

**KẾT QUẢ BƯỚC ĐẦU PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH TOÁN
BIẾN HÌNH LÒNG DẪN BA CHIỀU**

Lê Song Giang⁽¹⁾, Lê Mạnh Hùng⁽²⁾

(1) Trường Đại Học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

(2) Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam

(Bài nhận ngày 06 tháng 10 năm 2008, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 15 tháng 04 năm 2009)

TÓM TẮT: Bài báo trình bày mô hình số 3 chiều tính toán dòng chảy và vận tải bùn cát trong sông. Dòng chảy được tính toán bằng cách giải phương trình Reynolds với giả thiết thủy tĩnh. Bùn cát lơ lửng được mô phỏng bởi phương trình vận tải còn bùn cát đáy được tính toán bởi các công thức thực nghiệm. Biến hình lòng dẫn được tính toán từ phương trình bảo toàn khối lượng tổng. Tất cả các phương trình được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn. Mô hình được áp dụng nghiên cứu biến hình lòng sông Vàm Nao ở đồng bằng sông Cửu Long.

1. GIỚI THIỆU

Sử dụng mô hình toán để mô phỏng các quá trình động lực nói chung và biến hình lòng dẫn nói riêng là một phương pháp nghiên cứu tiên tiến. Các mô hình toán theo thời gian ngày càng được hoàn thiện và hiện đã đạt tới đỉnh cao là mô hình 3 chiều [1, 2]. Loại mô hình này, so với các mô hình 1 và 2 chiều, có thể tính toán các cấu trúc thứ cấp của dòng chảy và quá trình vận tải bùn cát trong không gian 3 chiều nên cho phép tính toán với độ chính xác cao quá trình biến hình lòng dẫn. Trong một vài năm vừa qua, theo xu hướng đó, một mô hình dòng chảy 3 chiều đã được chúng tôi phát triển [3-5]. Mô hình sau đó đã được bổ sung thêm các module vận tải bùn cát và cho phép tính toán quá trình biến hình lòng dẫn. Mô hình đã được sử dụng để nghiên cứu cho sông Vàm Nao. Bài báo này sẽ trình bày một số kết quả nghiên cứu bước đầu của bài toán nêu trên.

2. MÔ HÌNH DÒNG CHẢY VÀ VẬN TẢI BÙN CÁT

2.1 Mô hình dòng chảy

Với giả thiết áp suất phân bố theo quy luật thủy tĩnh, các phương trình cơ bản của mô hình trong hệ tọa độ Descartes vuông góc với trục z hướng từ dưới lên được viết [6]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right] + F_U \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right] + F_V \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \tag{4}$$

trong đó u, v, w - các thành phần vận tốc; p - áp suất; ρ - khối lượng riêng của nước; f - hệ số Coriolis; K_M - độ nhớt rối phương đứng; F_U, F_V - các số hạng xáo trộn dưới mắt lưới phương ngang. Độ nhớt rối phương đứng được tính theo mô hình Prandtl-Kolmogorov (1942):

$$K_M = C'_\mu L \sqrt{k} \tag{5}$$

Trong đó C'_μ - hằng số mô hình; L - chiều dài xáo trộn; k - động năng rối. Chúng được xác định theo cách mà Davies và Gerritsen [7] đã thực hiện. Các số hạng xáo trộn dưới mắt lưới theo phương ngang, được mô hình hóa theo mô hình độ nhớt rối:

$$F_U = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \tag{6}$$

$$F_V = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \tag{7}$$

trong đó độ nhớt rối ngang, A_M , được tính theo mô hình Smagorinsky [8]. Các phương trình (1) - (4) được giải với điều kiện biên như sau. Trên mặt thoáng ($z = \eta$):

$$w(\eta) = \frac{\partial \eta}{\partial t} + U_s \frac{\partial \eta}{\partial x} + V_s \frac{\partial \eta}{\partial y} \tag{8}$$

$$\rho K_M \left[\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right] \Bigg|_{z=\eta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}) \tag{9}$$

Còn tại đáy ($z = -h$), điều kiện biên là:

$$w(-h) = 0 \tag{10}$$

$$K_M \left[\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right] \Bigg|_{z=-h} = C_D (U_b^2 + V_b^2)^{1/2} (U_b, V_b) \tag{11}$$

trong đó τ_{ox}, τ_{oy} - ứng suất gió trên mặt thoáng; U_s, V_s - vận tốc trên mặt thoáng; U_b, V_b - vận tốc tại mặt lưới sát đáy; C_D - hệ số ma sát đáy, được xác định với giả thiết vận tốc trong vùng sát đáy phân bố theo quy luật logarit:

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{\ln(\Delta/z_0)} \right]^2 \quad (12)$$

với κ - hằng số Karman; z_0 - độ nhám; Δ - khoảng cách từ đáy tới mặt lưới đầu tiên. Trên biên kín, thành phần vận tốc vuông góc với biên bằng không. Trên biên hở, mực nước hoặc thành phần lưu lượng vuông góc với biên được áp đặt.

Các phương trình (1) - (4) cùng các điều kiện biên được đưa về hệ tọa độ biến đổi σ và giải theo phương pháp được trình bày trong tài liệu [3]. Giống như tất cả các mô hình dòng chảy 3 chiều khác, quá trình tính toán được thực hiện theo hai giai đoạn: xác định mặt thoáng và tính toán trường vận tốc. Mặt thoáng được xác định bằng cách tích phân trực tiếp phương trình liên tục theo lời giải vận tốc 3 chiều. Vận tốc được giải từ các phương trình động lượng theo sơ đồ ADI của Douglas-Gunn [9]. Giải thuật chi tiết có thể xem trong tài liệu trích dẫn.

2.2 Mô hình vận tải bùn cát

Bùn cát trong tính toán được chia thành 2 lớp: bùn cát lơ lửng và bùn cát đáy. Bùn cát đáy chuyển động trong lớp sát đáy còn bùn cát lơ lửng được vận tải bởi dòng chảy ở tầng trên. Thông thường bề dày lớp bùn cát đáy được lấy bằng $a=0.01D$ (D - độ sâu). Trao đổi bùn cát giữa 2 lớp được thực hiện thông qua quá trình lắng đọng với suất D_b và bốc lên với suất E_b .

Bùn cát lơ lửng

Phân bố nồng độ bùn cát trong tầng lơ lửng được mô tả bởi phương trình vận tải:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - \omega_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_c \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_c \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (13)$$

Trong đó: C - nồng độ bùn cát lơ lửng; A_c , K_c - hệ số khuếch tán rối trên phương ngang và phương đứng; ω_s - độ thô thủy lực (settling velocity hoặc fall velocity).

Nồng độ bùn cát là đại lượng vô thứ nguyên. Nếu nhân nó với khối lượng riêng của hạt lơ lửng ρ_s ta sẽ được nồng độ ở đơn vị

kg/m³ hay g/lít. Hệ số khuếch tán rối trên phương ngang được lấy bằng độ nhớt rối, còn hệ số khuếch tán rối trên phương đứng được tính theo Van Rijn [11]: $K_c = \beta_d \Phi K_M$ (14)

Trong đó β_d và Φ là các hệ số tính tới ảnh hưởng của hạt lơ lửng lên các cấu trúc rối. Phương trình (13) được giải với điều kiện biên sau. Trên mặt thoáng:

$$\left[\omega_s C + K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=\eta} = 0 \quad (15)$$

Trên mặt phân cách giữa 2 tầng:

$$\left[\omega_s C + K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z=z_b+a} = -(E_b - D_b) \quad (16)$$

Theo Van Rijn [12], suất lắng đọng D_b và bốc lên E_b được tính:

$$D_b = \omega_s C_b; E_b = \omega_s C_{b^*} \quad (17)$$

Với C_b và C_{b^*} - nồng độ và nồng độ bão hoà tại mặt phân cách (được tính theo Van Rijn [11]). Trên biên kín, thông lượng bùn cát qua biên bằng không. Trên biên hở nơi dòng chảy đi ra, điều kiện không có gradient nồng độ được sử dụng, còn tại nơi dòng chảy chảy vào điều kiện biên sẽ là nồng độ bùn cát. Thực tế, giá trị biên nồng độ khó xác định và thông thường trong tính toán nó được lấy từ lời giải tích với điều kiện bão hoà.

Bùn cát đáy

Phương trình cân bằng khối lượng của bùn cát vận tải trong lớp đáy được viết [12]:

$$(1-P) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial (a \bar{C}_b)}{\partial t} + \frac{\partial (q_{bx})}{\partial x} + \frac{\partial (q_{by})}{\partial y} = (D_b - E_b) + S \quad (18)$$

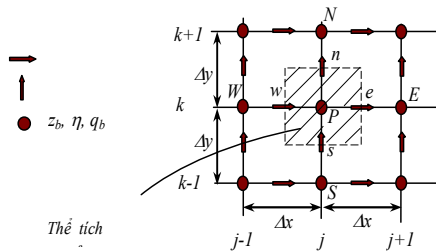
Với P - độ rỗng; z_b - cao độ đáy; \bar{C}_b - nồng độ bùn cát trung bình trong lớp đáy; q_{bx} và q_{by} các thành phần lưu lượng bùn cát đáy (được tính theo Van Rijn [10, 12]); S - số hạng nguồn.

Tính toán bùn cát vận tải được thực hiện qua 2 giai đoạn: giải phương trình vận tải bùn cát lơ lửng (13); và tích phân phương trình cân bằng bùn cát đáy (18). Trước khi giải, phương trình (13) cũng được đưa về tọa độ σ và sau đó được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn theo sơ đồ ADI giống như đã được thực hiện cho các phương trình động lượng. Trong khi đó

phương trình (18) sau khi đơn giản bớt số hạng tốc độ biến đổi cục bộ khối lượng bùn cát đáy sẽ được tích phân theo phương trình bày trong tài liệu [13]. Xét thể tích kiểm soát như trên hình H.1, tích phân việc phương trình (18) sẽ cho ta:

$$z_{bp}^{n+1} = z_{bp}^n + \frac{\Delta x}{1-P} \left[\frac{q_{bxw}^{n+1} - q_{bxw}^n}{\Delta x} + \frac{q_{bys}^{n+1} - q_{bys}^n}{\Delta y} + (D_b - E_b)_p^{n+1/2} + S_p^{n+1} \right] \quad (19)$$

Trong đó $q_{bx_e}, q_{bx_w}, q_{by_n}, q_{by}$ là các thành phần trên các trục tọa độ của lưu lượng bùn cát đáy trên các mặt kiểm soát.



Hình H1. Sơ đồ thể tích kiểm soát

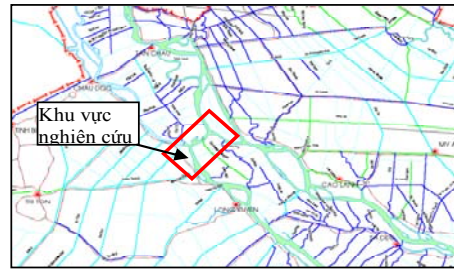
3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN BIẾN HÌNH SÔNG VÀM NAO

Sông Vàm Nao nằm trên địa bàn tỉnh An Giang, có chiều dài khoảng 6km và là con sông chính chuyển nước từ sông Tiền sang sông Hậu (hình H.2).

Dòng chảy trên sông có hai mùa rõ rệt với sự biến thiên của lưu lượng và mực nước trong một biên độ lớn. Vào mùa khô, sông có lưu lượng trung bình khoảng 1000 - 1500m³/s. Chiều dòng chảy thay đổi theo thủy triều và mực nước biến thiên trong khoảng từ -0.4 - 1.2m. Vào mùa mưa, thủy triều hầu như không còn ảnh hưởng tới dòng chảy tại đây. Trong những năm lũ lớn, lưu lượng dòng chảy có thể đạt tới 10000m³/s và mực nước có thể lên tới 3.7m.

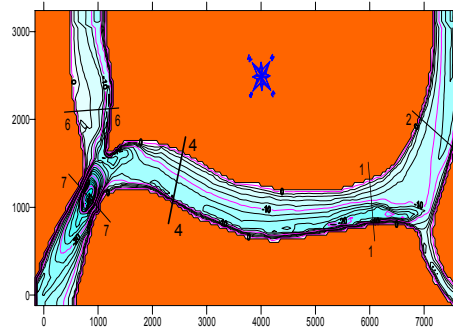
Đoạn sông tính toán nằm trong miền chữ nhật có kích thước 7840m×3360m, gồm 2 đoạn sông Tiền, sông Hậu và sông Vàm Nao. Đáy sông trong miền tính đã được Trung tâm Nghiên cứu chỉnh trị sông & Phòng chống thiên tai (Viện KHTLMN) đo đạc 2 lần: tháng

8/2002 và tháng 7/2004. Hình H.3 là địa hình đáy sông đo lần đầu, có sửa chữa nắn thẳng các biên để tạo thuận lợi cho tính toán. Miền tính toán được phủ một lưới tính đều 40m×40m và chia làm 5 lớp theo độ sâu. Tính toán được thực hiện cho các điểm có độ sâu lớn hơn 0.3m và số lượng các điểm tính thay đổi theo quá trình biến thiên mực nước. Như vậy mô hình có thể đáp ứng được quá trình biến động lòng dẫn do thủy triều và lũ. Bước thời gian cho tính toán dòng chảy là 1.2s còn cho tính toán vận tải bùn cát là 30s. Biên hờ thượng lưu được áp đặt bởi lưu lượng còn biên hờ hạ lưu được áp đặt bởi mực nước. Các giá trị biên này được tính toán từ mô hình 1 chiều của mạng sông Cửu Long. Nồng độ bùn cát tại các biên nơi dòng chảy chảy vào được xác định từ giả thiết phân bố bão hoà.

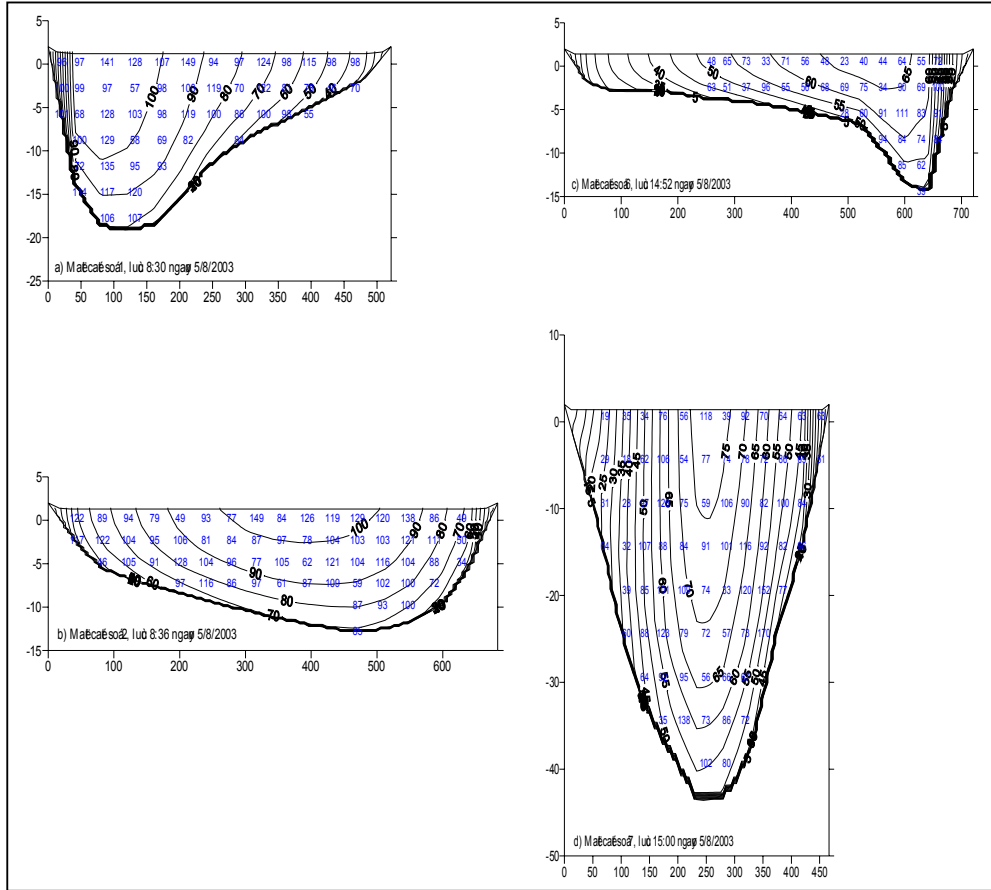


Hình H2. Sông Vàm Nao

Trong tính toán thử nghiệm bước đầu, các thông số của hạt được lấy như sau: $d_{50}=1.0\text{mm}$, $\rho_s=2650\text{kg/m}^3$, $P=0.3$. Các thông số này được lấy tương tự như ở đoạn sông gần đó.



Hình H3. Địa hình đáy sông thẳng

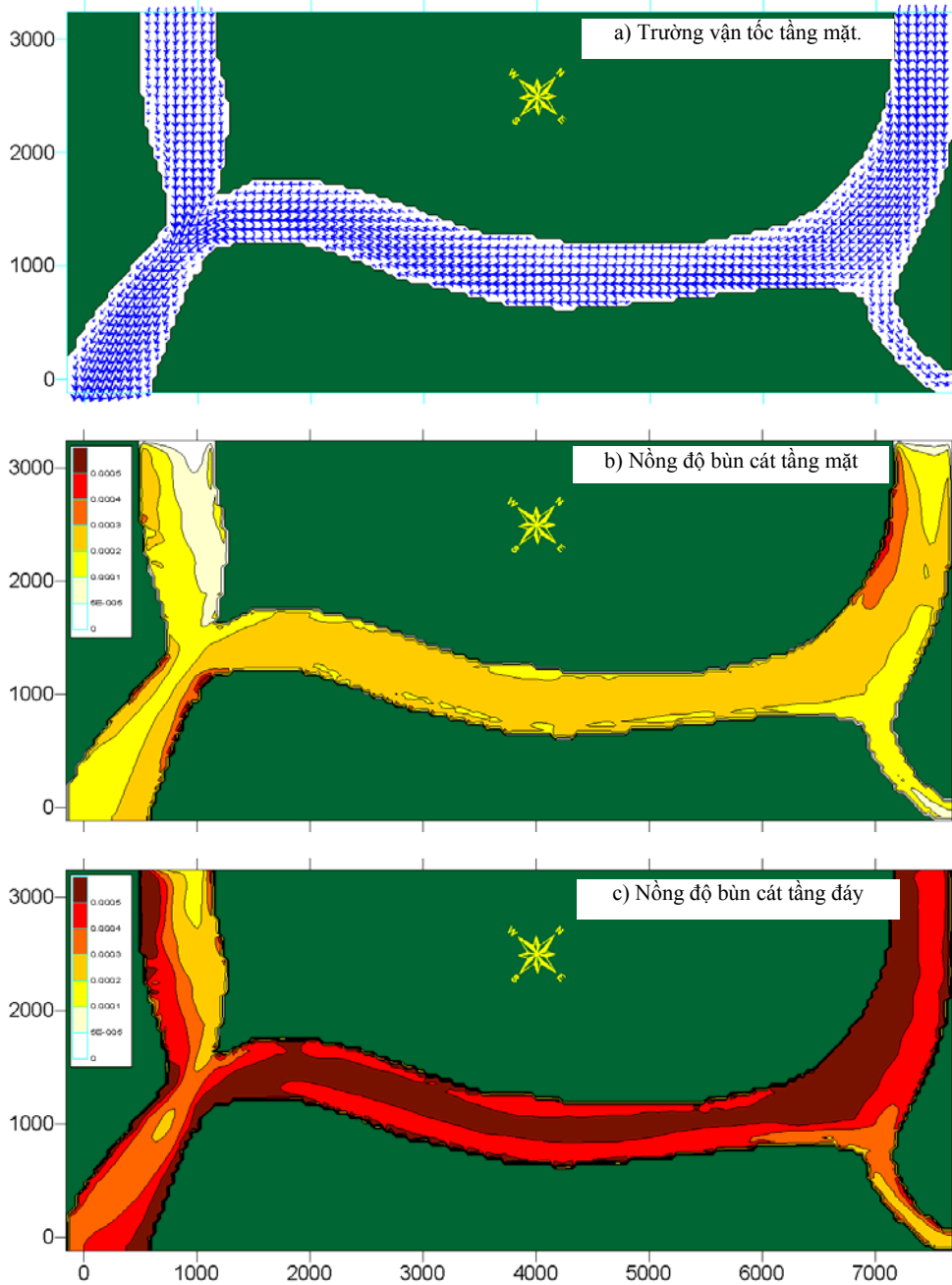


Tính toán được thực hiện cho khoảng thời gian từ tháng 8/2002 đến tháng 7/2004. Hình H.4 là phân bố vận tốc trên một số mặt cắt ngang sông ngày 5/8/2003. Vị trí các mặt cắt được chỉ dẫn trên hình H.3. So sánh với số liệu thực đo bởi Trung tâm Nghiên cứu chính trị sông & Phòng chống thiên tai cho thấy kết quả tính khá chính xác.

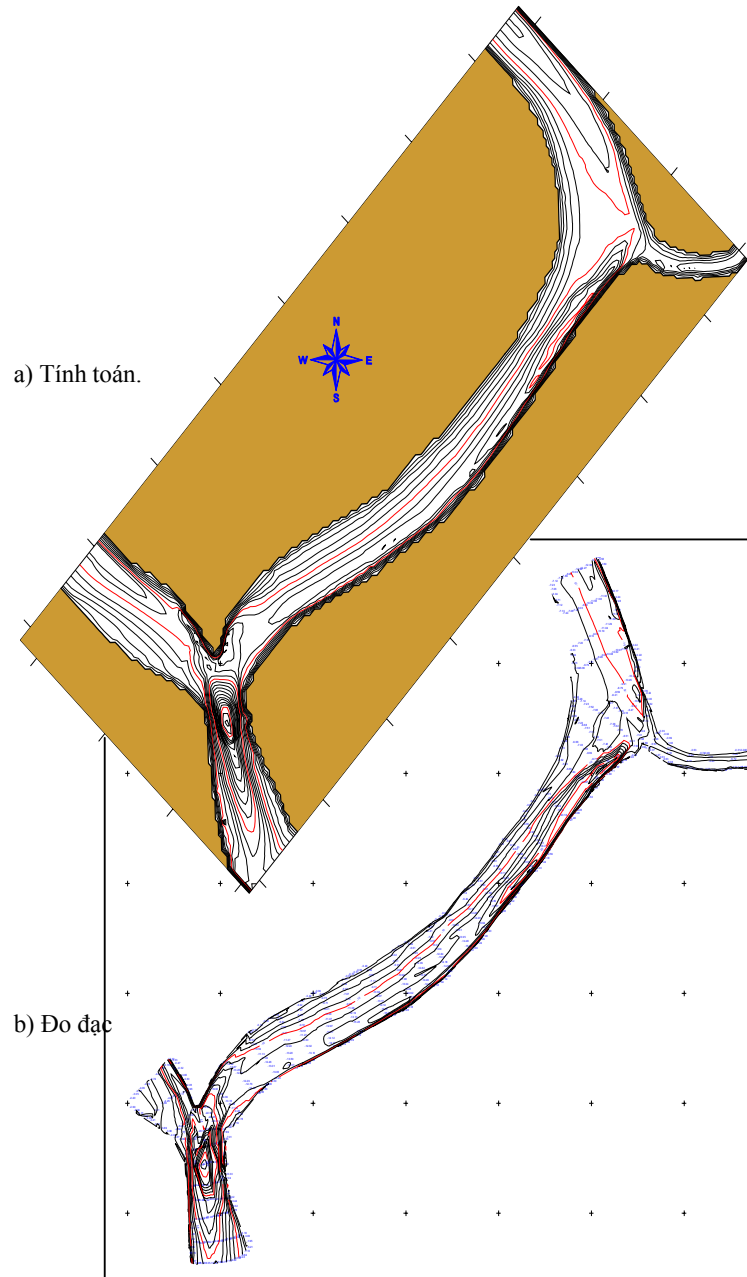
Hình H.5 cho thấy trường vận tốc và phân bố nồng độ bùn cát lơ lửng trong dòng chảy mùa lũ ở các tầng khác nhau. Trong mùa này nồng độ bùn cát lơ lửng khá cao. Ở sát đáy, nồng độ khoảng 1300mg/l trong khi trên mặt nước khoảng 500mg/l.

Hình H.6 là kết quả tính toán đáy sông tới tháng 7/2004. So với 2 năm trước bờ bắc sông Vàm Nao bị bồi trong khi bờ nam bị xói sâu hơn. Ngoài ra ngay tại cửa rẽ về sông Tiền đáy sông bị bồi lấp. Kết quả tính cũng cho thấy hồ

xói ngay sau hợp lưu sông Hậu đã phát triển về diện tích nhưng không thay đổi độ sâu. Nhìn chung kết quả tính toán tương đối phù hợp với kết quả đo thực hiện bởi Trung tâm Nghiên cứu chính trị sông & Phòng chống thiên tai.



Hình H.5. Trường vận tốc và phân bố nồng độ bùn cát lơ lửng mùa lũ



Hình H 6. Địa hình đáy sông Vàm Nao tháng 7/2004

4. KẾT LUẬN

Mặc dù mô hình giới thiệu trong bài báo còn một số hạn chế như bước thời gian tính không lớn do là sơ đồ hiện; độ chính xác ở vùng sát bờ chưa cao do dùng lưới tính vuông góc... nhưng nó đáp ứng được yêu cầu nghiên cứu quá trình biến hình lòng dẫn trong sông. Kết quả tính trường vận tốc và diễn biến đáy sông Vàm Nao cho thấy mô hình có độ tinh tế và chính xác khá cao.

PRELIMINARY RESULT OF DEVELOPMENT OF 3D NUMERICAL MODEL FOR MORPHOLOGICAL PROCESS

Le Song Giang⁽¹⁾, Le Manh Hung⁽²⁾

(1) University of Technology, VNU-HCM

(2) Southern Institute for Water Resource Research

ABSTRACT: *The paper presented a 3D numerical model for calculation of flow and sediment transport in channels. The flow is calculated by solving the Reynolds equation with hydrostatic assumption. Suspended-load is simulated by transport equation while bed-load is calculated using empirical formula. Bed transformation is obtained by solving an overall mass-balance equation. All equations are solved using finite volume method. The model is applied for study of bed deformation of VamNao river in the Mekong delta.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Gessler D., Hall B., Spasojevic M., Holly F., Pourtaheri H. and Raphelt N., *J. Hydralic Eng., ASCE*, Vol. 125 (7), pp. 737-749. (1999)
- [2]. Wu W., Rodi W. and Wenka T., *J. Hydralic Eng., ASCE*, Vol. 126 (1), pp. 4-15. (2000).
- [3]. Lê Song Giang. *Mô hình số cho dòng chảy 3 chiều nước nông*, Hội nghị KH Cơ học Thủy khí và Công nghệ mới, Lãng cô, 24-25/7/2001.
- [4]. Lê Song Giang, Nguyễn Văn Nghiệp, Nguyễn Cửu Tuệ. *Mô hình dòng chảy 3 chiều trong đoạn sông cong*, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VII, Hà nội, 12/2002.
- [5]. Lê Song Giang, Nguyễn Thị Phương, Trần Mạnh Vũ. *Nghiên cứu bằng phương pháp số dòng chảy gió ba chiều biển Đông*, Hội nghị KH Cơ học Thủy khí toàn quốc năm 2003, Đà Nẵng, 21-23/7/2003.
- [6]. Blumberg A.F. and Mellor G.L. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, N.S. Heaps, ed., American Geophysical Union, Washington D.C., pp. 1-16. (1987)
- [7]. Davies, A.M. and Gerritsen H., *Tellus*, 46A, pp. 200-221. (1994)
- [8]. Smagorinsky, J., *Monthly Weather Rev.*, 91, 99 - 16 (1963)
- [9]. Douglas J.J. and Gunn J.E., *Num. Math.*, Vol. 6, 428-453. (1964)
- [10]. Van Rijn., *J. Hydralic Eng., ASCE*, Vol. 110 (10), pp. 1431-1456. (1984a)
- [11]. Van Rijn., *J. Hydralic Eng., ASCE*, Vol. 110 (11), pp. 1613-1641. (1984b)
- [12]. Van Rijn., *Delft Hydraulics Communication No. 382*. (1987)
- [13]. Lê Song Giang, Phạm Thị Mộng Thu. *Nghiên cứu bằng phương pháp số chuyển động bùn cát ở vùng biển Cần Giờ*, Hội nghị khoa học Cơ học Thủy khí toàn quốc năm 2003, Đà Nẵng 21-23/7/2003.