

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH THỦY ĐỘNG LỰC 1-2 CHIỀU ĐỂ DỰ BÁO XÂM NHẬP MẶN HẠ LƯU SÔNG MÃ

ThS. **Hoàng Văn Đại** - Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu
PGS.TS. **Trần Hồng Thái** - Trung tâm Khí tượng Thủy văn quốc gia

Những năm gần đây, hiện tượng xâm nhập mặn ở các khu vực cửa sông ven biển Thanh Hóa đang ngày càng trở nên trầm trọng, đặc biệt là các khu vực cửa sông ven biển, gây khó khăn cho hoạt động lấy nước phục vụ sản xuất nông nghiệp. Trước tình hình đó, việc nghiên cứu, áp dụng mô hình thủy động lực 1-2 chiều mô phỏng, dự báo xâm nhập mặn có ý nghĩa thiết thực nhằm góp phần nâng cao hiệu quả phòng, chống xâm nhập mặn cho vùng hạ lưu sông Mã. Kết quả đã xây dựng mô hình mô phỏng, dự báo xâm nhập mặn cho vùng hạ lưu sông Mã, đã được hiệu chỉnh, kiểm nghiệm mô hình với chỉ số Nash-Sutcliffe đối với độ mặn đạt từ 0,75 - 0,98.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, tình trạng cạn kiệt nguồn nước và xâm nhập mặn khu vực ven biển Thanh Hóa có diễn biến ngày càng phức tạp. Theo báo cáo Quy hoạch thủy lợi tỉnh Thanh Hóa thì đến năm 2010 có đến hơn 5000ha/23.827ha của 4 huyện ven biển bị thiếu nước ngọt và hạn hán. Thủy triều sâu xâm nhập mặn vào tất cả các cửa sông có xu hướng tăng, năm sau sâu hơn năm trước, đồng thời thời gian nhiễm mặn kéo dài hơn và mức độ xáo trộn giữa nước sông và nước biển xảy ra mạnh hơn.

Trong khi đó, hiện nay đối với lưu vực sông Mã, các nghiên cứu đánh giá và dự báo xâm nhập mặn còn rất hạn chế, mới chỉ nằm trong các đề tài, dự án và chỉ dừng lại ở việc sử dụng các mô hình toán để mô phỏng cho một vài năm trong quá khứ. Các nghiên cứu còn tản mạn và chưa đi vào mục tiêu cụ thể phục vụ đánh giá và dự báo xâm nhập mặn. Do vậy việc "Nghiên cứu mô hình thủy động lực 1-2 chiều để dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn hạ lưu sông Mã" nhằm phục vụ công tác khai thác nguồn nước, đáp ứng nhu cầu sản xuất và đời sống của dân cư vùng ảnh hưởng triều- mặn đồng thời khắc phục các thực trạng hiện nay trên sông Mã có ý nghĩa hết sức quan trọng.

2. Tổng quan lựa chọn công cụ tính toán

Hiện nay đã có rất nhiều nghiên cứu khác nhau về công tác dự báo và cảnh báo xâm nhập mặn. Các phương pháp được sử dụng ở đây chủ yếu là mô

Người đọc phản biện: PGS. TS. **Hoàng Minh Tuyền**

hình hóa mặn một chiều như WENDY, VRSAP, FLD-WAV, HEC1, MIKE 11 có nhiều ưu thế trong việc giải các bài toán phục vụ yêu cầu thực tế. Ngoài ra còn có các mô hình 2 chiều và 3 chiều được áp dụng như TELEMAC, EFDC, MIKE 21, KOD02 với ưu điểm mô phỏng truyền tải chất theo các phương. Tuy nhiên, do hạn chế về yêu cầu số liệu và quá trình mô phỏng nên các nghiên cứu thường giải quyết bằng bài toán trung bình hoá theo 2 chiều hoặc 1 chiều hay phương pháp kết nối các mô hình 1-2D.

Ở Việt Nam phương pháp kết nối động để mô phỏng xâm nhập mặn còn ít được quan tâm và ứng dụng nhiều trong các nghiên cứu. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu cho thấy đây là phương pháp có tính ứng dụng cao và phù hợp với các điều kiện về cơ sở dữ liệu hiện có trên các lưu vực sông ở Việt Nam. Đồng thời, qua việc xem xét các tiêu chí lựa chọn mô hình là phải có khả năng mô phỏng và dự báo tốt, khắc phục được những khó khăn khách quan về tài liệu đi đôi với việc dễ dàng kế thừa cơ sở dữ liệu cũng như có khả năng liên kết với các mô hình khác nhau để có thể mở rộng phạm vi nghiên cứu nên nguyên tắc couple mô hình MIKE 11 – MIKE 21 sẽ được lựa chọn để giải quyết bài toán truyền mặn cho khu vực hạ lưu sông Mã.

Mô hình MIKE 11 và MIKE 21 là mô hình thuộc bộ chương trình MIKE do Viện Thủy lực Đan Mạch phát triển. Hệ phương trình cơ bản của MIKE 11 là hệ phương trình Saint-Venant viết cho trường hợp dòng chảy một chiều trong lòng kênh dẫn hở, bao

gồm:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 R A} = 0 \quad (2)$$

Modul khuếch tán bình lưu (AD) dựa trên phương trình 1 chiều về bảo toàn khối lượng của chất hoà tan hoặc lơ lửng có phương trình khuếch tán:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[-AD \frac{\partial C}{\partial x} \right] = -AKC + C_2 q \quad (3)$$

trong đó: C là nồng độ chất khuếch tán; u, v là thành phần vận tốc theo trục x, y; h là độ sâu mực nước; Dx, Dy hệ số khuếch tán theo hướng trục x, y và F là hệ số ngưng kết.

Kết nối được sử dụng để mô phỏng truyền mặn là kết nối tiêu chuẩn trên cơ sở lưu lượng được lấy từ biên của mô hình MIKE 11 (điểm Q đầu tiên), và đưa vào mô hình MIKE 21 tương tự như một đầu vào lưu lượng. Lưu lượng được gán vào trung tâm tại bước thời gian n+1/2.

MIKE 11 yêu cầu biên mực nước từ MIKE 21 tại bước thời gian n+1 để chuyển từ bước thời gian n đến n+1/2. Theo đó, MIKE 21 luôn là bước thời gian phía trước của MIKE 11. Như vậy, để có lưu lượng cho MIKE 21 tại bước thời gian n+1/2, mô hình dự báo được áp dụng MIKE 11 để tính toán Q^{n+1/2}, được tính toán dựa vào Qⁿ và Hⁿ.

$$\frac{\partial Q^{n+1/2}}{\partial t} = - \left(gA \frac{\partial H^n}{\partial x} + \frac{Q^n |Q^n|}{A C^2 R} \right) \quad (5)$$

trong đó: t là thời gian; x là chiều dài; A là diện tích mặt cắt ngang; C là hệ số Chezy và R là bán kính thủy lực.

Độ dốc mực nước là tại điểm Q cuối trong MIKE 11. Thời gian bắt đầu tính toán lưu lượng được chuyển đến MIKE 21 cùng với lưu lượng tại bước thời gian n để dự báo lưu lượng tại bước thời gian tiếp theo (n+1/2).

3. Cơ sở dữ liệu và mạng lưới tính toán

trong đó: Q là lưu lượng qua mặt cắt (m³/s); A là diện tích mặt cắt ướt (m²); R là bán kính thủy lực; a là hệ số động năng; x là chiều dài theo dòng chảy (m); q là lưu lượng nhập lưu; b là hệ số phân bố lưu tốc; C là hệ số Chezy; C₂ là nồng độ nguồn; K là hệ số phân huỷ tuyến tính; và D là hệ số khuếch tán.

MIKE 21 có hệ phương trình sử dụng là hệ Navier-Stock gồm phương trình liên tục và 2 phương trình động lượng. Đối với modul khuếch tán có thêm phương trình tải khuếch tán (phương trình bảo toàn khối lượng chất hòa tan hai chiều) có dạng như sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} (hc) + \frac{\partial}{\partial x} (uhc) + \frac{\partial}{\partial y} (vhc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - FhC + S \quad (4)$$

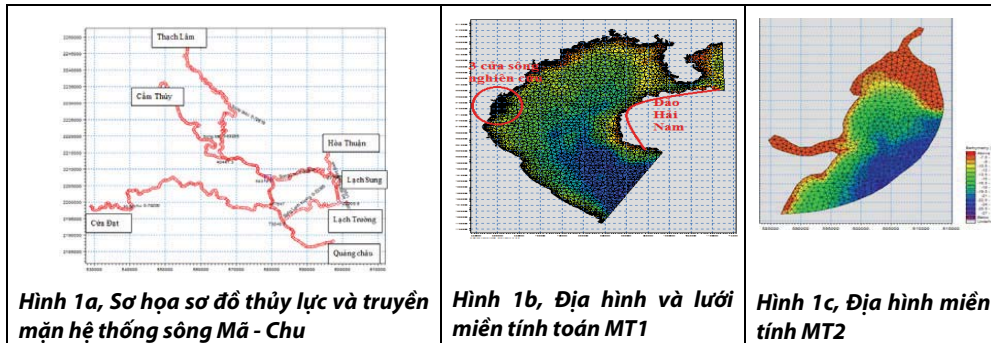
Tài liệu được sử dụng bao gồm dữ liệu thủy – hải văn, địa hình. Trong đó tài liệu mặt cắt ngang lòng dẫn hệ thống sông Mã kế thừa từ các nghiên cứu trước và địa hình miễn tính toán Vịnh Bắc Bộ được lấy từ số liệu đo đạc của Bộ Tư lệnh Hải quân từ các bản đồ địa hình đáy biển có tỉ lệ từ 1:10000 đến 1:50000. Các dữ liệu thủy hải văn bao gồm mực nước tại các trạm khu vực hạ lưu cửa sông và Hòn Dấu, Sầm Sơn năm 2003, 2009, 2010, 2011, 2012 và lưu lượng thực đo vùng thượng lưu tại các trạm Cửa Đạt và Cẩm Thủy, quan hệ (Q~H) Thạch Lâm với thời gian tương ứng. Lượng gia nhập khu giữa thường không đáng kể (các tháng 12, 1, 2, 3) nên giả thiết không có lượng gia nhập.

Sơ đồ tính cho mô hình 1D gồm: sông Mã (từ Cẩm Thủy đến Cửa Hới); sông Bưởi (từ Thạch Lâm đến nhập lưu vào sông Mã); sông Chu (từ tuyến Cửa Đạt đến nhập lưu vào sông Mã, ngã ba Giàng); sông Lèn (từ cửa phân lưu của sông Mã, ngã ba Bông, đến cửa Lạch Sung); sông Báo Văn (từ Mỹ Quan Trang đến nhập lưu với sông Lèn); Kênh De (từ cửa phân lưu với sông Lèn đến nhập lưu vào sông Lạch Trường); sông Lạch Trường (từ cửa phân lưu của sông Mã, ngã ba Tuấn, đến cửa Lạch Trường) (hình 1a). Tổng số 201 mặt cắt ngang đo năm 1994, 1998 và 10 mặt cắt đo năm 2011, trung bình khoảng 2km/mặt cắt ở phía thượng lưu và 1km/mặt cắt ở khu vực hạ lưu.

Xây dựng mô hình 2 chiều cho miền tính vịnh Bắc Bộ có tọa độ từ 18°40'N -22°17'N, 104°54'E -

110°20'E chi tiết đến ba cửa sông hạ lưu hệ thống sông Mã bằng lưới tam giác với diện tích phần tử lớn nhất (trên toàn miền tính) là: 9000000 m², góc

nhỏ nhất là 300 thì vùng tính toán được rời rạc hóa thành 10771 phần tử với 6117 nút và miền tính MT2 cho vùng cửa sông nghiên cứu (hình 1b, 1c).



Hình 1a, Sơ họa sơ đồ thủy lực và truyền mặn hệ thống sông Mã - Chu

Hình 1b, Địa hình và lưới miền tính toán MT1

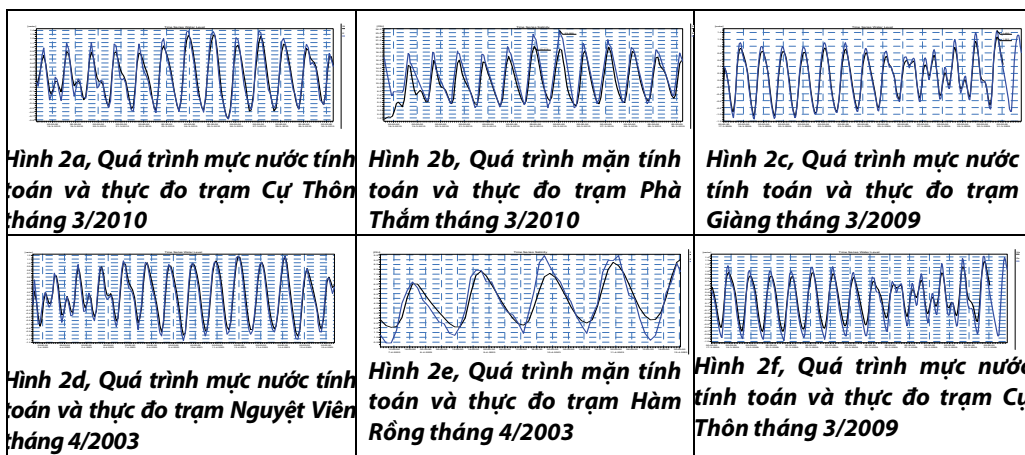
Hình 1c, Địa hình miền tính MT2

4. Một số kết quả và thảo luận

a. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình MIKE 11

Với số liệu thực đo độ mặn tại các trạm trên hệ thống sông Mã, nghiên cứu tiến hành hiệu chỉnh cho năm 2010 và kiểm định cho các năm 2003, 2009, 2011. Biên mặn cửa sông lấy theo trạm Sầm Sơn. Trong modul thủy lực, thông số nhám lựa chọn được thay đổi theo khu vực: thượng lưu (0,025 - 0,04) và hạ lưu (0,015 - 0,024). Việc hiệu chỉnh các thông số khuếch tán (D) được dựa trên nghiên cứu

về độ nhạy của các thông số. Trong đó, hệ số D trên sông Mã từ ngã ba Bông tới Cẩm Thủy nằm trong khoảng 100-550 m²/s, khu vực hạ lưu từ 400 - 1100 m²/s; sông Lèn từ Phà Thảm tới ngã ba Bông từ 800 - 1200 m²/s, vùng gần biển từ 1500 - 2500 m²/s; sông Lạch Trường khu vực thượng lưu từ 150 - 750 m²/s và hạ lưu từ 55 - 200 m²/s. Quá trình hiệu chỉnh thông số mô hình dựa trên sự phù hợp giữa tính toán và thực đo tại các trạm kiểm tra, cụ thể là sự phù hợp về giá trị đỉnh mặn với kết quả thu được:



Hình 2a, Quá trình mực nước tính toán và thực đo trạm Cự Thôn tháng 3/2010

Hình 2b, Quá trình mặn tính toán và thực đo trạm Phà Thảm tháng 3/2010

Hình 2c, Quá trình mực nước tính toán và thực đo trạm Giàng tháng 3/2009

Hình 2d, Quá trình mực nước tính toán và thực đo trạm Nguyệt Viên tháng 4/2003

Hình 2e, Quá trình mặn tính toán và thực đo trạm Hàm Rồng tháng 4/2003

Hình 2f, Quá trình mực nước tính toán và thực đo trạm Cự Thôn tháng 3/2009

Từ kết quả hiệu chỉnh (hình 2, bảng 1, 2) có thể thấy đường quá trình mực nước tính toán tại các trạm phía trên không ảnh hưởng của triều bám sát đường quá trình thực đo với chỉ số Nash-Sutcliffe khoảng 0,87 và 0,95, sai số lệch đỉnh của các trạm này cũng đảm bảo tiêu chuẩn cho phép. Tại các trạm bên dưới, bị ảnh hưởng của thủy triều kết quả

so sánh giữa đường mực nước tính toán và thực đo tại các trạm này cũng khá phù hợp. Sai số lệch đỉnh đối với mực nước lớn nhất của các trạm này cũng đảm bảo dưới 11%. Nhìn chung tại tất cả các trạm kiểm tra mặn đều mất khoảng 24 – 48 giờ ban đầu để đạt đến trạng thái ổn định. Chỉ tiêu Nash cho các trạm đo mặn trên sông Lèn đạt giá trị cao và nằm

trong khoảng 0,86-0,91 trong khi các sông Mã, Lạch Trường cũng đạt được kết quả từ khoảng 0,75- 0,98.

Do đây là vùng sông ảnh hưởng triều và xâm nhập mặn rất mạnh trong khi các hoạt động sản xuất sinh hoạt tại khu vực hạ lưu sông Mã lại diễn ra một cách liên tục và mạnh mẽ nên có sự tương tác

giữa dòng trong sông và dòng triều từ biển vào, đồng thời bên cạnh những khó khăn về hạn chế số liệu kiểm tra thì trong quá trình hiệu chỉnh, kiểm định vẫn còn chưa xét đến các điều kiện có ảnh hưởng khác như gió và các thay đổi về địa hình lòng dẫn chưa cập nhật tới thời gian gần đây.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả hiệu chỉnh và kiểm định thủy lực

Năm	Trạm Chỉ tiêu đánh giá	Sông Mã			Sông Lèn			Sông Lạch Trường		
		Giàng	Hàm Rồng	Nguyệt Viên	Cự Thôn	Yên Ổn	Phà Thắm	Cự Đà	Vạn Ninh	Hoàng Hà
Hiệu chỉnh 2010	Δ lệch đỉnh (m)	0,25	0,23	0,07	0,1	0,17	0,05	0,33	0,14	0,08
	Δ lệch chân (m)	0,007	0,007	0,013	0,03	0,19	0,032	0,13	0,045	0,027
	Nash-Sutcliffe	0,96	0,967	0,95	0,96	0,89	0,96	0,87	0,913	0,93
Kiểm định 2003	Δ lệch đỉnh (m)		0,02	0,01			0,06	0,1		0,02
	Δ lệch chân (m)		0,148	0,107			0,17	0,02		0,017
	Nash-Sutcliffe		0,9	0,95			0,93	0,95		0,97
Kiểm định 2009	Δ lệch đỉnh (m)	0,187					0,154			
	Δ lệch chân (m)	0,091					0,257			
	Nash-Sutcliffe	0,98					0,97			
Kiểm định 2011	Δ lệch đỉnh (m)	0,15	0,09	0,08		0,05	0,3	0,14	0,07	0,02
	Δ lệch chân (m)	0,12	0,09	0,05		0,06	0,01	0,15	0,01	0,03
	Nash-Sutcliffe	0,97	0,98	0,98		0,97	0,97	0,98	0,98	0,99

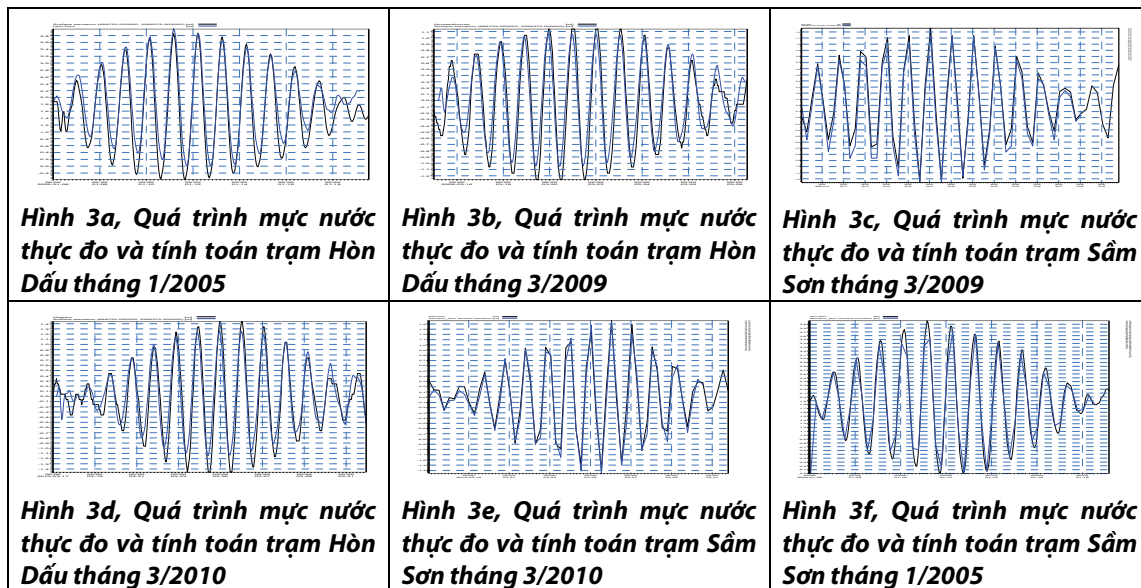
Bảng 2. Tổng hợp kết quả hiệu chỉnh và kiểm định độ mặn

Năm	Trạm Chỉ tiêu đánh giá	Sông Mã		Sông Lèn			Sông Lạch Trường	
		Hàm Rồng	Nguyệt Viên	Cự Thôn	Yên Ổn	Phà Thắm	Vạn Ninh	Hoàng Hà
Hiệu chỉnh 2010	Δ lệch đỉnh (‰)	0,24	4,65	1,32	5,37	4,09	0,64	1
	Δ lệch chân (‰)	0,1	0,01	0,33	1,04	0,5	2,28	0,6
	Nash-Sutcliffe	0,98	0,89	0,86	0,89	0,91	0,91	0,8
Kiểm định 2003	Δ lệch đỉnh (‰)	0,55	0,27			0,42		2,2
	Δ lệch chân (‰)	0,16	1			0,5		0,06
	Nash-Sutcliffe	0,83	0,8			0,87		0,81
Kiểm định 2011	Δ lệch đỉnh (‰)		1,5		1,9	1,23	2,3	4,7
	Δ lệch chân (‰)		0		0,2	0,2	0,6	0,23
	Nash-Sutcliffe		0,89		0,87	0,92	0,75	0,78

b. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình MIKE 21

Đối với mô hình 2 chiều, kế thừa từ báo cáo đã thực hiện trước đây, việc hiệu chỉnh được thực hiện cho năm 2005 và kiểm định cho các năm 2009, 2010, 2011 nhằm xem xét tính ổn định của bộ thông số và giảm thiểu sai số trong quá trình kết nối 1-2D. Việc hiệu chỉnh và kiểm định tham số cho mô hình MIKE 21 đối với mực nước tại trạm Sầm

Sơn và Hòn Dấu bằng sự thay đổi hệ số nhám (M) vùng ngoài khơi và vùng cửa sông ven biển tương ứng trên toàn miền tính. Qua điều chỉnh với các bộ thông số nhám khác nhau, hệ số nhám vùng cửa sông ven biển được lựa chọn có thể cho gần tương đương với nhám lòng sông (36-45) và nhám vùng ngoài khơi do có độ sâu lớn nên giá nằm trong khoảng 46-60.



Bảng 3. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mực nước mô hình 2D

Năm	Trạm	Nash-Sutcliffe	Δ đỉnh (m)	Δ chân (m)
2005	Hòn Dấu	0,89	0,31	0,22
	Sầm Sơn	0,89	0,02	0,01
2009	Hòn Dấu	0,87	0,08	0,21
	Sầm Sơn	0,94	0,12	0,028
2010	Hòn Dấu	0,88	0,04	0,2
	Sầm Sơn	0,99	0,05	0,08
2011	Hòn Dấu	0,88	0,12	0,25
	Sầm Sơn	0,98	0,07	0,07

Có thể thấy, kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mực nước tại trạm Hòn Dấu qua các năm đảm bảo khá tốt với chỉ số Nash nằm trong khoảng 0,87 - 0,90 trong khi đó Sầm Sơn luôn đạt Nash từ 0,89 - 0,99. Sai số lệch chân và đỉnh còn chưa tốt có thể do việc kiểm tra tiến hành tại trạm khu vực gần bờ là vùng nước nông nên dễ dẫn đến những biến đổi bất thường về mực nước. Tuy nhiên, mô hình vẫn mô phỏng được kết quả tốt về pha dao động tại cả 2 trạm qua các năm khác nhau.

Với kết quả hiệu chỉnh và kiểm định quá trình triều như trên, quá trình truyền tải chất được tính toán mô phỏng bằng mô đun Transport và tiến hành điều chỉnh thông số khuếch tán D trên miền tính MT1 trong phạm vi từ 0 - 1. Trong đó, điều kiện biên mặn được tính tại 2 vị trí như trong tính toán thủy lực với giá trị mặn được coi là 35 ‰. Kết quả

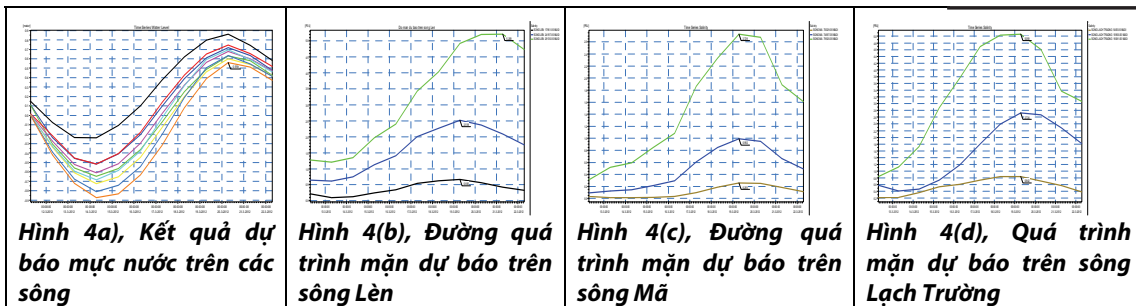
cho thấy mô hình MIKE 21 có thể mô phỏng tốt quá trình thủy động lực trong khu vực biển Vịnh Bắc Bộ và vùng ven biển Thanh Hóa. Do đó, có thể sử dụng để tính toán, dự báo độ mặn và mực nước triều tại các biên phục vụ dự báo độ mặn cho vùng cửa sông.

c. Dự báo thử nghiệm cho năm 2012

Dựa trên cơ sở biên dưới là đường quá trình mực nước diễn biến độ mặn được dự báo từ mô hình MIKE 21 với hệ thống biên trên là độ mặn được gán bằng 0 và lưu lượng thực đo được cập nhật bắt đầu từ thời điểm dự báo 7 giờ ngày 14/03/2012 đến thời điểm kết thúc dự báo là 7 giờ ngày 22/03/2012. Với thời gian dự kiến được giả thiết ban đầu là 24 giờ kết quả dự báo từ bộ mô hình và thông số trên cho thấy sự phù hợp khá tốt giữa mực nước, độ mặn dự báo và thực đo.

Bảng 4. So sánh kết quả dự báo và thực đo lúc 7 giờ tại vị trí các trạm

TT	Sông	Trạm	Smax thực đo (‰)	Smax dự báo (‰)	Chênh lệch thời gian xuất hiện đỉnh (h)
1	Mã	Giàng	0,26	0,4	1
2		Hàm Rồng	1	2,4	0
3		Nguyệt Viên	2,73	3,6	1,5
4	Lạch Trường	Cự Đà	0,84	1,1	4
5		Vạn Ninh	2,72	3,3	2
6		Hoàng Hà	5,1	7,1	3
7	Lèn	Cự Thôn	0,67	0,7	0
8		Yên Ổn	2,52	3,5	0
9		Phà Thẩm	5,2	6,6	1



Từ bảng kết quả dự báo thử nghiệm (bảng 4) cho giai đoạn trên cho thấy các con mặn nhìn chung đã bắt được đỉnh cả về thời gian và giá trị đỉnh. Tuy nhiên tại vị trí trạm Cự Đà và Hoàng Hà trên sông Lạch Trường, dự báo thời gian xuất hiện đỉnh mặn có sai số lớn nhất so với các trạm còn lại, đây cũng các vị trí mà trong quá trình hiệu chỉnh và kiểm định thường mô hình mô phỏng chưa được tốt. Tại 3 trạm cửa sông trên hệ thống sông Mã thời gian lệch đỉnh của dự báo và thực đo không sai khác nhau nhiều, giá trị đỉnh mặn tại 3 trạm cửa sông đều không có sự biến động mạnh so với thực đo.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành hiệu chỉnh và kiểm nghiệm mô hình triều-mặn với kết quả khá tốt trên hệ thống sông Mã, đồng thời đã tiến hành dự báo thử nghiệm cho mùa kiệt năm 2012 với kết quả khá tốt. Qua đó, có thể thấy về cơ bản với các bộ thông số được lựa chọn thì mô hình có thể mô phỏng, dự báo mặn cho hệ thống sông Mã. Từ đó, bước đầu có thể sử dụng bộ mô hình trên phục vụ cho dự báo thử nghiệm xâm nhập mặn cho vùng hạ lưu hệ thống sông Mã. Đồng thời trong quá trình dự báo thử nghiệm cần tiếp tục cập nhật tham số, tài liệu địa hình để từng bước hoàn thiện mô hình cho dự báo tác nghiệp.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Quý Nhân, Đào Trọng Tú, Lê Đình Dũng và các đồng nghiệp (2012), Báo cáo tổng kết dự án “Xây dựng cơ sở dữ liệu tài nguyên nước tỉnh Thanh Hóa”, Trung tâm quy hoạch và điều tra tài nguyên nước, Bộ tài nguyên và môi trường, tr156-192
2. Lã Thanh Hà (2004), Nghiên cứu khả năng dự báo xâm nhập vùng đồng bằng sông Hồng – sông Thái Bình bằng mô hình toán, Tạp chí KTTV tháng 7 số 523.
3. MIKE DHI (2007). User guide,