

# MÔ PHỎNG XÂM NHẬP MẶN Ở ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG TRONG ĐIỀU KIỆN BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ TÁC ĐỘNG TỪ THƯỢNG NGUỒN BẰNG MÔ HÌNH DELFT3D

Trần Đình Hoà, Trần Phương Anh,  
Nguyễn Thị Ngọc Nhân, Đỗ Hoài Nam

Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam

Võ Quốc Thành

Đại học Cần Thơ

Nguyễn Duy Du

Sở Nông nghiệp và Phát triển nông thôn Tp. Hà Nội

**Tóm tắt:** Diễn biến xâm nhập mặn (XNM) ở Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) ngày càng phức tạp và nghiêm trọng do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu (BĐKH) và các hoạt động phát triển của các quốc gia có chung lưu vực. Trước các thách thức đó, đã có nhiều nghiên cứu đánh giá diễn biến XNM của vùng, nhưng còn nhiều hạn chế do số liệu đo đạc không đầy đủ, chế độ thủy lực rất phức tạp. Nghiên cứu này sử dụng mô đun thủy động lực (Flow) và mô đun hỗ trợ tạo lưới (Grid) của mô hình Delft3D để mô phỏng XNM vùng ĐBSCL trong điều kiện BĐKH và tác động từ nội tại. Trong đó, mô đun thủy động lực sử dụng biên thượng lưu tại trạm Kratie được mô phỏng bởi mô hình WEHY có xét đến vận hành hồ chứa ở thượng lưu. Nghiên cứu đã mô phỏng diễn biến XNM vùng ĐBSCL cho giai đoạn giữa thế kỷ (năm 2049), cuối thế kỷ (năm 2099) theo hai kịch bản phát thải trung bình (ssp245) và cao (ssp585) trong Dự án Đối chứng các Mô hình Khí hậu lần 6 (CMIP6). Kết quả mô phỏng cho thấy XNM được dự báo sẽ diễn ra gay gắt nghiêm trọng hơn rất nhiều so với kịch bản hiện trạng.

**Từ khóa:** Xâm nhập mặn, biến đổi khí hậu, tác động từ thượng nguồn, mô hình Delft3D.

**Summary:** The progression of saline intrusion (SI) in the Mekong Delta (MD) is becoming increasingly complex and severe due to the impacts of climate change and developmental activities by countries sharing the same river basin. Despite numerous studies assessing the region's SI, there are limitations due to incomplete measurement data and the highly complex hydraulic regime. This study utilizes the hydrodynamic module (Flow) and grid support module (Grid) of the Delft3D model to simulate SI in the MD under the conditions of climate change and internal influences. The hydrodynamic module uses the upstream boundary at the Kratie station, simulated by the WEHY model, which considers the operation of upstream reservoirs. The study simulates the progression of SI in the MD for the mid-century (2049) and the end of the century (2099) under two emission scenarios, medium (ssp245) and high (ssp585), as part of the 6th Climate Model Intercomparison Project (CMIP6). The simulation results indicate that SI is expected to become significantly more severe compared to the current scenario.

**Keywords:** Saline intrusion, climate change, upstream human interventions, Delft3D model.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xâm nhập mặn (XNM) được đánh giá là một trong những loại hình thiên tai xảy ra thường xuyên ở các vùng cửa sông, ven biển của Việt Nam. Trong số đó, Đồng bằng sông Cửu Long

(ĐBSCL) là khu vực chịu tác động nghiêm trọng nhất bởi XNM. Theo thống kê, thiệt hại do hạn mặn năm 2004-2005 lên đến 720 tỷ đồng. Năm 2009-2010, XNM ảnh hưởng đến 620.000 ha lúa đông xuân. Đợt hạn mặn lịch sử năm 2015-2016, được ước tính gây thiệt hại trên toàn vùng ĐBSCL lên tới khoảng 5.500 tỷ đồng. Trong đó, sản xuất nông nghiệp bị thiệt hại nặng nề nhất, ước tính khoảng 3.000 tỷ

Ngày nhận bài: 09/9/2024

Ngày thông qua phản biện: 07/10/2024

Ngày duyệt đăng: 13/10/2024

đồng, thiệt hại trong nuôi trồng thủy sản khoảng 200 tỷ đồng và khoảng 600.000 hộ dân bị thiếu nước sinh hoạt. Đợt hạn mặn năm 2019-2020 đã ảnh hưởng tới 10/13 tỉnh ĐBSCL, ranh giới độ mặn 4g/l đã làm 42,5% diện tích tự nhiên của toàn vùng bị ảnh hưởng, tương đương 1.688.600 ha, cao hơn năm 2016 là 50.376 ha. Gây thiệt cho khoảng 74.000 ha diện tích sản xuất nông nghiệp, ảnh hưởng tới việc cấp nước sinh hoạt cho 96.000 hộ dân [1], [2]. Có thể nhận thấy hạn mặn đã gây ra thiệt hại, tổn thất lớn ở ĐBSCL.

Đã có nhiều nghiên cứu về XNM, tuy nhiên, những nghiên cứu này chưa xét đến tác động của BĐKH và từ thượng nguồn [3], [4]; hoặc đã xem xét những tác động đó nhưng sử dụng các kịch bản phát triển kinh tế-xã hội cũ [5], [6], [7], [8]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu đã sử dụng mô hình thủy lực một chiều (MIKE11) kết hợp với GIS để đánh giá diễn biến mặn. Tuy nhiên, ĐBSCL là vùng có địa hình phức tạp với nhiều kênh rạch nhỏ và công trình thủy nên khi sử dụng mô hình thủy lực một chiều không thể mô phỏng đầy đủ và chính xác quá trình XNM.

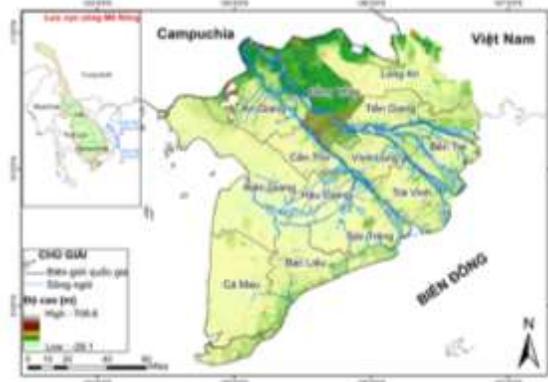
Để giải quyết vấn đề này, mô hình Delft3D cho phép tính toán trên cả lưới tính cấu trúc và lưới phi cấu trúc nên phù hợp với các vùng có địa hình phức tạp [9], sử dụng tọa độ Sigma giúp việc chia lưới bám sát địa hình và các biên sông. Ngoài ra, Delft3D có tính toán đa chiều, đặc biệt là sự kết hợp của lưới 1D và 2D. Tính năng này hiệu quả khi xem xét các kênh rạch nhỏ. Chính vì vậy, nghiên cứu sử dụng mô hình Delft3D để mô phỏng XNM ở ĐBSCL xét đến tác động của BĐKH, phát triển ở thượng nguồn và trong nội vùng. Nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng, hỗ trợ công tác phòng ngừa và giảm thiểu tối đa thiệt hại do XNM gây ra.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

ĐBSCL là trung tâm sản xuất nông nghiệp,

thủy sản, cây ăn quả nhiệt đới lớn nhất Việt Nam. Mạng lưới sông ngòi, kênh rạch chằng chịt, đường bờ biển dài hơn 700 km và địa hình thấp (Hình 1) là những yếu tố tự nhiên thuận lợi cho sản xuất nông nghiệp, nhưng đồng thời cũng làm tăng nguy cơ XNM.



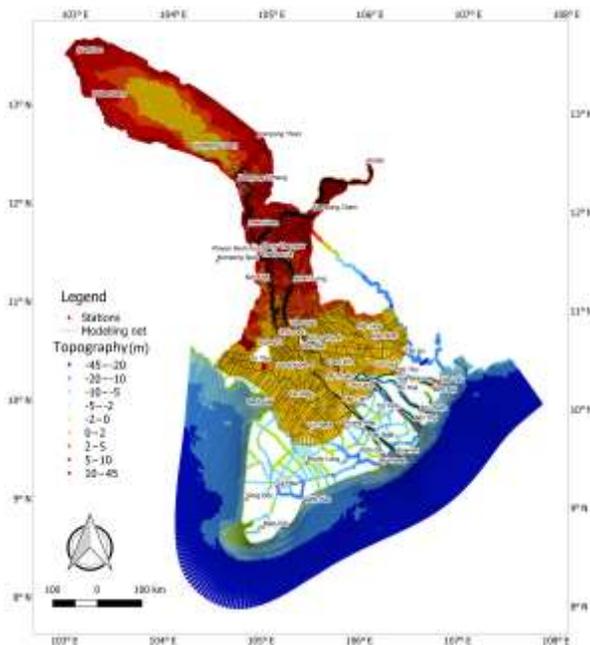
Hình 1: Bản đồ hình thái lưu vực ĐBSCL

Dưới tác động của BĐKH và hoạt động phát triển ở thượng nguồn tình trạng hạn hán, XNM ở ĐBSCL diễn ra cực đoan hơn cả về tần suất lẫn cường độ. Tiêu biểu là đợt hạn mặn năm 2015-2016, được đánh giá là đợt hạn mặn lịch sử trong vòng 100 năm qua. Đợt hạn mặn năm 2019-2020 đã phá vỡ mọi kỷ lục được xác lập. Hiện nay, do ảnh hưởng của hiện tượng ElNino vùng ĐBSCL hầu như không có mưa (thâm hụt lượng mưa khoảng 60-95%). Cùng với đó, dòng chảy từ thượng nguồn sông Mê Công về ĐBSCL ở mức thấp hơn trung bình nhiều năm, kết hợp với triều cường khiến cho XNM lấn sâu vào trong nội đồng [10].

### 2.2. Thiết lập mô hình Delft3D

Mô hình Delft3D được xây dựng và phát triển bởi Viện Thủy lực Delft (Hà Lan), có khả năng tính toán-mô phỏng hai hoặc ba chiều các quá trình thủy động lực và chất lượng nước các vùng cửa sông, ven bờ biển. Nghiên cứu này sử dụng mô đun thủy động lực học (Flow) và mô đun hỗ trợ tạo lưới tính (Grid) của mô hình Delft3D để mô phỏng diễn biến XNM ở ĐBSCL có xét đến BĐKH và tác động từ thượng nguồn.

Mô hình Delft3D được thiết lập và hoàn thiện cho ĐBSCL dựa trên các phiên bản [11], [12]. Toàn bộ ĐBSCL được mô hình hóa bằng phương pháp kết hợp mạng 1D và lưới 2D trong một miền tính toán duy nhất. Ngoài ra, quá trình thủy động lực học và XNM được tính toán trực tiếp (cho từng bước thời gian) mang lại kết quả chính xác hơn so với cách tính toán theo từng mô đun. So với bộ thông số mô hình được thiết lập trước đó [13], mô hình hiện tại bổ sung các cửa công để kiểm soát lưu lượng nước đến ở những khu vực được chọn. Các công này được đặt dọc theo phía Tây của ĐBSCL và vùng Quản Lộ-Phụng Hiệp với mục đích ngăn XNM vào những vùng này [14]. Phạm vi mô phỏng bao phủ hạ lưu sông Mê Công từ Kratie, Campuchia đến cửa sông và kéo dài khoảng 80km về phía biển, như được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2: Lưới số và địa hình sông từ phép nội suy mặt cắt và địa hình thềm ĐBSCL [13]

Miền tính toán bao gồm một lưới đa chiều với các kết nối 1D và 2D. Ở ĐBSCL các kênh cấp I và cấp II được thể hiện bằng lưới 1D trong khi các ô lưới 2D được sử dụng cho các kênh chính của sông Cửu Long, vùng ngập lũ và

thềm lục địa. Lưới 1D có chiều dài phân đoạn đồng nhất là 0,4km trong khi các ô lưới 2D có độ phân giải khác nhau tùy thuộc vào quy mô không gian của các quá trình hình thái và thủy động lực chiếm ưu thế cục bộ. Cụ thể, kích thước ô 2D nhìn chung đối với dòng chính sông Mê Công khoảng 0,7 km, giảm xuống còn khoảng 0,2 km tại các nhánh sông và vùng hợp lưu. Các ô 2D có kích thước to hơn đối với vùng đồng bằng ngập nước và vùng biển, tăng kích thước lên tới khoảng 2 km. Lưới tính có tổng cộng 73.504 nút lưới.

#### Nguồn dữ liệu sử dụng:

(i) *Tài liệu địa hình*: Số liệu độ sâu ở ĐBSCL được tổng hợp từ nhiều nguồn khác nhau, như dữ liệu mặt cắt ngang của mô hình thủy động lực 1D-ISIS cho vùng ĐBSCL [11]. Mạng lưới 1D của các sông cấp I và cấp II sử dụng dữ liệu mặt cắt trực tiếp được trích xuất từ mô hình 1D-ISIS. Đối với vùng biển, số liệu được lấy từ ETOPO với độ phân giải khoảng 1km. Địa hình vùng ngập lũ được lấy từ mô hình số độ cao, với độ phân giải 250m do Ủy hội sông Mê Công (MRC) cung cấp. Các cửa sông đã được cập nhật với dữ liệu đo đạc năm 2016 [12].

(ii) *Số liệu thủy văn*: Số liệu mực nước, lưu lượng và phù sa tại trạm Kratie.

**Điều kiện biên**: Đối với thủy động lực học, lưu lượng tại trạm Kratie được xác định là biên trên và mực nước biển là biên dưới. Ngoài ra, biên ngang bờ biển được xác định là biên Neumann cho phép dòng chảy ven bờ được tính toán chính xác hơn [15]. Lưu lượng nước tại Kratie được tạo ra bởi đường tương quan mực nước và lưu lượng thực đo, cập nhật bởi MRC. Biên dưới sử dụng mực nước biển được tính toán từ tám thành phần thủy triều thiên văn chính được trích xuất từ mô hình thủy triều toàn cầu của TPXO 8.2 [16].

Đối với biên mặn, biên dưới là độ mặn nước biển được đặt thành hàm lượng muối của Biển Đông là 34 mg/l, còn biên trên là 0 mg/l do mặn chưa bao giờ xâm nhập tới Kratie. Cách

tiếp cận này sẽ giải quyết được nhược điểm của các mô hình 1D trước đây phải xác định điều kiện biên tại các cửa sông (độ mặn tại các cửa sông có sự biến đổi rất lớn theo thời gian).

**Điều kiện ban đầu:** Chế độ thủy văn ở ĐBSCL chịu tác động lớn bởi chế độ lũ hàng năm. Hơn nữa, hồ Tonle Sap đóng vai trò quan trọng trong việc điều tiết dòng chảy ở ĐBSCL. Mực nước của hồ Tonle Sap thay đổi theo mùa rất lớn. Do vậy, đặc tính này phải được thể hiện trong điều kiện ban đầu giúp giảm thời gian thích ứng (spin-up) của mô hình. Trên thực tế, trận lũ của năm trước sẽ làm đầy hồ Tonle Sap và lượng nước của hồ sẽ chảy vào sông Mê Công trong mùa kiệt năm sau. Vì vậy, mô hình được tách ra trong trận lũ năm 2010 và kết quả này được sử dụng làm điều kiện ban đầu.

(iii) *Kịch bản BĐKH và các hoạt động ở thượng nguồn*

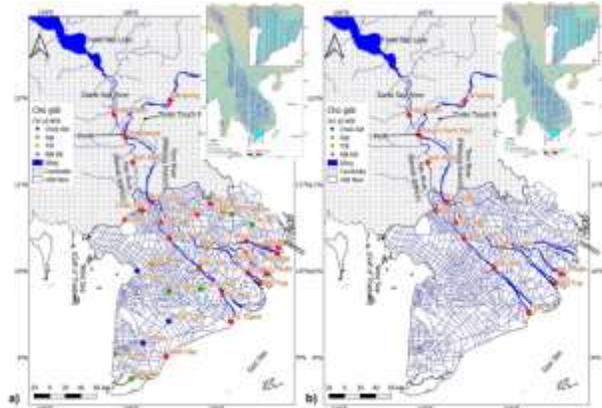
Nghiên cứu này sử dụng kết quả mô phỏng lưu lượng (tại trạm Kratie) bởi mô hình thủy văn vật lý thực WEHY [17] đã tích hợp quy trình vận hành hồ chứa ứng với mô hình CNRM-EMS2-1(CNRM) và NorESM2-MM (Nor) theo hai kịch bản chia sẻ kinh tế-xã hội trung bình (SSP245) và cao (SSP585) trong Dự án Đối chứng các Mô hình Khí hậu lần 6 (CMIP6) làm điều kiện biên trên. Mô phỏng XNM được thực hiện cho giai đoạn giữa (2049) và cuối (2099) thế kỷ 21.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

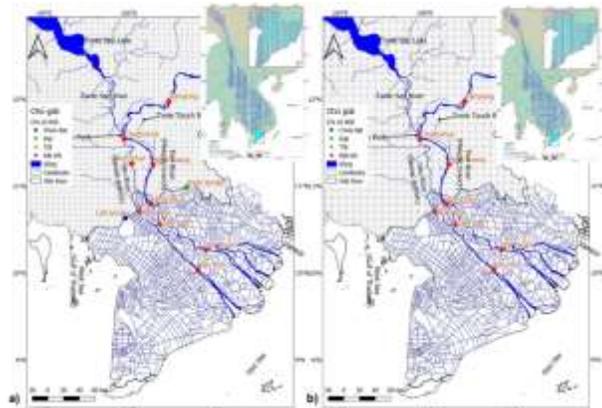
#### 3.1. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Nghiên cứu sử dụng các phương pháp và chỉ số đánh giá khác nhau để hiệu chỉnh và kiểm định kết quả mô phỏng của mô hình Delft3D. Chỉ số hiệu quả Nash (NSE) được sử dụng để đánh giá mức độ tương quan các giá trị lưu lượng, mực nước thực đo và mô phỏng tại các trạm thủy văn trong năm 2000 và 2001. Kết quả tính toán chỉ số NSE cho thấy, hầu hết giá trị NSE tại các trạm đo đều cao hơn 0,5 (trên

mức “đạt yêu cầu”) (Hình 3, 4). Điều này chỉ ra rằng, hiệu suất của mô hình có tính ổn định cao và có khả năng mô phỏng đặc tính thủy động lực ở ĐBSCL.



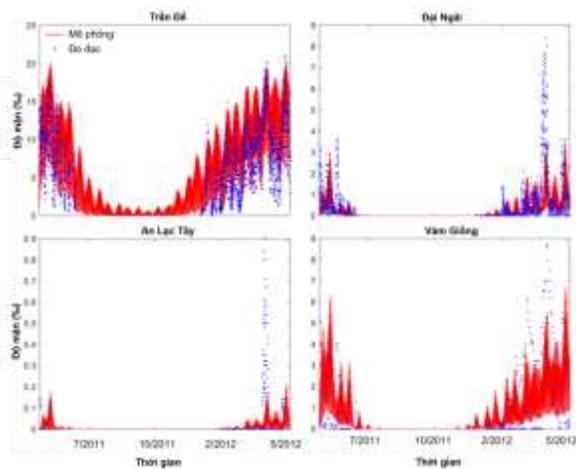
Hình 3: Giá trị NSE tính toán từ quá trình a) hiệu chỉnh (năm 2000) và b) kiểm định (năm 2001) mực nước tại các trạm đo ở ĐBSCL



Hình 4: Giá trị NSE tính toán từ quá trình a) hiệu chỉnh (năm 2000) và b) kiểm định (năm 2001) lưu lượng tại các trạm đo ở ĐBSCL

Sau khi kiểm định các đặc trưng thủy lực, tiến hành tính toán lan truyền mặn cho hệ thống sông ở ĐBSCL bằng mô đun truyền tải khuếch tán. Mô đun lan truyền mặn được tính toán bằng cách giữ các thông số thủy lực sau khi hiệu chỉnh, tiến hành hiệu chỉnh hệ số khuếch tán. Phương pháp thử sai (trial and error) được sử dụng để hiệu chỉnh lan truyền mặn, bằng cách thử dần hệ số khuếch tán để xác định khoảng hệ số khuếch tán phù hợp cho mô hình. Kết quả hiệu chỉnh mặn từ 5/2011-

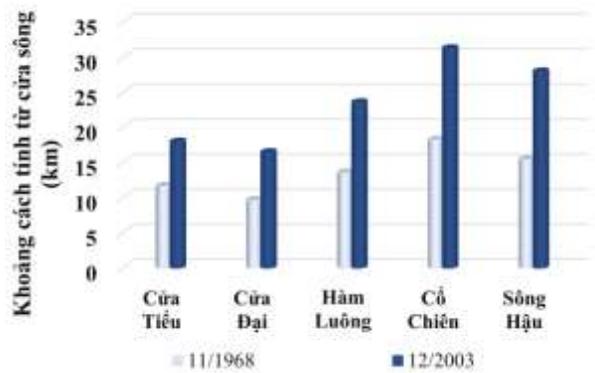
5/2012 (giai đoạn có số liệu đo mặn) tại trạm Trần Đề, Đại Ngãi, An Lạc Tây và Vàm Giồng (Hình 5) cho thấy độ mặn được mô phỏng và thực đo có sự tương đồng cả về biên độ và pha dao động. Do số liệu đo đặc mặn thu thập được là số liệu cao nhất theo ngày nên không sử dụng chỉ số để đánh giá mô hình. Hiệu chỉnh mô hình mặn khó khăn hơn do mặn bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác như gió mùa, nhu cầu sử dụng nước, thủy triều, lưu lượng nước thượng nguồn và cách vận hành các công trình công ngăn mặn.



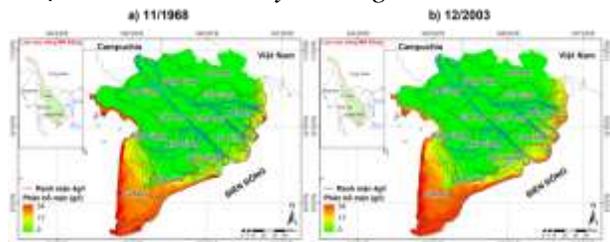
Hình 5: Độ mặn đo đạc (chấm xanh) và mô phỏng (đường đỏ) tại các trạm ở ĐBSCL

### 3.2. Mô phỏng XNM cho một số năm điển hình

Nghiên cứu lựa chọn hai đợt hạn mặn điển hình: tháng 11/1968 trong giai đoạn tự nhiên (1960-1968) và tháng 12/2003 trong giai đoạn có hồ chứa (1969 đến nay) để mô phỏng diễn biến XNM ở ĐBSCL. Kết quả cho thấy, đợt hạn mặn vào tháng 12/2003 nghiêm trọng hơn với ranh mặn 4‰ trên các tuyến sông chính đi sâu vào trong nội đồng hơn, khoảng 6-13 km so với tháng 11/1968 (Hình 6, 7). Phân bố độ mặn theo không gian (Hình 7) trong đợt hạn mặn tháng 12/2003 ở vùng ven Biển Đông cho thấy độ mặn cao hơn so với đợt hạn mặn tháng 11/1968.



Hình 6: Chiều dài xâm nhập mặn với ngưỡng mặn 4‰ trên các tuyến sông chính ở ĐBSCL



Hình 7: Bản đồ phân bố mặn vùng ĐBSCL trong đợt hạn mặn a) 11/1968 và b) 12/2003

### 3.3. Dự tính XNM theo kịch bản BĐKH

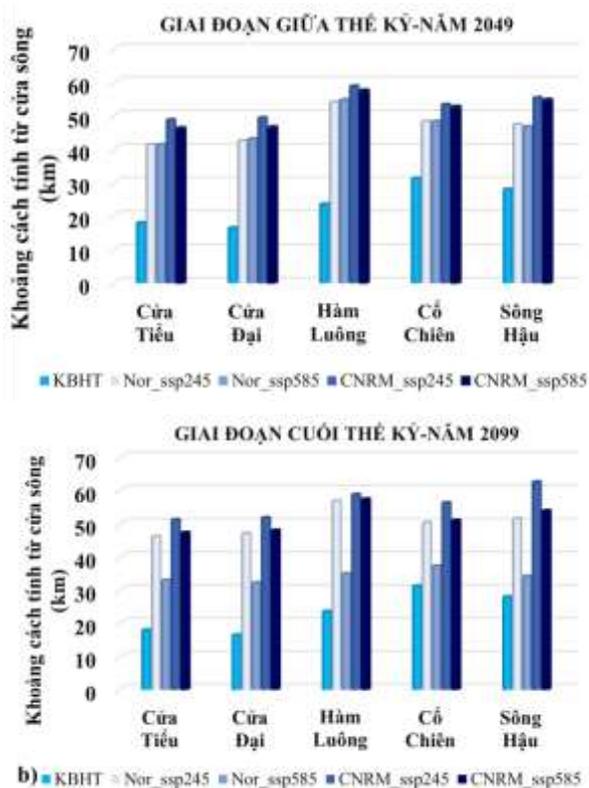
Các kịch bản mô phỏng diễn biến XNM trong giai đoạn giữa (2049) và cuối (2099) thế kỷ theo hai kịch bản phát triển kinh tế xã hội ssp245 và ssp585 ứng theo hai mô hình đã được lựa chọn trước đó là mô hình CNRM và Nor (Bảng 1).

Bảng 1: Kịch bản mô phỏng diễn biến XNM

TT	Kịch bản	BĐKH	Mô hình
1	KBHT	Hiện trạng	Đợt hạn mặn tháng 12/2003
2	KB_2049	ssp245	CNRM và Nor
3	KB_2049	ssp585	CNRM và Nor
4	KB_2099	ssp245	CNRM và Nor
5	KB_2099	ssp585	CNRM và Nor

Kết quả tính toán chiều dài XNM với ngưỡng mặn 4‰ trên các tuyến sông chính ở ĐBSCL ứng với các kịch bản mô phỏng mặn trong giai đoạn giữa và cuối thế kỷ được minh họa trong Hình 8. So sánh với giai đoạn khí hậu cơ sở,

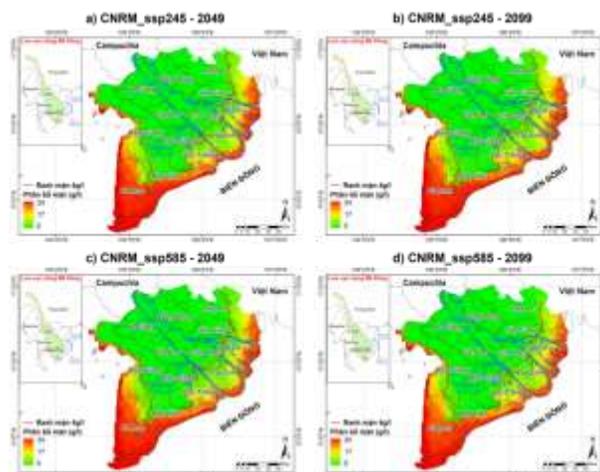
tất cả các trường hợp tính toán đều dự tính XNM tiếp tục lan rộng vào sâu trong đất liền, dao động từ 40-50 km (Cửa Tiểu, Cửa Đại và Cỏ Chiên) đến trên 50 km (sông Hàm Luông và sông Hậu) ở những năm 2050 và thậm chí đến 60 km ở sông Hậu ứng với giai đoạn cuối thế kỷ.



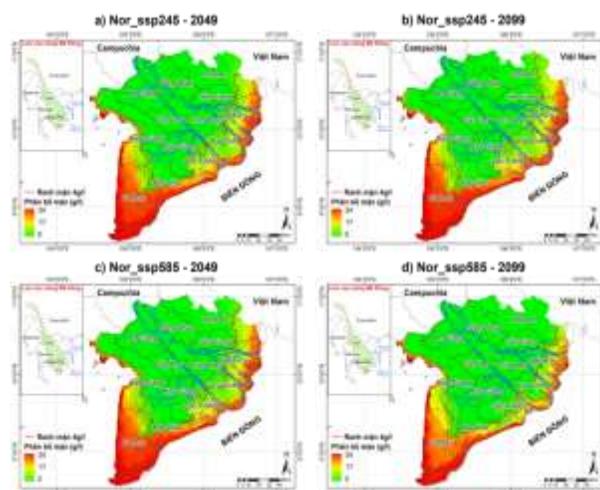
Hình 8: Chiều dài xâm nhập mặn với ngưỡng mặn 4‰ trên các tuyến sông chính ở ĐBSCL ứng với từng kịch bản mô phỏng trong a) giai đoạn giữa thế kỷ (2049) b) giai đoạn cuối thế kỷ (2099)

Hình 9 và Hình 10 kết quả mô phỏng xâm nhập mặn theo không gian ứng với các kịch bản phát thải trung bình (ssp245) và cao (ssp585). Kết quả cho thấy các kịch bản đều xác định các khu vực có mức XNM cao như vùng bán đảo Cà Mau, khu vực cửa sông ven Biển Đông và Biển Tây. Duy nhất chỉ có kịch bản mô phỏng bởi mô hình Nor ssp585 dự tính mức XNM ở giai đoạn cuối thế kỷ thấp hơn so với các kịch bản còn lại. Điều này phản ánh tính không chắc chắn

của các mô hình khí hậu và cũng là lý do tại sao nghiên cứu đã sử dụng tổ hợp mô hình để đánh giá XNM nhằm giảm thiểu sai số mô hình.



Hình 9: Bản đồ phân bố mặn vùng ĐBSCL với nguồn dữ liệu đầu vào từ mô hình CNRM theo hai kịch bản phát thải ssp245 và ssp585



Hình 10: Bản đồ phân bố mặn vùng ĐBSCL với nguồn dữ liệu đầu vào từ mô hình Nor theo hai kịch bản phát thải ssp245 và ssp585

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày sự cần thiết phải đánh giá, dự tính XNM ở ĐBSCL có xét đến tác động của BĐKH và phát triển ở thượng nguồn sông Mê Công. Mô hình Delft3D đã được thiết lập và hoàn thiện cho ĐBSCL dựa

trên các phiên bản đã được xây dựng trước đây. Biên trên của mô hình Delft3D đã sử dụng kết quả mô phỏng dòng chảy đến trạm Kratie bởi mô hình WEHY có xét đến vận hành hồ chứa ở thượng lưu. Kết quả nghiên cứu đã làm nổi bật đặc tính XNM ở ĐBSCL theo không gian và thời gian (giai đoạn giữa và cuối thế kỷ), đây là cơ sở khoa học để giúp các cơ quan quản lý và chính quyền địa phương đề xuất các giải pháp thích ứng ở thời điểm hiện tại và trong tương lai.

### LỜI CẢM ƠN:

Nhóm tác giả chân thành gửi lời cảm ơn đến Bộ Khoa học và Công nghệ đã tài trợ kinh phí thực hiện nhiệm vụ Nghị định thư Việt Nam-Hàn Quốc “Nghiên cứu tích hợp mô hình Khí tượng-Thủy văn-Đại dương và xây dựng cơ sở dữ liệu lớn để đánh giá và dự tính đặc trưng dòng chảy, hạn hán và xâm nhập mặn ở Đồng bằng sông Cửu Long có xét đến biến đổi khí hậu và tác động từ thượng nguồn” (Mã số: NĐT/KR/21/18).

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Ngọc Anh, ‘Hạn-mặn lịch sử 2016 ở đồng bằng sông Cửu Long. Bài học kinh nghiệm và những giải pháp ứng phó’. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2016.
- [2] ‘Đợt hạn, mặn nghiêm trọng nhất trong lịch sử ĐBSCL’, Báo Nhân Dân điện tử. [Online]. Available: <https://nhandan.vn/post-475180.html>
- [3] Đ. V. Dũng, T. Đ. Phương, and T. T. C. Lê Thị Oanh, ‘Khai thác mô hình MIKE 11 trong dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn vùng Đồng bằng sông Cửu Long’, *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, vol. 693, pp. 48–58, 2018.
- [4] N. V. Hồng and H. Nguyen, ‘Nghiên cứu dự báo xâm nhập mặn cho khu vực Đồng bằng sông Cửu Long’, 2020.
- [5] Đ. Q. Trí, ‘Ứng dụng mô hình Mike 11 mô phỏng và tính toán xâm nhập mặn cho khu vực Nam bộ’, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, vol. 11, pp. 39–46, 2016.
- [6] N. K. P. Lê Thị Phụng, B. C. Nam, and T. X. Hoàng, ‘Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn ở tỉnh Vĩnh Long’, 2017.
- [7] N. D. Khang, A. Kotera, T. Sakamoto, and M. Yokozawa, ‘Sensitivity of Salinity Intrusion to Sea Level Rise and River Flow Change in Vietnamese Mekong Delta-Impacts on Availability of Irrigation Water for Rice Cropping’, *Journal of Agricultural Meteorology*, vol. 64, no. 3, pp. 167–176, 2008, doi: 10.2480/agrmet.64.3.4.
- [8] D. H. Son, B. H. Linh, N. A. Đức, and T. A. Phương, ‘Nghiên cứu đánh giá tác động kép của biến đổi khí hậu và các phát triển thượng nguồn đến xâm nhập mặn vùng Đồng bằng sông Cửu Long’.
- [9] F. Achete, M. Van Der Wegen, D. Roelvink, and B. Jaffe, ‘A 2-D process-based model for suspended sediment dynamics: a first step towards ecological modeling’, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, no. 6, pp. 2837–2857, 2015.
- [10] VNMHA, ‘Nhận định tình hình ENSO, hạn mặn khu vực Tây Nguyên và Đồng bằng sông Cửu Long năm 2024’. [Online]. Available: <http://vmha.gov.vn/du-bao-107/nhan-dinh-tinh-hinh-enso-han-man-khu-vuc-tay-nguyen-va-dong-bang-song-cuu-long-nam-2024->

16614.html

- [11] P. Van, I. Popescu, A. Van Griensven, D. Solomatine, N. Trung, and A. Green, ‘A study of the climate change impacts on fluvial flood propagation in the Vietnamese Mekong Delta’, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 12, pp. 4637–4649, 2012.
- [12] V. Q. Thanh, J. Reyns, C. Wackerman, E. F. Eidam, and D. Roelvink, ‘Modelling suspended sediment dynamics on the subaqueous delta of the Mekong River’, *Continental Shelf Research*, vol. 147, pp. 213–230, 2017.
- [13] V. Q. Thanh *et al.*, ‘Flooding in the Mekong Delta: the impact of dyke systems on downstream hydrodynamics’, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 189–212, 2020a.
- [14] C. T. Hoanh, N. Phong, J. Gowing, T. P. Tuong, N. Ngoc, and N. Hien, ‘Hydraulic and water quality modeling: a tool for managing land use conflicts in inland coastal zones’, *Water Policy*, vol. 11, no. S1, pp. 106–120, 2009.
- [15] J. Roelvink and D.-J. Walstra, ‘Keeping it simple by using complex models’, *Advances in Hydro-science and Engineering*, vol. 6, pp. 1–11, 2004.
- [16] G. D. Egbert and S. Y. Erofeeva, ‘Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides’, *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, vol. 19, no. 2, pp. 183–204, 2002.
- [17] Hoa Tran *et al.*, ‘Assessing the impacts of the upstream reservoirs on hydrologic balance in the Mekong River Basin’. *Journal of Water and Climate Change*, 2024.