

BỜ BIỂN BÙN - RỪNG NGẬP MẶN Ở ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG: VÒNG LẶP SUY THOÁI VÀ GIẢI PHÁP BẢO VỆ BỜ ĐA CẤP ĐỘ

THIỀU QUANG TUẤN¹

¹Khoa Công trình, Đại học Thủy lợi

Tóm tắt

Hiệu ứng bóp nghẹt ven biển (BNVB) (coastal squeeze) cùng với sự mất cân bằng động lực bùn hạt mịn xảy ra ở các quy mô không gian và thời gian khác nhau là nguyên nhân cơ bản gây ra xói lở bờ biển, suy thoái rừng nghiêm trọng ở vùng ven biển đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). Nhiều dạng công trình giảm sóng gây bồi cùng với các nỗ lực trồng tái tạo rừng đã được thực hiện, tuy nhiên hiệu quả đạt được vẫn còn hạn chế do công năng chưa được thiết kế phù hợp với tính chất xói lở ở từng vùng. Xuất phát từ các kiến thức chung về xói lở bờ biển bùn có rừng, trên cơ sở thừa kế kết quả từ các nghiên cứu có liên quan đã được thực hiện trong phòng thí nghiệm cũng như hiện trường cho ĐBSCL, nghiên cứu đã tổng hợp, phân tích vai trò cốt lõi của cân bằng động lực bùn cát hạt mịn ở quy mô cục bộ đối với sự phát triển của cây ngập mặn. Đồng thời giải thích vòng lặp xói lở và suy thoái rừng, từ đó đề xuất nguyên lý cơ bản trong thiết kế giải pháp ở 4 cấp độ khác nhau phù hợp với mục tiêu bảo vệ bờ khả dĩ với mẫu chốt là khôi phục lại điều kiện cân bằng động về trao đổi bùn cát hạt mịn. Kết quả nghiên cứu có thể được tham khảo cho thực tiễn thiết kế hệ thống công trình giảm sóng gây bồi ở bờ biển bùn có rừng ngập mặn (RNM) ở ĐBSCL.

Từ khoá: Bờ biển bùn cây ngập mặn, xói lở bờ biển, bóp nghẹt ven biển, nước biển dâng tương đối, giải pháp bảo vệ bờ.
Ngày nhận bài: 27/2/2026; **Ngày sửa chữa:** 15/3/2026; **Ngày duyệt đăng:** 28/5/2026.

Mangrove-mud coast in the Vietnamese Mekong Delta: Deterioration loop and multi-level protective measures

Abstract

Coastal squeeze induced by relative sea level rise and imbalances of fine sediment (mud) hydrodynamics at various spatial and temporal scales are the main cause of severe erosion of coastal mangrove-mud coasts in the Vietnamese Mekong River Delta (VMD). In this context, wave-attenuation structures as a form of shore erosion control measure have been executed. However, the achieved targets are rather modest, particularly on rehabilitation of coastal mangrove habitats. From recent knowledge and experiences on erosion of mangrove-mud coast worldwide, particularly results from laboratory and field experiments conducted for the VMD, this paper addresses the primary role of local equilibrium of fine sediment hydrodynamics on natural growth of coastal mangroves, whereby the snowball effect loop of erosion and deterioration of mangrove habitats is explained. From this, basic principles for design of measures in three successive levels of protection are proposed, which essentially aim at re-establishing local equilibrium of fine sediment hydrodynamics on mangrove-mud foreshores.

Keywords: Mangrove-mud coast, coastal erosion, coastal squeeze, relative sea level rise, coastal protection.

JEL Classifications: O13, O44, Q56, Q57.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện tượng xói lở bờ biển kéo theo sự suy giảm diện tích rừng ngập mặn (RNM) ở đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) đang xảy ra trên diện rộng với tốc độ ngày một gia tăng trong một vài thập kỷ gần đây. Có tới 68% tổng chiều dài đường bờ biển đang bị xói lở và đặc biệt là hơn 90% đoạn đang xói lở có liên quan tới đai RNM, thậm chí ở nhiều nơi đai rừng phía trước đã hoàn toàn biến mất.

Các nghiên cứu diễn biến đường bờ dựa vào ảnh viễn thám (Manon và nnk, 2016; CPMD, 2018) cho thấy quá trình suy thoái rừng nhiều nơi ở ĐBSCL thực

chất đã diễn ra qua rất nhiều thập kỷ. Kết quả còn cho thấy mối liên hệ chặt chẽ giữa tốc độ xói lở bờ và tốc độ thu hẹp diện tích vùng ven bờ (phần lớn là rừng) ở các thập kỷ gần đây. Tốc độ biển lấn trung bình từ năm 1985 cho đến nay vào khoảng 20 m/năm, cá biệt ở những điểm nóng ở dải bờ phía Đông của mũi Cà Mau đã lên tới 60 m/năm (Hình 1). Phần lớn các đoạn xói lở là biển bùn có cây ngập mặn, nằm cách xa nguồn cung bùn cát từ các con sông.

Nhằm ứng phó với tình trạng trên, thời gian qua đã có nhiều nỗ lực từ Nhà nước, các tổ chức phi Chính phủ



trong việc thực thi các giải pháp công trình kiểm soát xói lở (đê giảm sóng gây bồi: Cọc ly tâm đá đổ, hàng rào tre...) và trồng lại rừng. Tuy nhiên, phần lớn công trình được đầu tư trong tình huống ứng phó khẩn cấp nên chưa có sự nghiên cứu đầy đủ về các quá trình tự nhiên chi phối ở đoạn bờ biển như là nguồn cung bùn cát, nguyên nhân, quá trình suy thoái môi trường sống của cây ngập mặn... Hiệu quả đạt được của các dự án đều dừng lại ở mục tiêu giữ vị trí đường bờ hiện hữu hoặc bảo vệ phần đai rừng còn lại. Mục tiêu gây bồi để trồng tái tạo lại đai cây ngập mặn đã hầu như không thể thực hiện được, kéo theo nỗ lực trồng lại cây ở nơi đang bị xói lở đều thất bại, ngay cả khi đã có sự hỗ trợ bởi công trình giảm sóng (đê giảm sóng, hàng rào tre) (Besset và nnk., 2019) (Hình 1).

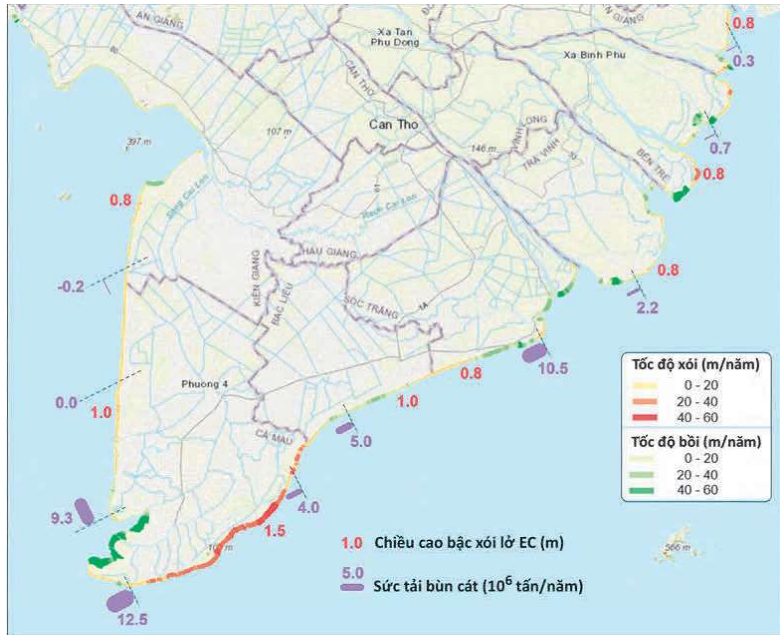
Hướng tới giải pháp mang tính bền vững cho bờ biển ĐBSCL, việc nghiên cứu các giải pháp nhằm gây bồi, nâng cao trình bãi bùn để hỗ trợ cho việc trồng lại rừng mang tính cấp thiết. Tuy nhiên, để nâng cao hiệu quả, công năng thiết kế của hệ thống công trình cần phải phù hợp với mục tiêu khả dĩ dựa trên cơ sở phân tích tính chất của xói lở cũng như là điều kiện đặc thù ở từng vùng.

Nếu công tác bảo vệ, chống xói lở bờ biển ở ĐBSCL quá chú trọng vào các giải pháp cứng làm lệch đi cán cân cân bằng với tự nhiên (xu thế bê tông hóa), thì mục tiêu giữ vị trí đường bờ đạt được chỉ là trước mắt. Về lâu dài, các công trình cứng sẽ luôn gây ra tác động tiêu cực và dẫn làm suy giảm đáng kể khả năng chống chịu của hệ thống bảo vệ bờ biển trong bối cảnh mới hiện nay của ĐBSCL.

2. MỤC TIÊU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mục tiêu

Mục tiêu chính của nghiên cứu là nhằm giải thích vòng lặp suy thoái - cơ chế chính gây ra xói lở và suy thoái môi trường sống của cây ngập mặn ở các đoạn bờ biển bùn của ĐBSCL, từ đó đưa ra đề xuất định hướng giải



Hình 1. Tốc độ biến đổi đường bờ biển ở ĐBSCL giai đoạn 1985 - 2020
 Nguồn: Tuan và nnk., 2024

pháp bảo vệ bờ theo cấp độ khác nhau, phù hợp với mục tiêu khả dĩ của đoạn bờ biển.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Đánh giá tổng quan

Nghiên cứu đã tham khảo các nghiên cứu đi trước về nguyên nhân - cơ chế gây xói lở - giải pháp đối với bờ biển bùn có cây ngập mặn ở một số khu vực đồng bằng ven biển trên thế giới. Trong đó tập trung phân tích, đánh giá, tổng hợp gắn với điều kiện tự nhiên và yếu tố tác động của con người mang tính đặc thù ở ĐBSCL để đưa ra nhận định về vòng lặp gây xói lở, kéo theo suy thoái môi trường sống của đai cây ngập mặn.

- Phân tích tổng hợp

Sau khi đánh giá tổng quan, nghiên cứu đã sử dụng phương pháp phân tích tổng hợp với tham chiếu về cơ chế gây xói lở và suy thoái rừng đã được nhận định để đề xuất định hướng giải pháp bảo vệ bờ theo 4 cấp độ, dựa trên các kết quả nghiên cứu về giải pháp công trình phù hợp cho bờ biển bùn có cây ngập mặn trong và ngoài nước, đặc biệt là kinh nghiệm thực tiễn (thành công, thất bại) từ những dự án đầu tư hệ thống công trình giảm sóng - gây bồi đã và đang được áp dụng ở ĐBSCL.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Vòng lặp suy thoái rừng do hiệu ứng bóp nghẹt ven biển

Các nghiên cứu gần đây cho rằng một trạng thái thủy động lực và hình thái mới đã được thiết lập ở các vùng biển ĐBSCL, theo đó sự tồn tại của RNM ven biển được cho là không còn bền vững (Anthony và nnk., 2015; Besset và nnk., 2019). Bãi triều và RNM bị thúc đẩy bởi những xáo trộn có tính lâu dài (mãn tính), đang dần chuyển sang một chế độ mới.

Các yếu tố tham gia vào quá trình xói lở bờ biển bùn - RNM ở ĐBSCL bao gồm cả quá trình tự nhiên và những yếu tố liên quan đến tác động của con người, như minh họa trong Hình 2. Các quá trình thủy

động lực và hình thái ven biển, kết quả của sự tương tác giữa tác động thủy động lực (sóng, thủy triều, gió), địa hình bãi biển và bùn cát thực chất chỉ là “phương tiện chuyên chở”. Tác nhân chính là từ các hoạt động can thiệp vào tự nhiên của con người, bao gồm sự suy giảm bùn cát sông do xây dựng hồ chứa ở thượng nguồn và khai thác bùn cát; lún sụt đất do khai thác nước ngầm quá mức; các công trình ngăn cách như đê biển, ao nuôi thủy sản nằm trên bãi bùn vùng triều.

Lượng bùn cát từ sông Mê Kông đổ biển hàng năm ước tính đã suy giảm tới 50% so với giai đoạn trước khi xây dựng hồ chứa lớn ở thượng nguồn (Kondolf và nnk., 2014). Lún sụt đất ở ĐBSCL đang xảy ra nghiêm trọng với tốc độ vào khoảng 2 - 3 cm/năm ở vùng ven biển (Minderhoud và nnk., 2017), tức là gấp 10 lần so với nước biển dâng (chỉ 2 - 3 mm/năm). Đây là hai yếu tố có tác động mang tính lâu dài, có thể được thấy rõ đối với bờ biển (Hình 2).

Sự phối, kết hợp của các yếu tố tác động nêu trên, đặc biệt là giữa mực nước biển dâng tương đối (bao gồm lún sụt đất và nước biển dâng) phía biển và các công trình ngăn nước trên bãi triều (đê biển, bờ bao ao nuôi trồng thủy sản...) phía đất liền gây ra một hiệu ứng đối với đai cây ngập mặn, gọi là “bóp nghẹt ven biển” (BNVB). Trong bối cảnh ở ĐBSCL, hiệu ứng BNVB được hiểu là sự mất đi hoặc suy thoái môi trường sống của rừng (gồm bãi bùn vùng triều và đai cây), khi quá trình chuyển dịch tự nhiên của RNM về phía đất liền để thích ứng với mực nước biển dâng tương đối bị cản trở bởi các công trình ngăn cách (không thấm nước) như đê biển, bờ bao ao nuôi thủy sản nằm trong các bãi bùn vùng triều (Hình 3).

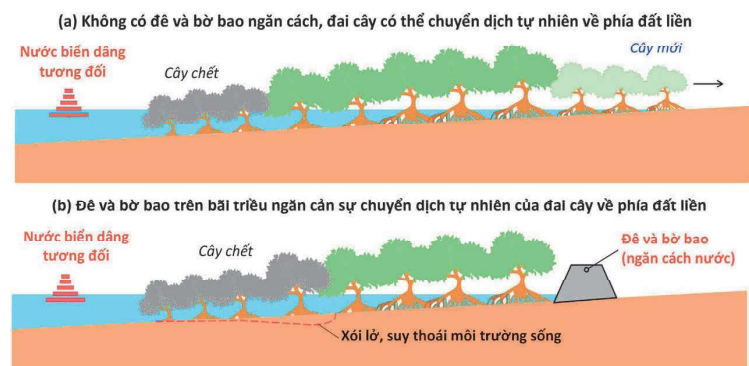
Tác động của hiệu ứng BNVB ở ĐBSCL đang trở nên nghiêm trọng hơn do sự thiếu hụt nguồn cung bùn cát. Trong môi trường giàu bùn cát (gần cửa sông), quá trình bồi tụ bùn cát cùng với sự phát triển sinh khối của cây có thể nâng cao cao trình bãi triều, giúp chúng bắt kịp được với mực nước biển dâng tương đối. Tác động của hiệu ứng BNVB cũng sẽ trở nên rõ rệt hơn ở những nơi có biên độ triều lớn (đai bờ phía Đông nghiêm trọng hơn so với phía Tây).



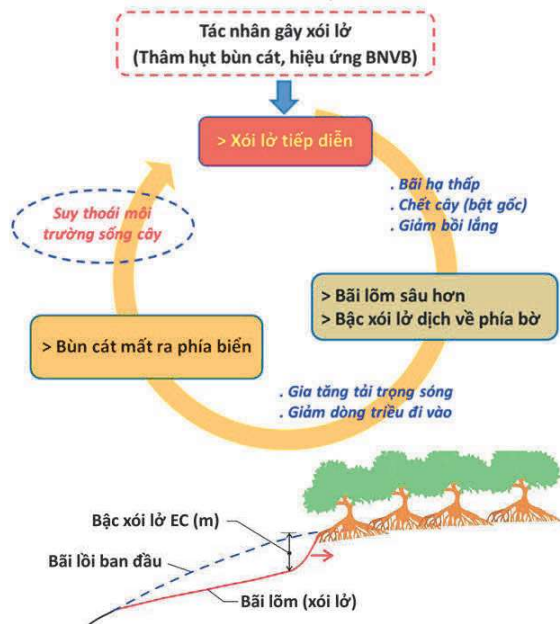
Hình 2. Các yếu tố và quá trình liên quan tới xói lở bờ biển RNM ở ĐBSCL
 Nguồn: Tuan, 2024

Hiện tượng xói lở bờ biển do mất cân bằng bùn cát và hiệu ứng BNVB cùng tồn tại, đồng thời gây ra sự suy thoái, thu hẹp RNM ở ĐBSCL. Mặc dù tác động tổng hợp của chúng là khá rõ ràng, nhưng ở những nơi có hiệu ứng BNVB thì rất khó tách biệt vai trò riêng của từng yếu tố. Hiệu ứng BNVB cũng góp phần gây ra xói lở, làm suy thoái môi trường sống của cây ngập mặn. Như vậy, xói lở bờ biển và hiệu ứng BNVB có mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau, cùng tham gia vào quá trình dẫn tới suy thoái đai RNM ven biển ở ĐBSCL (Hình 3, 4).

Một khi xói lở xảy ra ở bãi bùn có cây ngập mặn, nó sẽ kích hoạt một vòng lặp phản hồi dương như minh họa trên Hình 4, trong đó môi trường sống của cây ngập mặn bị buộc phải suy thoái (bãi bị hạ thấp, các cây phía ngoài dần bị bật gốc, trong khi quá trình bồi lắng nhờ các cây còn lại không còn diễn ra) và quay trở lại tiếp tục làm gia tăng xói lở (xem thêm Winterwerp và nnk., 2013; Tuan và nnk., 2024). Mặt cắt ngang bãi đang ở dạng cong lõm không ổn định, thể hiện qua các bậc xói lở ở ranh giới phía biển của phần rừng còn lại. Xói lở thường bắt đầu tại những vị trí bị xáo trộn, chẳng hạn như tại lân cận công trình ngăn cách hoặc tại vách xói lở, nơi dòng triều vận chuyển bùn cát vào bờ bị ngăn lại hoặc giảm đi, trong khi dòng vận chuyển bùn cát ra phía ngoài do sóng lại gia tăng. Do không có cơ chế phản hồi âm (yếu tố hãm), quá trình xói lở



Hình 3. Hiệu ứng BNVB do nước biển dâng tương đối và công trình ngăn cách trên bãi triều
 Nguồn: Tuan, 2024



Hình 4. Vòng lặp suy thoái RNM ở ĐBSCL
Nguồn: Tuan, 2024; có điều chỉnh

tiếp tục diễn ra, làm suy thoái điều kiện môi trường cho sự tái sinh của cây ngập mặn. Ngoài ra, về mặt lâm sinh, sự đứt gãy hoặc vắng bóng của thành phần loài đóng vai trò tiên phong trong đai rừng (như Mắm/Bần) cũng sẽ làm trầm trọng thêm vòng lặp suy thoái. Khi không còn sự bảo vệ của đai cây tiên phong, đai cây ngay phía sau phải đối diện trực tiếp với môi trường sinh thái không còn phù hợp, từ đó làm tăng nhanh tốc độ suy thoái.

Sự suy thoái môi trường sống của rừng sẽ tiếp diễn chừng nào tình trạng thiếu hụt nguồn cung bùn cát (nguyên nhân chính gây xói lở) còn tồn tại. Khi đó, sự suy thoái môi trường sống của cây ngập mặn trở thành mãn tính, rất tiếc đây lại là đặc tính cố hữu ở ĐBSCL. Điều này lý giải, nếu không có nguồn bùn cát bổ sung bền vững, phần lớn các nỗ lực phục hồi RNM đều thất bại (Tuan, 2024).

Ngược lại, ở những khu vực mà xói lở chỉ do hiệu ứng BNVB trong khi vẫn có đủ nguồn cung bùn cát, vòng phản hồi dương có thể bị phá vỡ dẫn tới khả năng khôi phục môi trường sống cho cây ngập mặn. Giải pháp đơn giản chỉ là loại bỏ các ao nuôi trồng và di dời tuyến đê biển về phía trong của vùng bãi triều để cho phép quá trình trao đổi nước và phân phối bùn cát tự nhiên được hoạt động trở lại.

3.2. Giải pháp bảo vệ bờ đê cấp độ

3.2.1. Nguyên lý chung

Phần lớn các giải pháp giảm sóng gây bồi đã và đang áp dụng hiện nay ở ĐBSCL đều chưa có lý luận thiết kế rõ ràng, đặc biệt là về thiết kế công năng phù hợp với mục tiêu (khả đi) cho từng đoạn bờ biển. Nếu lấy mục tiêu chính là hỗ trợ khôi phục rừng thì

hiệu quả đạt được của những công trình đã xây dựng hiện nay còn khá khiêm tốn. Ở nhiều nơi công trình thậm chí đã ngăn chặn sự trao đổi triều hoặc làm bồi cát nhiều hơn là bồi bùn, không có lợi cho sự phát triển của rừng.

Khác với bờ biển cát là chỉ cần giảm sóng hoặc dòng chảy sẽ có thể gây bồi, quá trình gây bồi đối với bùn chịu sự chi phối không chỉ ở đặc trưng của dòng chảy mà quan trọng hơn còn phụ thuộc vào quá trình kết bông của các hạt bùn mịn. Quá trình kết bông kéo theo sự lắng đọng bùn và thường quan sát thấy ở khu vực rìa rừng cây ngập mặn, khi dòng chảy có nồng độ bùn lơ lửng SSC đủ lớn (thường SSC >> 200 mg/l) nhưng đồng thời lại cần có động năng rơi đủ nhỏ (Gratiot và nnk, 2017). Ở các bãi biển bùn, sóng có vai trò quan trọng là khuấy động làm tăng nồng độ bùn cát lơ lửng ở khu vực ven bờ và do vậy dòng triều đem bùn cát vào mồi có thể gây bồi.

Từ những phân tích ở trên có thể nhận thấy trong thiết kế công trình giảm sóng, gây bồi hỗ trợ trồng rừng thì vấn đề không chỉ nằm ở giảm sóng mà quan trọng hơn là cần trả lại hoặc tái tạo lại vùng bãi triều tự nhiên cân bằng bùn hạt mịn. Công trình giảm sóng gây bồi hiệu quả nhất khi có thể mô phỏng được sự làm việc của một đai cây ngập mặn. Trên cơ sở này có thể rút ra một số nguyên lý chung trong thiết kế một giải pháp công trình hoặc hệ thống công trình bảo vệ, có khả năng gây bồi: (i) Nếu có hiệu ứng BNVB thì trước tiên cần loại bỏ tác nhân gây mất cân bằng trao đổi bùn: Phá dỡ hoặc di chuyển các công trình cứng như đê, kè, bờ bao... nằm trong phạm vi bãi triều của rừng; (ii) Sử dụng đê giảm sóng kết cấu xốp rỗng (ĐGS) với độ rỗng phù hợp để cho phép dòng triều và bùn cát đi vào, giảm sóng phản xạ, giảm lượng bùn cát ra phía biển bởi sóng. Không sử dụng kết cấu không hoặc ít thấm trong phạm vi bãi triều cây ngập mặn (Winterwerp và nnk, 2020; Tuấn và Luân, 2020); (iii) Để có thể trồng được rừng thì bãi đã bị xói cần được gây bồi, tạo lại bãi tới cao trình phù hợp với sinh trưởng của cây. Để có thể tạo được bãi theo yêu cầu (bề rộng, cao độ), hệ thống các công trình giảm sóng gây bồi phải được bố trí thành nhiều tuyến (theo phương ngang bãi) với sự phối hợp của một số dạng kết cấu giảm sóng, dòng chảy khác nhau. Tuy nhiên, điều kiện tiên quyết để gây bồi cho đoạn bờ biển là phải có nguồn cung bùn cát.

Hai vấn đề mấu chốt trong tính toán thiết kế công năng công trình giảm sóng - gây bồi đó là xác định được hiệu quả giảm sóng thiết kế và bố trí không gian phù hợp với công năng của (hệ thống) công trình. Với ĐGS kết cấu rỗng, hệ số truyền sóng chịu sự chi phối của các tham số sóng tới, độ sâu nước, kích thước hình học, đặc biệt là độ thấm của công trình. Độ thấm được xác định

thông qua độ rỗng khối của kết cấu đê và là tham số thiết kế quan trọng có thể sử dụng để điều chỉnh tính chất của sóng truyền phía sau đê. Công thức tổng quát xác định hệ số truyền sóng qua đê cho đê kết cấu rỗng trên bãi triều RNM như sau (Tuấn và Luân, 2020; Tuấn và nnk., 2022):

$$K_t = a_1 \cdot \min \left(\eta, \frac{R_c}{H_{m0,i}} \right) + a_2 \left(P_f \cdot \frac{B}{d} \right)^{c_1} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{c_2}{\sqrt{s_{0p}}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\text{Tror} P_f = \frac{(1-n_v)^2}{n_v^3}$$

K_t - Hệ số truyền sóng

$H_{m0,i}$ - Chiều cao sóng tới

R_c - Chiều cao tính không của đỉnh đê phía trên mực nước tính toán

d - Độ sâu nước phía trước đê

B - Bề rộng đỉnh đê

s_{0p} - Độ dốc sóng biểu kiến theo chu kỳ đỉnh phổ Tp

P_f - Tham số độ thấm của đê

n_v - Độ rỗng khối

$\eta = 0.50$, a và c là các hệ số thực nghiệm phụ thuộc loại kết cấu đê.

Để gây bồi bùn hiệu quả, cần căn cứ vào điều kiện thủy động lực và bùn cát cụ thể ở từng khu vực để bố trí hệ thống ĐGS, trong đó đặc biệt chú trọng tới yếu tố nguồn cung bùn cát. Nguyên lý chung là có thể dẫn bùn vào và lắng đọng ở “bể lắng bùn”. Bể lắng bùn có cấu tạo chung là ô quay tạo bồi công trình. Để gây lắng đọng bùn, hệ thống công trình cần bố trí sao cho dòng chảy trong phạm vi bể lắng có độ rối đủ nhỏ (ứng suất tiếp đáy do vận tốc dòng chảy và sóng đủ nhỏ, xem thêm Mục 3.2).

Trong trường hợp bãi cần gây bồi là bãi xói nông, nằm trong phạm vi bãi triều (bãi ngập lúc triều cao và cạn lúc triều thấp, thời gian phơi bãi vẫn đạt khoảng 6 giờ/ngày, đêm), dòng chảy bùn cát chủ yếu được đem vào theo dòng triều theo hướng ngang bờ. Do vậy, cần bố trí hệ thống đê giảm sóng song song với bờ, kết hợp với các mỏ hàn chữ T để tạo thành các ô lắng (Hình 5a). Cần có thêm cửa mở phía biển để dòng triều đi vào, mang theo bùn cát khi triều lên, cũng là nơi để cho dòng triều rút ra. Với trường hợp bãi xói sâu (phần lớn thời gian bãi bị ngập nước, thời gian phơi bãi chỉ đạt khoảng 4 - 6 giờ/ngày, đêm) thì cần

bố trí hệ thống công trình đê giảm sóng xa bờ có hoặc không có các khoảng mở (Hình 5b). Lúc này nguồn cung bùn cát phần lớn là do sự trao đổi bùn cát theo phương dọc bờ, do vậy không nên bố trí các mỏ hàn nối bờ để tránh cản trở dòng bùn cát đi vào. Bể lắng bùn sẽ được hình thành ở khu vực khuất sóng phía sau các đê giảm sóng. Với bãi rộng thì có thể bố trí thêm một đến vài lớp hệ thống công trình giảm sóng, dòng chảy ở phía trong (song với hệ thống chính phía ngoài, Hình 5c). Nhìn chung bãi xói càng sâu thì khả năng gây bồi càng khó và mất nhiều thời gian hơn.

Bể rộng bãi (theo phương ngang bờ) cần khôi phục nhằm đảm bảo điều kiện sinh trưởng cho cây, tốt nhất là xấp xỉ với bề rộng bãi trước khi xảy ra xói lở (Tuấn và nnk., 2024):

$$B_F = i_b \cdot \frac{EC}{2} + 2L \quad (2)$$

Trong đó,

$$B_F + B_F^* \geq B_{F,min}$$

B_F - Bề rộng bãi cần khôi phục

EC - Chiều cao bậc xói lở (xem thêm Hình 1 và Hình 4)

$i_b (= 1/1000 - 1/2000)$ - Độ dốc bãi trung bình ở khu vực

B_{F^*} - Bề rộng đai rừng còn lại

$2L$ - Khoảng cách an toàn cho nhiễu động (L - chiều dài sóng nước nông trước bãi)

$B_{F,min}$ - Bề đai rừng tối thiểu theo yêu cầu giảm sóng hoặc để giảm thiểu hiệu ứng BNVB.

3.2.2. Xác định các mục tiêu khả dĩ và giải pháp bảo vệ bờ đa cấp độ

Không chỉ ở Việt Nam mà thực tiễn từ một số quốc gia trong khu vực như Thái Lan, Trung Quốc, Ấn Độ cho thấy công tác trồng lại rừng rất nan giải với tỷ lệ thành công rất thấp (Winterwerp và nnk, 2013; Besset và nnk., 2019). Ngoài lý do lâm sinh thì phần lớn dự án tái sinh rừng đều thất bại do việc lựa chọn sai vị trí hoặc giải pháp hỗ trợ được áp dụng có mục tiêu không khả dĩ.

Để có thể trồng rừng thì cần tái tạo được điều kiện sinh trưởng tự nhiên và bền vững cho rừng, trong đó điều kiện cân bằng động về trao đổi bùn



Hình 5. Bố trí không gian công trình để gây bồi
(a) Khi bãi nông (b) Khi bãi sâu (c) Bãi rộng: Chia làm nhiều lớp/đợt công trình gây bồi



cát đóng vai trò then chốt. Tuy nhiên, đây là vấn đề nan giải đối với ĐBSCL khi mà tác nhân chính là thâm hụt nguồn cung bùn cát sông và lún sụt đất đều là mãn tính, không thể giải quyết được ở phần lớn các đoạn bờ biển đang bị xói lở.

Như vậy, để nâng cao hiệu quả của các công trình bảo vệ bờ, cần xác định được mục tiêu bảo vệ khả dĩ (có thể thực hiện được), phù hợp với điều kiện xói lở thực tế tại từng đoạn bờ biển. Theo đó, công năng yêu cầu của hệ thống công trình cần được thiết kế theo mục tiêu khả dĩ tương ứng (Hình 6).

Căn cứ vào điều kiện thực tiễn và tính chất xói lở bờ biển ở ĐBSCL, có thể chia thành 4 cấp độ (trong đó có 3 cấp độ áp dụng giải pháp bảo vệ) tương ứng với các mục tiêu khả dĩ (Hình 6). Các giải pháp bảo vệ có mức độ can thiệp công trình cũng giảm dần từ cấp độ 1 tới cấp độ 3.

(a) Cấp độ 0:

Cấp độ này tương ứng với giải pháp không can thiệp. Phù hợp với những nơi đai rừng còn rộng (trên 500 - 1.000 m), xói lở ở mức độ nhẹ (EC = 0 - 0,50 m), có nguồn bùn cát, cần thời gian để tiếp tục theo dõi diễn biến.

(b) Cấp độ 1 - Giữ vị trí đường bờ hiện hữu và bảo toàn đai rừng còn lại

Giải pháp công trình cứng áp dụng ở cấp độ này có mục tiêu chính là ngăn chặn xói lở, giữ vị trí đường bờ hiện hữu và bảo toàn đai rừng còn lại (nếu có). Cấp độ này nên được áp dụng ở những vị trí bãi đã bị xói sâu (EC > 0,50 - 1,0 m), không thể gây bồi tạo bãi do không có nguồn cung bùn cát và do đó không thể khôi phục môi trường sống cho cây. Có thể nói đây là mục tiêu dễ dàng nhất trong ba cấp độ có áp dụng giải pháp bảo vệ do không có yêu cầu gây bồi. Tuy nhiên, công năng ĐGS vẫn cần được thiết kế theo yêu cầu giảm sóng (YCGS) sao để chiều cao sóng phía sau đê ở mức độ cho phép, không gây hại cho đai cây ngập mặn còn lại:

$$H_{s,t} \leq [H_s] \quad (3)$$

Trong đó $H_{s,t}$ là chiều cao sóng truyền phía sau đê; $[H_s]$ (= 0,40 m) là chiều cao sóng cho phép không gây hại tới cây ngập mặn.

Lưu ý YCGS theo công thức (3) hàm ý điều kiện sóng gió mùa lớn nhất năm. Ngoài ra, hệ thống công trình ĐGS còn cần đảm bảo trao đổi nước và dưỡng chất qua công trình để không làm hại tới cây (độ rỗng kết cấu và khoảng mở giữa các tuyến đê đủ lớn).

(c) Cấp độ 2 - Gây bồi tạo bãi

Ngoài mục tiêu giữ vị trí đường bờ như ở cấp độ 1, ở cấp độ này có thêm mục tiêu gây bồi tạo bãi phía sau đê. Cấp độ này áp dụng khi bãi bị xói ở mức độ nhẹ đến vừa (EC ≤ 0,50 m) và đặc biệt là cần có nguồn bùn cát cung cấp cho bãi biển (ví dụ gần cửa sông). Xói lở trên đoạn bờ biển không có yếu tố mãn tính mà chủ yếu xảy ra do các yếu tố tác động ngắn hạn (dao động mùa) hoặc do hiệu ứng BNVB (có thể xử lý được như đã nêu ở mục 3.1).

Để gây bồi thì cần bố trí không gian hệ thống công trình như thảo luận ở mục 3.1, tuy nhiên công năng thiết kế của hệ thống công trình cần thỏa mãn thêm điều kiện khống chế ứng suất tiếp đáy (do sóng, dòng chảy) trên bãi bùn nằm trong giới hạn cho phép để có thể gây bồi:

$$\tau_{b,max} \leq [\tau_b] \quad (4)$$

Trong đó, $\tau_{b,max}$ là ứng suất tiếp ở đáy tính toán (do sóng hoặc/và dòng chảy); $[\tau_b]$ là ngưỡng ứng suất tiếp ở đáy gây bồi hoặc chống xói đối với bùn.

Nhìn chung yêu cầu gây bồi bùn để tạo bãi chặt chẽ hơn nhiều so với các yêu cầu khác về điều kiện lâm sinh. Để gây bồi và không xảy ra xói trên bãi thì cần có sự phối kết hợp hài hòa giữa thiết kế bố trí không gian hệ thống công trình, nguồn cung bùn cát, kết cấu ĐGS với độ thấm rỗng phù hợp.

(d) Cấp độ 3 - Trồng tái tạo đai cây ngập mặn

Mục tiêu trồng tái tạo đai cây ngập mặn chỉ có thể thực hiện ở đoạn bờ biển có mức độ xói nhẹ (EC = 0,20 - 0,50 m) và có nguồn cung bùn cát dồi dào. Các tác nhân gây xói có thể được giảm thiểu hoặc loại bỏ hoàn toàn (ví dụ do hiệu ứng BNVB).

Để có thể trồng tái tạo rừng, trước tiên cần sự hỗ trợ của hệ thống công trình gây bồi nhằm khôi phục lại bãi tới cao trình xấp xỉ so với trước xói lở. Về cơ bản, yêu cầu thiết kế công năng của hệ thống công trình giảm sóng gây bồi tương tự như đối với cấp độ 2 nhưng có thêm yêu cầu về ứng suất cho phép ($[\tau_b]$ trong PT. 4) theo điều kiện sinh trưởng của cây non ở các giai đoạn đầu phát triển. Hệ thống công trình gây bồi có thể được xem như đóng vai trò thay thế chức năng lá chắn của đai cây tiên phong, bảo vệ và hỗ trợ tái lập chu trình sinh trưởng cho đai cây ở phía sau.



Hình 6. Các cấp độ bảo vệ bờ tương ứng với mục tiêu khả dĩ



Trong điều kiện thuận lợi về nguồn cung bùn cát bồi đắp và bãi có thể khôi phục tới cao trình phù hợp, cấp độ 2 có thể được nâng cấp dần thành cấp độ 3.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trước tình trạng sạt lở bờ biển bùn và suy thoái RNM ngày càng trở nên trầm trọng ở ĐBSCL trong thời gian gần đây, đã có nhiều giải pháp công trình được các địa phương áp dụng để hỗ trợ công tác trồng lại rừng, giảm thiểu tác động xói lở. Tuy đã có một số thành công, nhưng nhìn chung hiệu quả của các giải pháp vẫn còn khá khiêm tốn, chưa thực sự có cơ sở vững chắc để có thể nhân rộng, đáp ứng mục tiêu bảo vệ bờ biển một cách khả dĩ cho khu vực ĐBSCL.

Sự thâm hụt nghiêm trọng nguồn cung bùn cát từ sông và hiệu ứng BNVB dưới ảnh hưởng của lún sụt đất, nước biển dâng là những tác nhân cơ bản gây ra vòng lặp suy thoái môi trường sống của RNM và xói lở bờ biển. Vì vậy, để nâng cao hiệu quả công tác bảo vệ bờ và hỗ trợ trồng rừng thì các giải pháp công trình hỗ trợ gây bồi cần phải được dựa trên nguyên lý chung là thiết lập lại sự cân bằng động lực bùn hạt mịn cho đoạn bờ biển xem xét. Tuy nhiên, phải căn cứ theo điều kiện cụ thể về tính chất của xói lở ở từng nơi để xác định mục tiêu bảo vệ khả dĩ, từ đó thiết kế công năng tương ứng cho giải pháp. Từ thực tiễn về tính chất xói lở ở ĐBSCL, nghiên cứu đã đề xuất giải pháp bảo vệ phù hợp với mục tiêu khả dĩ với 4 cấp độ, trong đó có 3 cấp độ cần sự can thiệp ở mức độ khác nhau của các giải pháp công trình.

Kết quả nghiên cứu mới dừng lại ở mục tiêu chính là cung cấp cơ sở khoa học và nguyên lý chung. Để có thể triển khai được trong thực tiễn, qua đó củng cố thêm về cơ sở lý luận, trong thời gian tới cần có thêm những nghiên cứu có chiều sâu, cụ thể hơn cho từng khu vực về quá trình thủy động lực, hình thái bồi lắng bùn cát hạt mịn trên bãi bùn cây ngập mặn; về nguyên lý bố trí không gian hệ thống công trình giảm sóng gây bồi đáp ứng với các mục tiêu khác nhau. Ngoài ra, cũng cần có thêm nghiên cứu điều tra, khảo sát để đưa ra quy hoạch chi tiết về mục tiêu khả dĩ và yêu cầu bảo vệ cho từng vùng ở khu vực ĐBSCL dựa trên nguồn gốc, tính chất, quy mô của sự mất cân bằng bùn cát ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Anthony, E., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P., and Nguyen, V. L., 2015. Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5, 14745.
Besset, M., Gratiot, N., Anthony, E.J., Bouchette, F., Goichot, M., Marchesiello, P., 2019. Mangroves and shoreline erosion in the Mekong River delta, Viet Nam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226, 106263.

2. CPMD, 2018. *Decision Support Tool for Coastal Protection for the Mekong Delta (CPMD). Project report. Integrated Coastal Management Programme (ICMP) of the 'Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). 238 pp.*
3. Gratiot, N., Bildstein, A., Anh, T. T., Thoss, H., Denis, H., Michallet, H., Apel, H., 2017. Sediment flocculation in the Mekong River estuary, Vietnam, an important driver of geomorphological changes. *Comptes Rendus Geoscience*, 349, pp. 260-268.
4. Kondolf, G.M., Rubin, Z.K., and Minear, J.T., 2014. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resour. Res.*, 50, pp. 5158-5169.
5. Manon, B., Edward J. Anthony, Guillaume Brunier and Philippe Dussouillez., 2016. Shoreline change of the Mekong River delta along the southern part of the South China Sea coast using satellite image analysis (1973-2014). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 22, 2, pp. 137-146.
6. Minderhoud, P.S.J., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H., and Stouthamer, E., 2017. Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*. 12(2017) 064006.
7. Tuan, T.Q., 2024. *Effectiveness of coastal protection in the Vietnamese Mekong Delta, IUCN Vietnam report.*
8. Tuan, T.Q., Linh, K. P., Son, H. T., 2024. Chapter 15 - Erosion of mangrove-mud coasts, resilience of coastal protection, and outlook on nature-based solutions in the Vietnamese Mekong Delta, Editor(s): Hong Quan Nguyen, Heiko Apel, Quang Bao Le, Minh Tú Nguyễn, Venkataramana Sridhar, In *Ecohydrology from Catchment to Coast, The Mekong River Basin, Elsevier*, pp. 479-525, ISBN 9780323908146.
9. Tuan, T.Q. and Luan, M.T., 2020. Monsoon wave transmission at bamboo fences protecting mangroves in the Lower Mekong Delta. *Applied Ocean Research, Elsevier*, 101, 08/2020, 102259. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102259>.
10. Tuan, T.Q., Luan, M.T., and Cuong L.N., 2022. Laboratory study of wave damping by porous breakwaters on mangrove mudflats in the Mekong River Delta. *Ocean Engineering, Elsevier*. 258, 08/2022, 111846.
11. Winterwerp, J.C., Erfteimeijer, P.L.A., Suryadiputra, N., van Eijk, P., and Liqian Zhang, 2013. Defining Eco-Morphodynamic Requirements for Rehabilitating Eroding Mangrove-Mud Coasts. *Wetlands*, 33, pp. 515-526.
12. Winterwerp, J.C., Albers, T., Anthony, E.J., Friess, D. A., Mancheño, A.G., Moseley, K., Muhari, A., Naipal, S., Noordermeer, J., Oost, A., Saengsupavanich, C., Tas, S.A.J., Tonnejck, F.H., Wilms, T., Bijsterveldt, C.V, Eijk, P.V., Lavieren, E.V., Wesenbeeck, B.K.V., 2020. Managing erosion of mangrove-mud coasts with permeable dams - lessons learned, *Ecological Engineering*, 158, 106078.