb. Đại học Quốc gia tp. Hồ Chí Minh, tr. 84–103.
- [10] Trịnh Phi Hoàng, 2018. Nghiên cứu diễn biến lòng dẫn sông Tiền (đoạn chảy qua tỉnh Đồng Tháp) phục vụ phòng tránh thiên tai. *Luận án Tiến sĩ Địa lý, Học viện Khoa học và Công nghệ, Hà Nội*.
- [11] Hà Quang Hải, 2011. Tương quan xói lở - bồi tụ một số khu vực lòng sông Tiền, sông Hậu. *Tạp chí các Khoa học về Trái đất*, 33(1), 37–44.
- [12] Brunier, G., Anthony, E. J., Goichot, M., Provansal, M., and Dussouillez, P., 2014. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of riverbed mining and implications for delta destabilisation. *Geomorphology*, 224, 177–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.009
- [13] Bravard, J. P., Goichot, M., and Gaillot, S., 2013. Geography of sand and gravel mining in the Lower Mekong River. First survey and impact assessment. *EchoGéo*, (26), 1–18. doi: 10.4000/echogeo.13659
- [14] Phạm Đức Anh Huy, Trần Tuấn Tú, 2015. Đánh giá biến động đường bờ sông khu vực Vàm Nao. *Tạp chí Phát triển KH&CN*, 18(M2).
- [15] Nguyễn Ngọc Tiến, Đỗ Huy Cường, Đinh Văn Ưu, Nguyễn Thọ Sáo, Trần Anh Tuấn, Lê Đình Nam. Phân tích biến động đường bờ khu vực bờ biển cửa sông Hậu bằng tư liệu viễn thám. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển*, 17(4), 386–392.
- [16] Winarso, G., and Budhiman, S., 2001. The potential application of remote sensing data for coastal study. In *Proc. 22<sup>nd</sup> Asian Conference on Remote Sensing, Singapore* (pp. 1–5).
- [17] Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., and Ergul, A., 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—an ArcGIS extension for calculating shoreline change (No. 2008-1278). *US Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- [18] Xu, H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14), 3025–3033. doi: 10.1080/01431160600589179
- [19] Mike, E., 2014. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.
- [20] Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- [21] Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89–97. doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005
- [22] Sheng, Y. P., and Lick, W., 1979. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), 1809–1826. doi: 10.1029/JC084iC04p01809