

BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU VÀ XÂM NHẬP MẶN: GIẢI PHÁP ĐẢM BẢO CẤP NƯỚC NGỌT BỀN VỮNG CHO THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Nguyễn Đức Thiện⁽¹⁾, Vũ Thị Vân Anh⁽²⁾, Trần Đức Dũng⁽¹⁾

⁽¹⁾Viện Môi trường và Tài nguyên - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁽²⁾Khoa Khí tượng Thủy văn và Tài nguyên nước - Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP HCM

Ngày nhận bài: 18/8/2025; ngày gửi phản biện: 18/8/2025; ngày chấp nhận đăng: 17/9/2025

Tóm tắt: Hạ lưu sông Sài Gòn - Đồng Nai (SG-ĐN) đang chịu áp lực xâm nhập mặn ngày càng gia tăng, gây ảnh hưởng đến khả năng khai thác và cung cấp nước ngọt, dưới tác động đồng thời của đô thị hóa, nước biển dâng và biến đổi khí hậu. Nghiên cứu kết hợp các công cụ mô hình hóa MIKE 21 FM - phân tích GIS nhằm cho thấy diễn biến xâm nhập mặn đến hoạt động bơm nước ngọt, nhằm đề xuất giải pháp và chiến lược tổng hợp giúp đảm bảo an ninh nguồn nước và phát triển đô thị bền vững. Kết quả hiệu chỉnh - kiểm định thủy lực cho chỉ số NSE trên 0,81 rất tốt và R^2 trên 0,82 tốt, đồng thời mô phỏng nồng độ mặn cho sai số PBIAS tốt. Kịch bản nước biển dâng được áp dụng bao gồm RCP4.5 và RCP8.5 cho năm 2030, 2050 và 2080. Kết quả cho thấy nồng độ mặn hiện trạng đều cao trên 0,3 g/l tại 3 trạm bơm (trạm Hòa Phú trên sông Sài Gòn và trạm Hóa An, Bình An trên sông Đồng Nai) vượt ngưỡng độ mặn cho phép bơm nước phục vụ sinh hoạt của nhà máy 0,25 g/l, trong đó nồng độ mặn cao nhất tại trạm Bình An. Nghiên cứu cho thấy xâm nhập mặn gia tăng do biến đổi khí hậu đồng thời đưa ra các giải pháp thực tiễn, giúp nhà quản lý ra quyết định hỗ trợ các ban ngành quản lý và khai thác hiệu quả nguồn nước ngọt trên sông.

Từ khóa: Mike 21 FM, xâm nhập mặn, biến đổi khí hậu, sông Sài Gòn, Thành phố Hồ Chí Minh.

1. Mở đầu

Xâm nhập mặn ảnh hưởng tới tài nguyên nước ngọt là vấn đề cấp bách trên quy mô toàn cầu mà nguyên nhân từ biến đổi khí hậu, nước biển dâng và đô thị hóa nhanh cùng tác động lên lưu vực [1]. Ảnh hưởng rõ nhất có thể thấy là nước biển dâng và sụt lún đất cùng khai thác nước ngầm quá mức dẫn đến tình trạng xâm nhập mặn ngày càng phức tạp, đặc biệt là tại các lưu vực đô thị ven biển - nơi dễ bị tổn thương đến sinh hoạt và đời sống của cộng đồng [2]. Dựa trên báo cáo của IPCC bao gồm AR4 (2007), AR5 (2014) và AR6 (2023), mực nước biển dâng trung bình năm gia tăng lần lượt qua các thời kỳ với 1,8 mm/năm giai đoạn 1961-2003, 3,2 mm/năm giai đoạn 1993-2010, 3,3 mm/năm giai đoạn 1993-2018. Việc cập nhật thêm các kịch bản nước biển dâng SRES (A1-2, B1-2), RCP (RCP2.6-8.5) và SSP (SSP1-1.9-8.5) trong các

báo cáo của IPCC giúp tăng độ chính xác dự báo mực nước biển đến năm 2100, lần lượt là 18-59 cm, 26-82 cm và 28-101 cm [3], [4], [5]. Trong đó, kịch bản RCP và SSP đã lồng ghép các tác động liên quan đến đô thị hóa bao gồm: Tiêu thụ năng lượng làm tăng phát thải khí nhà kính, thay đổi sử dụng đất và tăng áp lực lên hệ thống nước ở khu vực ven biển. Việc cập nhật thêm cho các kịch bản toàn cầu cho thấy rõ ràng hơn về vấn đề xâm nhập mặn ngày càng phức tạp còn tới từ hoạt động đô thị hóa gia tăng để đáp ứng nhu cầu phát triển kinh tế - xã hội trên thế giới.

Hệ thống sông Sài Gòn - Đồng Nai (SG-ĐN) đóng vai trò quan trọng trong cung cấp nước cho TP.HCM và vùng phụ cận chịu ảnh hưởng do các yếu tố kể trên, cho thấy tình hình khó khăn của vấn đề xâm nhập mặn đến dân sinh, công nghiệp, và nông nghiệp. Theo báo cáo xâm nhập mặn đầu năm 2016, nguồn nước sông Sài Gòn tại trạm bơm nước thô Hòa Phú có độ mặn cao nhất lên đến 0,35 g/l từ ngày

Liên hệ tác giả: Vũ Thị Vân Anh
Email: vtvanh@hcmunre.edu.vn

25/1 đến 27/1, nên nhà máy phải ngừng lấy nước thô trong tổng cộng 10 giờ. Tương tự, trên sông Đồng Nai, xâm nhập mặn cũng đã ảnh hưởng trực tiếp đến trạm bơm nhà máy nước Bình An độ mặn cao nhất lên đến 0,6 g/l từ ngày 5/2 đến 14/2 và Nhà máy nước Bình An đã ngừng lấy nước thô từ khoảng 10 giờ/ngày [6]. Trạm bơm Hóa An độ mặn chưa vượt quy chuẩn, nhưng cũng có xu hướng tăng và tình trạng thiếu nước hiện nay cũng đã gây ra nhiều khó khăn cho vận hành, sản xuất [7]. Theo SAWACO, độ mặn năm 2020 tại 3 trạm cấp nước chưa vượt ngưỡng kỷ lục như năm 2015-2016 khi các nhà máy phải ngừng lấy nước nhiều lần do mặn quá 0,25 g/l [8].

Với tác động mạnh mẽ của biến đổi khí hậu trên toàn cầu, vấn đề xâm nhập mặn là một đề tài khá nổi cộm hiện nay, rất nhiều tác giả trong nước cũng như ngoài nước đã tiến hành nghiên cứu về vấn đề này [9]. Những ứng dụng phần mềm nghiên cứu đa dạng có thể kể đến như mô hình SUTRA, MIKE21, SWI2, 2D-ERI. Tại cửa sông Terengganu của Malaysia, bằng mô hình MIKE21 ghi nhận khi thủy triều vào mùa xuân, vận tốc thủy triều cao hơn với cường độ xấp xỉ 0,8 m/s xâm nhập mặn sâu hơn vào đất liền, nhưng khi thực hiện xả nước ngọt với giá trị 100 m³/s thì xác định được tại trạm lấy nước không bị nhiễm mặn [10]. Tại khu vực Hersonissos của Hy Lạp, kết quả dựa trên mô hình SWI2 cho thấy nước biển đang tiếp cận giếng cấp nước nếu vẫn tiếp tục cách tiếp cận “business as usual”. Ngoài ra, nghiên cứu còn đưa ra 3 giải pháp hạn chế xâm nhập mặn: bơm nước thải đã qua xử lý để bổ sung tầng chứa nước, tối ưu hóa tỷ lệ bơm, khai thác nước mặn từ các địa điểm gần bờ biển [11]. Các nghiên cứu mô hình hóa xâm nhập mặn dưới tác động biến đổi khí hậu trong nước đã được áp dụng phổ biến, các tác giả chủ yếu sử dụng mô hình MIKE11 và MIKE21. Liên quan đến xâm nhập mặn ở lưu vực sông SG-ĐN, nghiên cứu đánh giá tác động của đô thị hóa, xây dựng công trình chống ngập đến xâm nhập mặn vùng hạ lưu, bao gồm các tỉnh TPHCM, Bình Dương, Long An, Đồng Nai [12]. Nghiên cứu khác đã đề xuất một khuôn khổ mô hình hóa trong đó các công cụ mô phỏng và tối ưu hóa được sử dụng để có được các quy tắc

vận hành hồ chứa tối ưu cho hồ chứa Dầu Tiếng đa mục tiêu trên sông Sài Gòn nhằm kiểm soát độ mặn hạ lưu qua mô hình MIKE 11 [13].

Từ các nghiên cứu trên, có thể thấy việc áp dụng mô hình toán để giải quyết vấn đề xâm nhập mặn đã được áp dụng phổ biến. Tuy nhiên, đối tượng của các nghiên cứu đa phần là ở quy mô lưu vực, cần có nghiên cứu vào vấn đề thực tế hơn là thiếu nước ngọt, tập trung mô phỏng và đánh giá chi tiết về xâm nhập mặn đến tài nguyên nước và trạm cấp nước phục vụ đời sống người dân. Ngoài ra, đánh giá xâm nhập mặn đến các trạm cấp nước thô trên sông Sài Gòn và tính đến trên sông Đồng Nai là cần thiết. Về mặt kỹ thuật mô hình lẫn mặt thực tế, các trạm nước thô này hoạt động gắn liền với nhau và cùng phục vụ cho người dân TP.HCM. Việc xây dựng mô hình mô phỏng dòng chảy và xâm nhập mặn cần có mạng lưới sông Sài Gòn - Đồng Nai đầy đủ các yếu tố thủy văn và địa hình để đảm bảo khả năng mô phỏng hiệu quả theo không gian và thời gian. Nghiên cứu tập trung đánh giá diễn biến mặn tại vùng khai thác nước ngọt nhằm cho thấy tác động xâm nhập mặn rõ ràng hơn so với các nghiên cứu trước chỉ đánh giá tổng quan xâm nhập mặn toàn vùng. Kết quả từ mô hình và GIS xây dựng bản đồ tại khu vực 3 trạm bơm qua các kịch bản giúp nghiên cứu đánh giá được rõ hơn về lan truyền xâm nhập mặn ảnh hưởng đến khai thác nước ngọt. Ngoài ra, dựa trên các kết quả, nghiên cứu đề xuất các giải pháp quản lý các nguồn cấp nước thô đối với vấn đề xâm nhập mặn.

2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Số liệu

Biên trên tại sông Sài Gòn là cửa xả của hồ Dầu Tiếng và tại Sông Đồng Nai là cửa xả của hồ Trị An. Biên dưới là Vàm Kênh kéo dài đến Vũng Tàu (Bảng 1). Lưới tính toán được thiết lập gồm 36.235 phần tử, 25.173 nút, góc nhỏ nhất của các phần tử tam giác là 26°. Một trong những dữ liệu đầu vào quan trọng nhất của MIKE 21 là dữ liệu địa hình đáy. Dữ liệu địa hình trên các sông được thu thập từ dữ liệu địa hình năm 2011 và có cập nhật năm 2014 từ các nguồn sau: Địa hình trên của Sông Sài Gòn và Đồng Nai của Viện Khoa Học Thủy Lợi Miền Nam và các

đề tài 2011, 2012 và 2014 [6]. Xây dựng bản đồ diễn biến mặn dựa trên phần mềm ArcGIS 10.8. Để xác định ngưỡng nồng độ mặn cho nghiên

cứu, theo SAWACO - Tổng công ty cấp nước Sài Gòn, các nhà máy dừng hoạt động lấy nước khi độ mặn trên sông vượt quá 0,25 g/l [8].

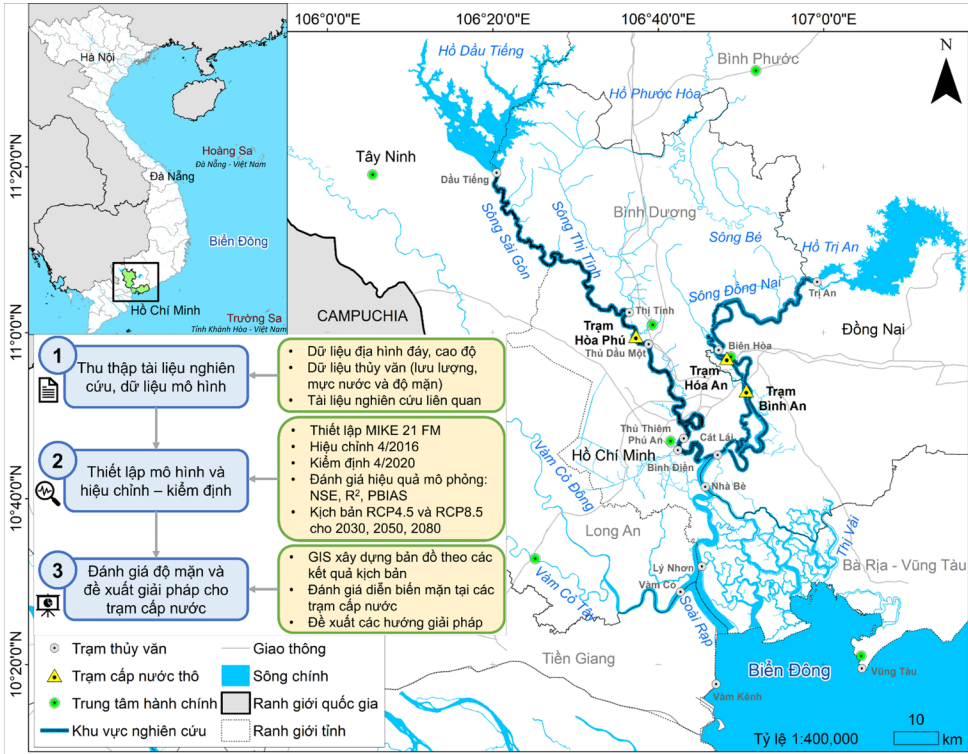
Bảng 1. Các dữ liệu sử dụng và kịch bản nước biển dâng

Dữ liệu	Vị trí	Thời gian	Bước thời gian
Lưu lượng	Dầu Tiếng và Trị An	Tháng 4/2016 và 4/2020	1 ngày
Mức nước	Vàm Kênh, Vũng Tàu, Vàm Cỏ, Bình Điền, Thị Tính, Nhà Bè, Thủ Dầu Một, Phú An, Biên Hoà		1 giờ
Độ mặn	Lý Nhân, Thủ Thiêm, Long Đại		2 giờ
Kịch bản	Năm 2030	Năm 2050	Năm 2080
RCP4.5	12 cm	22 cm	40 cm
RCP8.5	12 cm	25 cm	51 cm

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Các bước thực hiện trong nghiên cứu (Hình 1) gồm 3 bước: Bước 1, thu thập các số liệu cần thiết để chuẩn bị cho mô hình gồm dữ liệu địa hình đáy DEM, mực nước và độ mặn tại các biên cho khu vực nghiên cứu. Bước 2, xây dựng lưới tính và nội suy dựa trên dữ liệu đường bờ và địa hình. Xây dựng mô hình mô phỏng thủy lực theo

module HD dựa trên các số liệu đã thu thập và thực hiện hiệu chỉnh - kiểm định mực nước và độ mặn. Mô phỏng đánh giá qua chỉ số hiệu quả mô phỏng R^2 , NSE và PBIAS. Bước 3, đánh giá xâm nhập mặn tại các nguồn cấp nước thô cho TP.HCM theo mô phỏng hiện trạng và kịch bản. Từ đó, đề xuất các giải pháp cho quản lý khai thác nước ngọt tại trạm cấp nước Sài Gòn - Đồng Nai.



Hình 1. Bản đồ và quy trình thực hiện nghiên cứu

3. Kết quả và thảo luận

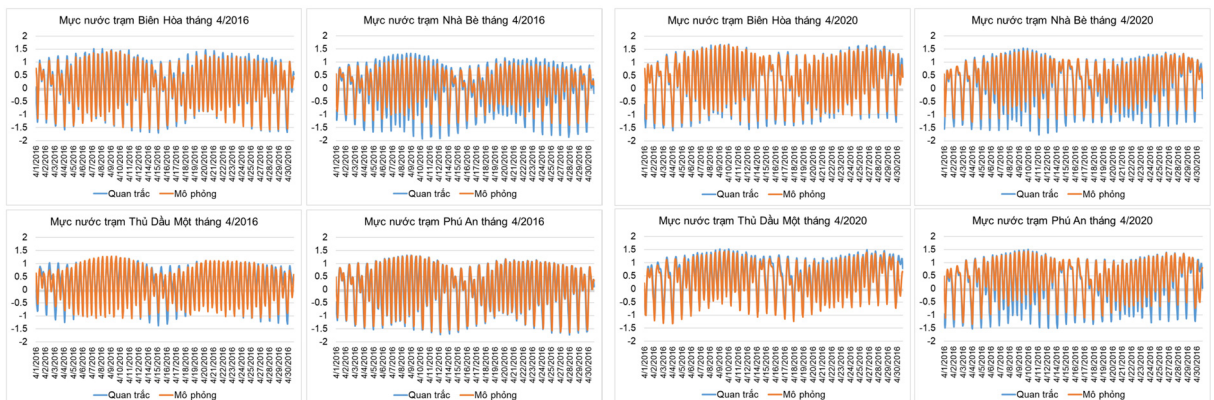
3.1. Kết quả

Mô hình thử dần hệ số nhám đến khi đạt kết quả tốt nhất cho dữ kiện năm 2016 và năm 2020 (Hình 2). Qua 2 chỉ số mô phỏng mực nước tại 4 trạm thủy văn cho thấy mức độ tốt với chỉ số R^2 và NSE từ 0,81 đến 0,97. Kết quả hiệu chỉnh mực nước cho thấy mực nước các trạm thủy văn dao động từ 1,5 m đến -2 m. Mực nước cao nhất tại trạm Biên Hòa là 1,5 m và mực nước thấp nhất tại trạm Nhà Bè khoảng -2 m. Nhìn chung, dao động mực nước tại Biên Hòa, Nhà Bè, Phú An đều khá cao, còn Thủ Dầu Một dao động thấp có thể giải thích bởi địa hình hẹp, vị trí xa ảnh hưởng thủy triều, và có điều tiết hồ Dầu Tiếng. Kết quả kiểm định mực nước cho thấy mực nước các trạm thủy văn dao động từ 1,7 m đến -1,7 m. Mực nước cao nhất tại trạm Biên Hòa là 1,7 m và mực nước thấp nhất tại trạm Nhà Bè khoảng -1,7 m. So sánh với giới hạn mực nước năm 2016 thì mực nước cao nhất đã tăng từ 1,5 m lên 1,7 m và mực nước thấp nhất từ -2 m lên -1,7 m.

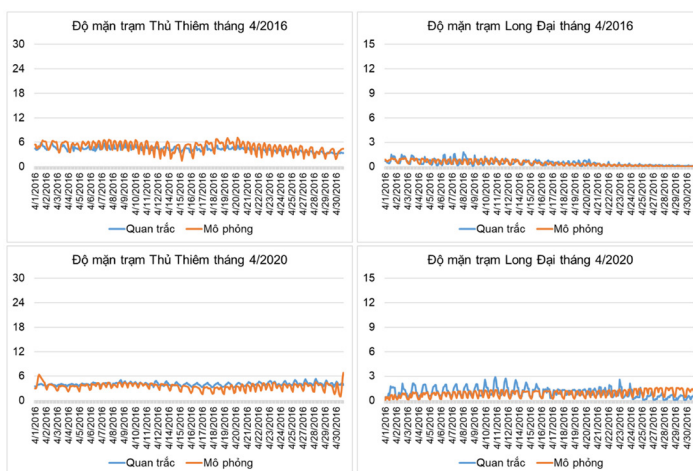
Sau khi đã mô phỏng mực nước, nghiên cứu tiến hành chỉnh hệ số khuếch tán để đánh giá hiệu quả mô phỏng mặn với thời gian tương tự tại 2 trạm (Thủ Thiêm cho sông Sài Gòn và Long Đại cho sông Đồng Nai) (Hình 3). Kết quả đánh giá độ hiệu quả mô phỏng so thấy sai số trong khoảng 9,03% đến 13,56% ở mức tốt. Độ mặn tại trạm Thủ Thiêm trong tháng 4/2016 dao động từ 3,20 đến 5,80 g/l và trong tháng 4/2020 dao động từ 3,23 đến 5,30 g/l. Xu thế dao động độ

mặn tại trạm Thủ Thiêm trên sông Sài Gòn tháng 4/2020 giảm so với tháng 4/2016. Độ mặn tại trạm Long Đại trong tháng 4/2016 dao động từ 0,1 đến 1,8 g/l và trong tháng 4/2020 dao động từ 0,1 đến 2,9 g/l. Xu thế dao động độ mặn tại trạm Long Đại trên sông Đồng Nai tháng 4/2020 tăng so với tháng 4/2016. Xu thế mặn tại Long Đại có phần mâu thuẫn với xu thế mực nước chung của năm 2020. Điều này có thể giải thích bởi các hoạt động điều tiết hồ chứa đẩy mặn tốt hơn ở nhánh Sài Gòn cùng các tác động thủy văn khác, làm dòng mặn tập trung về nhánh Đồng Nai nhiều hơn được trình bày chi tiết trong phần thảo luận. Tổng hợp kết quả (Bảng 2) cho thấy mô phỏng mực nước có R^2 từ 0,80 đến 0,95 cho hiệu quả mô phỏng từ tốt đến rất tốt, và có NSE từ 0,75 đến 0,94 cho mức độ đều rất tốt. Đối với độ mặn dùng chỉ số PBIAS (sai số mô phỏng so với thực tế, rất tốt khi $PBIAS < \pm 10$ và tốt khi $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$). Qua đó, kết quả độ mặn có sai số PBIAS từ $\pm 9,03\%$ đến $\pm 13,56\%$ thuộc mức tốt.

Sau khi đã hoàn thành hiệu chỉnh - kiểm định, nghiên cứu đánh giá cho các trạm cấp nước theo hiện trạng và các kịch bản biến đổi khí hậu (Hình 4). Kết quả mô phỏng được lấy ở cùng một thời điểm triều lên vào ngày 8/4/2016. Nồng độ mặn tại trạm Hòa Phú là 0,30 g/l, nồng độ mặn tại trạm Hóa An là 0,41 g/l và trạm Bình An là 0,42 g/l. Cho thấy nồng độ mặn tại các trạm cấp nước tháng 4/2016 vượt ngưỡng độ mặn cho phép lấy nước của nhà máy 0,25 g/l, và độ mặn trên sông Đồng Nai cao hơn [8]. Trong đó, độ mặn tại trạm Hòa Phú vượt 0,05g/l, trạm Hóa An vượt 0,16 g/l, và trạm Bình An vượt 0,17 g/l.



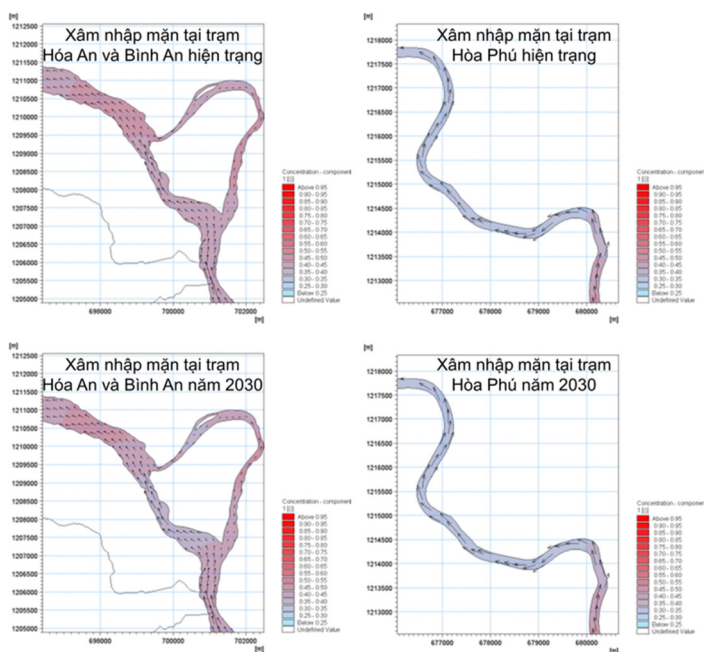
Hình 2. Kết quả hiệu chỉnh - kiểm định mực nước tại 4 trạm thủy văn



Hình 3. Kết quả hiệu chỉnh - kiểm định độ mặn tại 2 trạm Thủ Thiêm và Long Đại

Bảng 2. Tổng hợp kết quả hiệu chỉnh - kiểm định

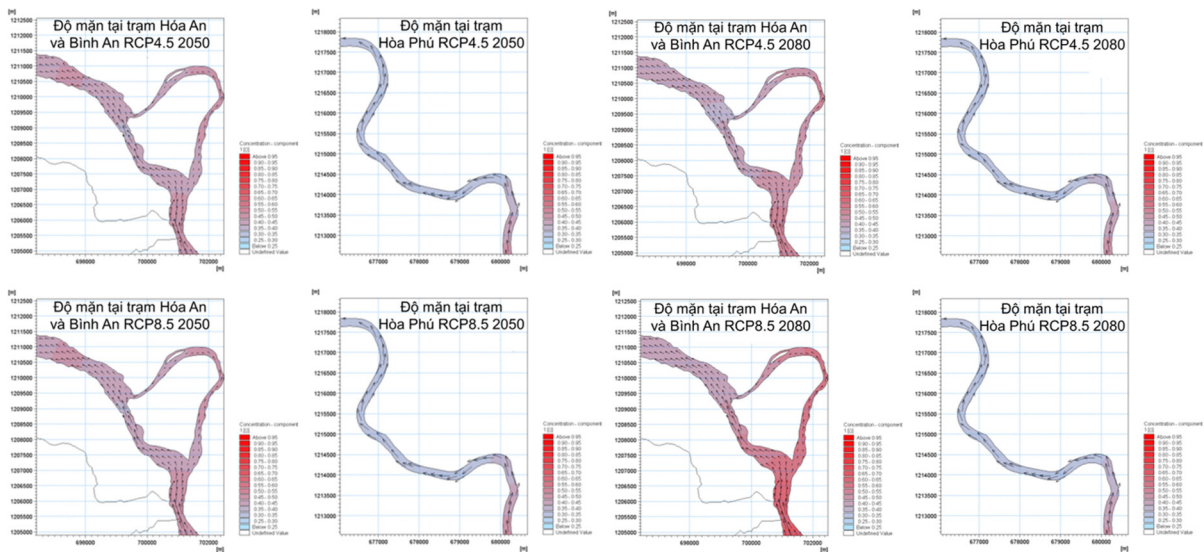
Trạm/ thời gian	Hiệu chỉnh		Kiểm định	
	R ²	NSE	R ²	NSE
Biên Hòa	0,95	0,94	0,93	0,93
Nhà Bè	0,97	0,92	0,89	0,85
Thủ Dầu Một	0,84	0,82	0,87	0,82
Phú An	0,82	0,81	0,92	0,86
Thủ Thiêm	9,03%		12,51%	
Long Đại	-11,80%		13,56%	



Hình 4. Kết quả mô phỏng mặn hiện trạng và kịch bản 2030 cho 3 trạm cấp nước

Chênh lệch nồng độ mặn ở hiện trạng và kịch bản năm 2030 (mức nước biển tăng 12 cm) rất nhỏ, chỉ gia tăng trong khoảng 0,01 g/l. Tuy nhiên vì trạm Bình An (khoảng 85km đến cửa sông Soài Rạp) gần hạ lưu và biển hơn nên sẽ chịu tác động thủy triều mạnh hơn so với trạm Hóa An (khoảng

95 km). Và trạm Hòa Phú trên sông Sài Gòn cũng nằm ở vị trí cách xa hạ lưu hơn so với 2 trạm trên nhánh sông Đồng Nai (khoảng 110 km). Vì vậy, có thể xác định độ mặn ảnh hưởng bởi thủy triều và biến đổi khí hậu, nồng độ cao nhất tại trạm Bình An, Hóa An, nhỏ nhất là Hòa Phú.



Hình 5. Kết quả mô phỏng mặn năm 2005 và 2080, với kịch bản RCP4.5 (trên) và kịch bản RCP8.5 (dưới) cho trạm Hóa An - Bình An (phải) và trạm Hòa Phú (trái)

Kết quả xâm nhập mặn đến các trạm cấp nước ở kịch bản năm 2050 (Hình 5), có thể thấy rõ nhất gia tăng độ mặn ở trạm Bình An nhánh sông Đồng Nai chịu ảnh hưởng của nước biển dâng. Tại năm 2050, trạm Bình An có độ mặn 0,46 g/l cho kịch bản RCP4.5 và 0,47 g/l cho kịch bản RCP8.5. Khi so sánh giữa 2 kịch bản RCP4.5 và RCP8.5, Trạm Hóa An và Hòa Phú chỉ chênh lệch 0,01 g/l. Cũng như khi so sánh với năm 2030 thì mức độ chênh lệch nhỏ. Mô phỏng xâm nhập mặn tác động đến các trạm cấp nước ở kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 năm 2080 (Hình 5), cho thấy độ mặn gia tăng mạnh ở vị trí trạm Bình An trên sông Đồng Nai. Hai trạm Hòa Phú và Hóa An chỉ chênh lệch nhỏ 0,01 g/l so với năm 2050, cũng như khi so sánh chênh lệch giữa 2 kịch bản RCP. Các kết quả cho thấy kịch bản phát thải cao RCP8.5 tác động đến quá trình lan truyền mặn nhiều hơn so với kịch bản RCP4.5 (Bảng 3). Tại

sông Sài Gòn, nồng độ mặn cao nhất của trạm Hòa Phú là 0,34 g/l tại kịch bản RCP8.5 năm 2080, nồng độ mặn thấp nhất của là 0,31 g/l ở kịch bản năm 2030. Nồng độ mặn cao nhất của trạm Hóa An là 0,45 g/l tại năm 2080 cả 2 kịch bản RCP, nồng độ mặn thấp nhất là 0,42 g/l tại kịch bản năm 2030. Nồng độ mặn cao nhất của trạm Bình An là 0,62 g/l tại kịch bản RCP8.5 năm 2080, nồng độ mặn thấp nhất là 0,42 g/l tại năm 2030. Nhìn chung, trạm Hòa Phú và Hóa An chịu ảnh hưởng ít bởi mức nước biển dâng do biến đổi khí hậu khi chỉ thay đổi từ 0,01 đến 0,04 g/l ở kịch bản cao nhất RCP8.5 năm 2080. Tuy nhiên, có thể thấy trạm Bình An chịu xâm nhập mặn rõ rệt khi thay đổi đến 0,2 g/l ở kịch bản cao nhất RCP8.5 năm 2080. Điều đó cho thấy mặn đã lan truyền hơn 85 km từ sông Soài Rạp đến nhánh sông Đồng Nai, kết hợp với thủy triều và mực nước biển làm xâm nhập nhanh đến trạm Bình An.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả nồng độ mặn (g/l) hiện trạng và kịch bản của 3 trạm cấp nước

Kịch bản/ độ mặn (g/)	Hòa Phú	Hóa An	Bình An
Hiện trạng 2016	0,30	0,41	0,42
Kịch bản 2030	0,31	0,42	0,42
RCP4.5 2050	0,32	0,42	0,46
RCP8.5 2050	0,32	0,43	0,47
RCP4.5 2080	0,33	0,45	0,50
RCP8.5 2080	0,34	0,45	0,62

3.2. Thảo luận

Khi so sánh với các đô thị ven biển khác tại khu vực Đông Nam Á, TP.HCM đang chịu chung tình trạng xâm nhập mặn nghiêm trọng bởi nhiều yếu tố tổng hợp giống với hạ lưu sông Chao Phraya, Bangkok, Thái Lan và thành phố Jakarta, Indonesia [14]. Điểm tương đồng bởi các yếu tố nước biển dâng, biến đổi khí hậu, đô thị hóa, khai thác nước và đặc biệt cùng là những khu vực có tốc độ sụt lún đất hằng năm đáng báo động. Tốc độ sụt lún trung bình của TP.HCM (khoảng 8 cm/năm), Bangkok (khoảng 2-3 cm/năm) và cao nhất tại Jakarta (khoảng 7,5-10 cm/năm) [15]. Tình trạng xâm nhập mặn của TP.HCM tương đồng với Bangkok khi đều là đô thị lớn ven biển có nền đất thấp, đều phải xây dựng công trình ngăn mặn và thủy lợi đẩy mặn. Nghiên cứu mô hình dựa trên hai phương pháp phổ biến hồi quy tuyến tính bội và mạng nơ-ron nhân tạo mô phỏng cũng cho thấy vào tháng 4/2020, trạm Samlae tại hạ lưu sông Chao Phraya (96 km từ cửa sông) chịu xâm nhập mặn và vượt ngưỡng 0,25 g/l, đỉnh mặn có thể đạt 1 g/l [16]. Nghiên cứu mô hình SMS mô phỏng mặn tương tự trên kênh Cikarang Bekasi Laut, Jakarta cách 32 km so với cửa sông, kết quả cho thấy tại trạm cấp nước mặn có thể dao động 0,23-0,80 g/l và đề xuất xây dựng đập chắn có thể giảm độ mặn xuống 0,68 g/l [17]. Nhìn chung, các trạm cấp nước tại cả 3 lưu vực đều vượt ngưỡng độ mặn cho nước sinh hoạt, cho thấy tình hình xâm nhập mặn gia tăng do biến đổi khí hậu đáng báo động và cần xây dựng giải pháp phù hợp cho khai thác nước mặt trên sông.

Dựa trên kết quả mô phỏng xâm nhập mặn hiện trạng, xu thế dao động độ mặn năm 2020 so với 2016 giảm tại trạm Thủ Thiêm nhưng lại

tăng tại trạm Long Đại. Xu thế dao động độ mặn tại trạm Thủ Thiêm khoảng 3,20-5,80 g/l (năm 2016) giảm xuống 3,23-5,30 g/l (năm 2020), và dao động độ mặn tại trạm Long Đại khoảng 0,1-1,8 g/l (năm 2016) tăng lên 0,1-2,9 g/l (năm 2020). Xu thế dao động của 2 trạm theo thời gian 2016-2020 có vẻ mâu thuẫn nhau nhưng cũng có thể giải thích bởi tác động nhân tạo - các giải pháp công trình đẩy mặn trên sông Sài Gòn từ 2016-2020 đã làm giảm độ mặn tại trạm Thủ Thiêm (mực nước ở Thủ Dầu Một năm 2020 tăng 0,2 m so với 2016). Tuy nhiên, về nguyên tắc độ mặn lan truyền theo dòng chảy, thể hiện rõ nhất tại “ngã ba” dòng chảy từ Nhà Bè chia ra 2 nhánh sông Sài Gòn - Đồng Nai (SG-ĐN), khi lưu lượng nước trên sông Sài Gòn cao hơn giúp đẩy mặn thì dòng mặn này sẽ chuyển sang nhánh khác ở đây là sông Đồng Nai. Từ đó, có thể thấy kết quả mặn tại trạm Long Đại tăng khi so sánh từ 2016-2020. Tuy nhiên, đây chỉ là giả thuyết dựa trên mô phỏng khi chỉ đánh giá lưu lượng hồ chứa Dầu Tiếng - Trị An, dòng chảy đoạn Thủ Thiêm - Nhà Bè - Long Đại. Cùng với ảnh hưởng nước biển dâng do biến đổi khí hậu, dù tích cực đẩy mặn ở nhánh Sài Gòn và lưu lượng nhánh Đồng Nai không đổi, thì với áp lực mực nước biển gia tăng vẫn sẽ làm trầm trọng hơn độ mặn cục bộ tại “ngã ba” dòng chảy này. Vì độ mặn vẫn có thể lan truyền qua các hệ thống kênh rạch giao nhau của 2 nhánh sông. Có thể nói đẩy mặn hiệu quả ở nhánh Sài Gòn không có nghĩa là loại bỏ mặn khỏi hệ thống sông SG-ĐN, mà có thể dồn xâm nhập mặn sang nhánh Đồng Nai nếu toàn hệ thống không được điều phối đồng bộ. Thực tế quá trình này còn chịu ảnh hưởng bởi thay đổi thủy văn theo thời gian, các công trình ngăn mặn khác nhau ở 2 nhánh

sông, hướng thủy triều đẩy vào nhánh sông nào và các hệ thống kênh rạch liên thông giữa 2 nhánh. Nhìn chung, độ mặn tại Long Đại năm 2020 tuy có tăng nhưng chủ yếu ở đỉnh triều 2,9 g/l, khi trung bình độ mặn vẫn duy trì ở mức 1 g/l bằng với dao động năm 2016. Theo hướng xây dựng chiến lược giải pháp, cần xem xét quan tâm đến việc điều hòa khả năng đẩy mặn ở cả 2 nhánh sông SG-ĐN để tối ưu hơn cho quản lý tài nguyên nước ngọt TP.HCM thích ứng với nước biển dâng do biến đổi khí hậu.

Các giải pháp cần được xem xét đến kết quả diễn biến xâm nhập mặn tại các trạm cấp nước thô đã vượt ngưỡng cho phép khai thác 0,25 g/l của nhà máy. Khi trong kịch bản mực nước biển dâng cao 50cm, có thể thấy rõ nhất tại trạm Bình An của nhánh Đồng Nai có độ mặn gia tăng 0,2 g/l. Các giải pháp chiến lược bảo đảm cấp nước ngọt bền vững dựa trên 4 yếu tố chính: Xây dựng công trình, ứng dụng giám sát, quy hoạch hạ tầng và học tập quốc tế. Đầu tiên, giải pháp xây dựng công trình có thể kể đến các chuyên gia thủy lợi và SAWACO đề xuất là xây dựng cống ngăn mặn tại kênh Láng The, xây dựng hồ chứa theo ngày cho trạm, và di dời trạm lấy nước Hòa Phú theo đề án cấp nước sạch được phê duyệt 2020-2050 TP.HCM. Đây là giải pháp khả thi nhất hiện tại bởi trạm Hòa Phú hiện đang nằm tại khu vực chịu lan truyền mặn 0,3 đến 0,34 g/l. Xây dựng cống ngăn mặn kênh Láng The gần trạm Hòa Phú hiện tại khoảng 110 km đến cửa sông Soài Rạp nhằm đẩy dòng mặn lan truyền không vượt quá 0,25 g/l. Và di dời trạm Hòa Phú lên 20km với kết quả mô phỏng dự báo việc giảm ít nhất 0,1 g/l tại trạm Hòa Phú là cần thiết. Ngoài ra, xây dựng thêm hồ chứa nước thô để tăng khả năng lưu trữ cho các đợt mặn kéo dài. Trong điều kiện mặn gia tăng, hồ chứa dự phòng giúp trạm Hòa Phú tiếp tục cung cấp nước trong thời gian chờ điều tiết từ hồ Dầu Tiếng đẩy mặn. Đối với nhánh Đồng Nai, hiện chưa có giải pháp xây dựng công trình đẩy mặn nào được phê duyệt. Vì vậy, cần điều tiết hồ Trị An và các giải pháp tạm thời khác để đẩy mặn cho nhà máy Hóa An và Bình An trong điều kiện biến đổi khí hậu. Thứ hai là giải pháp ứng dụng giám sát sử dụng kết quả mô phỏng mực nước và độ mặn từ các mô hình MIKE 21 FM, HEC-RAS, SWAT... để dự báo

và điều tiết trạm bơm. Dựa trên dữ liệu đo đạc tự động liên tục, mô hình chạy mô phỏng và dự báo mặn theo thời gian thực. Hiện nay, có thể kể đến SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) để giám sát và điều khiển tự động hệ thống cửa van, trạm bơm. SCADA mô phỏng dự báo dựa trên mô hình SWAT và HEC-RAS kết hợp biểu diễn số liệu mô phỏng trên bản đồ qua ứng dụng GIS và viễn thám, hiện đã được nghiên cứu ứng dụng cho Đồng bằng Sông Cửu Long [18]. Thứ ba là giải pháp quy hoạch hạ tầng, lồng ghép vị trí thích ứng xâm nhập mặn vào quy hoạch đô thị và tài nguyên nước TP.HCM. Tránh phát triển dân cư, nhà máy nước, công trình hạ tầng tại các khu vực có nguy cơ nhiễm mặn: khu vực Cần Giờ, Nhà Bè, Bình Chánh. Đây đều là các khu vực gần Đoạn sông Soài Rạp - Nhà Bè có nồng độ mặn rất cao, theo số liệu mô phỏng 4/2016, tại cửa sông Soài Rạp dao động 13,4 - 23,5 g/l và tại Nhà Bè dao động 8,6 - 16,6 g/l. Dựa trên kết quả mô phỏng kịch bản RCP8.5 năm 2080, nồng độ mặn tăng cao và lan truyền liên tục tới khu vực Nhà Bè. Tiếp theo là trong nội đồng, thay thế các mô hình cây trồng ngắn ngày sử dụng nhiều nước (lúa, rau chỉ chịu được độ mặn 1 g/l) bằng mô hình thủy sản - rừng ngập mặn - cây chịu mặn (dừa, cóc chịu được độ mặn 4-10 g/l). Thứ tư là học tập quốc tế, áp dụng bài học quản lý mặn của Tokyo (Japan), Singapore (NEWater), Bangkok (multi-barrier system). Tokyo, Nhật Bản ứng dụng quản lý tổng hợp tài nguyên nước (QLTNTNN) trong tái sử dụng nước mưa - nước thải, giảm thất thoát nước [19]. Trong đó, QLHTNN có lồng ghép ứng dụng mô hình MIKE, SWAT, HEC-RAS dự báo thủy văn, đánh giá tác động biến đổi khí hậu cho quản lý lưu vực sông. QLHTNN có thể được ứng dụng tại TP.HCM khi hiện tại chưa có hệ thống thu gom nước mưa và tái sử dụng nước mưa, cũng như giải pháp giảm thất thoát nước chưa được nghiên cứu ứng dụng. Singapore ứng dụng hệ thống NEWater (tái chế nước tiên tiến) giúp xử lý nước thải cấp cao để tái sử dụng an toàn cho sinh hoạt và công nghiệp [20]. NEWater có ứng dụng mô hình MIKE ở nhiều cấp độ nhằm tối đa hóa xử lý, đặc biệt mô hình MIKE URBAN cho mạng lưới cống đô thị và MIKE 11 / MIKE 21 cho dòng chảy kết nối nhiều nguồn. NEWater bao

gồm 3 giai đoạn: Siêu lọc, thẩm thấu ngược, khử trùng bằng tia cực tím (UV), sau đó được dùng cho công nghiệp công nghệ, làm mát và bổ sung vào hồ chứa nước sinh hoạt. Ngoài ra, Singapore cũng đa dạng hóa nguồn nước qua "4 vòi nước" (Four National Taps): Nước nhập từ Malaysia, nước mưa nội địa, NEWater và khử mặn nước biển [21]. Qua đó cho thấy TP.HCM có thể ứng dụng đa dạng hóa nguồn nước thêm từ nước mưa nội địa, xử lý cấp cao nước thải. Hay có thể kể đến hệ thống "nhiều lớp bảo vệ" (Multi-barrier system) của Thái Lan. Hệ thống tích hợp các lớp bảo vệ từ nguồn, xử lý, phân phối bao gồm: Bảo vệ nguồn nước mặt khỏi ô nhiễm, xử lý nước với nhiều giai đoạn, giám sát thời gian thực, kiểm soát chặt rò rỉ và tái nhiễm. Trong đó, Thái Lan chủ yếu ứng dụng mô hình MIKE 11 và MIKE FLOOD cho cảnh báo lũ và đánh giá chất lượng nước. Qua đó, đề xuất giải pháp cho TP.HCM cần hệ thống cảnh báo, điều tiết và bảo vệ toàn diện nguồn nước. Nhìn chung, ứng dụng mô hình được lồng ghép trong nhiều hướng giải pháp quản lý cấp nước sạch cho đô thị. Vì vậy, việc phát triển mô hình nhằm hướng đến mục đích cụ thể như dự báo mặn cho các trạm cấp nước thô là rất cần thiết.

4. Kết luận

Xâm nhập mặn tại khu vực hạ lưu sông Sài Gòn - Đồng Nai đã, đang và sẽ tiếp tục là một

trong những thách thức nghiêm trọng đối với an ninh nguồn nước ngọt của TP.HCM, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu, nước biển dâng và đô thị hóa nhanh. Qua đó, nghiên cứu đã cho thấy hiệu chỉnh - kiểm định mực nước và độ mặn trừ tốt đến rất tốt cho tháng 4/2016 và tháng 4/2020. Sau đó, mô phỏng xâm nhập mặn kịch bản biến đổi khí hậu 2030-2080 đến 3 trạm cấp nước Hòa Phú, Hóa An và Bình An. Độ mặn cả 3 trạm cấp nước đều vượt ngưỡng cho phép, đặc biệt trạm Bình An chịu ảnh hưởng của nước biển dâng nhiều nhất khi gia tăng 0,2 g/l ở kịch bản RCP8.5 năm 2080. Nghiên cứu đã so sánh tình trạng xâm nhập mặn đến các trạm cấp nước ở TP.HCM với các đô thị ven biển tương tự, giả thuyết tối ưu đẩy mặn cho hệ thống, và xây dựng đề xuất chiến lược giải pháp cho cấp nước bền vững. Bốn giải pháp bao gồm xây dựng công trình, ứng dụng giám sát, quy hoạch hạ tầng, và học tập quốc tế. Để đảm bảo nguồn nước ổn định và phát triển đô thị bền vững trong dài hạn, TP.HCM cần xây dựng và triển khai một chiến lược tổng hợp mang tính liên ngành - kết hợp quy hoạch tài nguyên nước, phát triển hạ tầng đô thị thích ứng và quản lý vùng hạ lưu theo lưu vực. Đây là hướng đi cần thiết để tăng khả năng chống chịu của thành phố trước các tác động của biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng trong tương lai.

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng nghiên cứu: Nguyễn Đức Thiện, Trần Đức Dũng, Vũ Thị Vân Anh, phương pháp nghiên cứu: Nguyễn Đức Thiện, Trần Đức Dũng, phân tích tài liệu, viết bản thảo bài báo: Trần Đức Dũng, Vũ Thị Vân Anh, chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Đức Thiện, Vũ Thị Vân Anh.

Lời cảm ơn: Kết quả nghiên cứu này được thực hiện dưới sự tài trợ của Trường Đại học Tài Nguyên và Môi Trường TP.HCM cho đề tài Khoa học và Công nghệ cấp cơ sở thuộc mã số CS.2025.26 "Mô phỏng và đánh giá mức độ xâm nhập mặn tại các điểm nguồn cấp nước trên hệ thống sông Sài Gòn dưới tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng".

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Eslami, S., Hoekstra, P., Minderhoud, P. S. J., et al., (2021), "Projections of salt intrusion in a mega-delta under climatic and anthropogenic stressors", *Communications Earth & Environment*, 2(1):142, DOI: 10.1038/s43247-021-00208-5.
2. Park, E., Tran, D. D., Minderhoud, P. S. J., et al., (2025), "Practical paths to halt elevation loss in Vietnamese Mekong Delta", *Geography and Sustainability*, 6(1), 100335..

3. IPCC, (2007), *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
4. IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
5. IPCC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
6. Nguyễn Đức Thiện và cộng sự (2022), "Đánh giá tác động của xâm nhập mặn đến nguồn cung cấp nước thô cho Thành phố Hồ Chí Minh dưới ảnh hưởng biến đổi khí hậu", *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ - Khoa học Tự nhiên*, 6(1), 1872-1883, DOI: 10.32508/stdjns.v6i1.1098.
7. Cao Phong, Văn Phúc, (2016), *TPHCM: Xâm nhập mặn đe dọa nguồn nước sinh hoạt*, Báo Sài Gòn Giải Phóng. Truy cập: <https://www.sggp.org.vn/tphcm-xam-nhap-man-de-doa-nguon-nuoc-sinh-hoat-post164555.html> (Truy cập ngày 28/04/2025).
8. SAWACO (2020), *Bảo đảm chất lượng nguồn nước sinh hoạt trong mùa khô*, Hội Cấp Thoát Nước Việt Nam (tapchinuoc.vn). Truy cập: <https://vwsa.org.vn/vn/article/1869/bao-dam-chat-luong-nguon-nuoc-sinh-hoat-trong-mua-kho.html> (Truy cập ngày 16/05/2025).
9. Park, E. et al., (2022), "The worst 2020 saline water intrusion disaster of the past century in the Mekong Delta: Impacts, causes, and management implications", *Ambio*, 51, 691-699.
10. H L Lee et al. (2016), "Modeling the influence of river flow and salt water intrusion in the Terengganu estuary, Malaysia", In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 136 012076.
11. Pappa, A., Dokou, Z., Karatzas, G. P., (2017), "Saltwater intrusion management using the SWI2 model: application in the coastal aquifer of Hersonissos, Crete, Greece", *Desalin Water Treat*, 99, 49-58, DOI: 10.5004/dwt.2017.21408.
12. Đỗ Đức Hải, (2018), "Đánh giá tác động của đô thị hóa, xây dựng công trình chống ngập đến xâm nhập mặn vùng hạ du sông Đồng Nai - Sài Gòn", *Tạp chí khoa học và công nghệ Thủy lợi*, 49, 1-9.
13. Aygun O, Jonoski A, Popescu I. (2019), "Salinity control on saigon river downstream of dau tieng reservoir within multi-objective simulation-optimisation framework for reservoir operation", In: *International Conference on Computational Science*. Springer, pp. 329-345. DOI:10.1007/978-3-030-22747-0_26.
14. Heydarizad M, Pumijumnon N, Mansourian D, et al. (2015), "The deterioration of groundwater quality by seawater intrusion in the Chao Phraya River Basin, Thailand", *Environ Monit Assess* 2023; 195: 424.
15. Erkens G, Bucx T, Dam R, et al. (2022), "Sinking coastal cities", *Proc Int Assoc Hydrol Sci*, 372, 189-198.
16. Changklom J, Lamchuan P, Pornprommin A. (2022), "Salinity forecasting on raw water for water supply in the Chao Phraya River", *Water*, 14(5), 741; <https://doi.org/10.3390/w14050741>.
17. Ajiwibowo H, Pratama MB. (2022), "Modelling Salinity Propagation in Cikarang Bekasi Laut Channel, Bekasi Regency, West Java Province, Indonesia", *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(2), 220202.
18. Nguyễn Lê Dũng và cộng sự (2021), "Giải pháp vận hành thông minh hệ thống thủy lợi liên tỉnh tại vùng Đồng bằng Sông Cửu Long", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy Lợi*, 69, 1-10.
19. Nagata K, Shoji I, Arima T, et al. (2022), "Practicality of integrated water resources management (IWRM) in different contexts", *International Journal of Water Resources Development*, 38(5), 897-919.
20. Ghernaout D, Elboughdiri N, Alghamdi A. (2019), "Direct potable reuse: the Singapore NEWater project as a role model", *Open Access Library Journal*, 6(2), 1-10.
21. Irvine K, Chua L, Eikass HS. (2019), "The four national taps of Singapore: A holistic approach to water resources management from drainage to drinking water", *Journal of Water Management Modeling*, 203-228. DOI:10.14796/JWMM.C375.

CLIMATE CHANGE AND SALTWATER INTRUSION: STRATEGIES FOR SUSTAINABLE FRESHWATER SUPPLY IN HO CHI MINH CITY

Nguyen Duc Thien⁽¹⁾, Vu Thi Van Anh⁽²⁾, Tran Duc Dung⁽¹⁾

⁽¹⁾Institute for Environment and Resources - Viet Nam National University, Ho Chi Minh City

⁽²⁾Faculty of Meteorology, Hydrology and Water Resources, Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment

Received: 18/8/2025; Accepted: 17/9/2025

Abstract: The downstream region of the Saigon-Dong Nai River (SG-DN) is under increasing pressure from saltwater intrusion, affecting freshwater exploitation due to urbanization, sea level rise, and climate change. This study combines the MIKE 21 FM model with GIS analysis to evaluate the impacts of saltwater intrusion on freshwater pumping activities and to propose solutions and long-term multi-sectoral strategies for water security and sustainable urban development. Hydraulic calibration and validation yielded a very good NSE of 0.81 and a good R^2 of 0.82, with simulated salinity concentrations showing satisfactory PBIAS values. Sea level rise scenarios considered include RCP4.5 and RCP8.5 for 2030, 2050, and 2080. Results indicate that current salinity concentrations exceed 0.3 g/L at three pumping stations (Hoa Phu on the Saigon River; Hoa An and Binh An on the Dong Nai River), surpassing the allowable threshold of 0.25 g/L for domestic water supply, with the highest salinity observed at Binh An. These findings highlight the increasing impact of climate change on salinity intrusion and provide a reference for water management and exploitation decisions in the SG-DN basin.

Keywords: Mike 21 FM, saltwater intrusion, climate change, Saigon River, Ho Chi Minh City.