

MÔ HÌNH TÍNH LŨ BIẾN ĐỔI CHẬM

Nguyễn Thống

Khoa Kỹ thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách khoa – ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 12 tháng 02 năm 2004)

TÓM TẮT: Mô hình được thiết lập nhằm mục đích mô phỏng hiện tượng lũ biến đổi chậm trong vùng đồng bằng. Đây là mô hình toán kết hợp giữa giải hai mô hình dòng chảy: dòng chảy một chiều (1D) cho mạng lưới sông rạch và dòng chảy hai chiều (2D) cho dòng chảy tràn mặt trong ô ruộng. Sự kết hợp giữa hai mô hình toán 1D và 2D thông qua sự trao đổi nước giữa sông và các ô ruộng có cạnh tiếp cận. Phương trình động lực được xấp xỉ theo quan điểm sóng khuếch tán "diffusive wave approximation" [1], theo đó chỉ hai số hạng quan trọng là độ dốc mực nước và lực ma sát đáy sẽ được xét trong phương trình. Sai phân thời gian sử dụng theo sơ đồ ẩn Preissmann được thực hiện trên lưới không gian dạng sơ lê [2]. Trên các giả thiết nêu trên sẽ hình thành bài toán phi tuyến với ẩn số là mực nước đại biểu của ô ruộng và được giải lặp trong mỗi bước thời gian theo phương pháp Woods Charles. Các ô ruộng bị ngập hoặc không ngập sẽ được xử lý sau mỗi bước thời gian. Trường vận tốc sau mỗi thời điểm tính có thể được làm trơn hoặc không.

1. Giới thiệu

Mô hình toán là một công cụ hiệu quả và kinh tế nhất trong nghiên cứu bài toán lũ. Sử dụng mô hình toán cho phép dễ dàng nghiên cứu và đánh giá về hiệu quả các phương án quy hoạch công trình cũng như dự báo về sự thay đổi dòng chảy.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1 Hệ phương trình cơ bản của mô hình

Phương trình động lực sử dụng theo dạng mô hình xấp xỉ sóng khuếch tán. Với giả thiết này dòng chảy được giả thiết chủ yếu dựa vào sự cân bằng của độ dốc mặt nước và ma sát đáy. Phương trình động lực theo phương x và y:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} + S_{fx} = 0 \quad \text{và} \quad \frac{\partial Z}{\partial y} + S_{fy} = 0 \quad (0.1)$$

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = q_{bs} \quad (0.2)$$

Phương trình Strickler theo phương x và y:

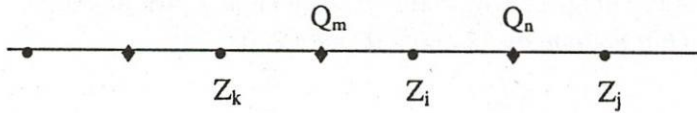
$$S_{fx} = \frac{Q_x |Q_x|}{D^2} \quad \text{và} \quad S_{fy} = \frac{Q_y |Q_y|}{D^2} \quad (0.3)$$

$$D = k_{str} h^{5/3} b; \quad k_{str} = \frac{21 \div 24}{d^{1/6}}$$

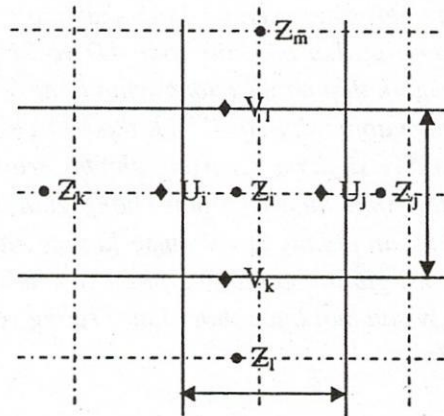
Z cao độ mặt nước; U, V vận tốc trung bình; h chiều sâu nước; q_{bs} lưu lượng bổ sung; Q_x, Q_y lưu lượng; b chiều rộng; d đường kính trung bình hạt tạo lòng dẫn.

2.2 Sơ đồ sai phân không gian và thời gian

Sai phân không gian được thực hiện trên lưới dạng so le (h.1a,b). Vị trí xác định cao trình mực nước (Z) tạo thành một lưới, và vị trí xác định vận tốc (lưu lượng) tạo thành một mạng lưới so le riêng như sau.



Hình 1a : Sơ đồ mạng lưới sai phân không gian 1D



Hình 1b : Sơ đồ mạng lưới sai phân không gian 2D

Sai phân thời gian được sử dụng theo sơ đồ ẩn Preissmann. Ẩn số bài toán là mực nước Z tại các điểm nút cho mạng lưới.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{i+1}^{t+1} - f_{i+1}^t}{\Delta t} + \frac{f_i^{t+1} - f_i^t}{\Delta t} \right) \tag{0.4}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{i+1}^{t+1} - f_i^{t+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{f_{i+1}^t - f_i^t}{\Delta x} \tag{0.5}$$

$$f(x, t) = \frac{\theta}{2} (f_{i+1}^{t+1} + f_i^{t+1}) + \frac{1 - \theta}{2} (f_{i+1}^t + f_i^t) \tag{0.6}$$

với $0.5 \leq \theta \leq 1$

2.3 Phương trình sai phân 1D

Phương trình sai phân cho biến Z_i^{t+1} tại nút i cho mạng lưới (h.1a):

$$-\Delta t \cdot \theta \cdot \alpha_m^{t+1} Z_k^{t+1} + [\Delta x_i \cdot \sigma_i + \Delta t \cdot \theta \cdot \alpha_n^{t+1} + \Delta t \cdot \theta \cdot \alpha_m^{t+1}] Z_i^{t+1} - \Delta t \cdot \theta \cdot \alpha_n^{t+1} Z_j^{t+1} = \Delta x_i \cdot \sigma_i \cdot Z_i^t - \Delta t \cdot (1 - \theta) \cdot [\alpha_n^t (Z_i^t - Z_j^t) - \alpha_m^t (Z_k^t - Z_i^t)] + q_i \cdot \Delta t \cdot \Delta x_i \tag{0.7}$$

trong đó:

$$\alpha_n^t = \frac{D_n^t}{[\Delta x_n |Z_i^t - Z_j^t|]^{0.5}}; D_n^t = \frac{(21 \div 24)}{d^{1/6}} (h_n^t)^{5/3} b_n^t; \sigma_i = \theta \cdot b_i^{t+1} + (1 - \theta) \cdot b_i^t$$

h_n, b_n : chiều sâu, chiều rộng mặt thoáng nước tại nút n.

Hay dưới dạng thu gọn:

$$F(Z_i^{t+1}, Z_j^{t+1}, Z_k^{t+1}) = A^t \tag{0.8}$$

2.4 Phương trình sai phân 2D

Ẩn số bài toán 2D là mực nước Z_i^{t+1} tại các điểm nút cho mạng lưới (h.1b).

Phương trình sai phân từ phương trình động lực theo phương x và y:

$$Uh = \frac{k_{str} h^{5/3}}{[\Delta x |Z_j - Z_i|]^{1/2}} (Z_j - Z_i) = \alpha (Z_j - Z_i) \quad (0.9)$$

$$Vh = \frac{k_{str} h^{5/3}}{[\Delta y |Z_i - Z_h|]^{1/2}} (Z_i - Z_h) = \beta (Z_i - Z_h) \quad (0.10)$$

Kết hợp (1.9), (1.10) vào phương trình (1.10) cho phương trình sai phân theo Z_i^{t+1} tại ô thứ i:

$$\begin{aligned} & -\theta \frac{dt}{\Delta x} (\alpha_i^{t+1} Z_k^{t+1} + \alpha_j^{t+1} Z_j^{t+1}) - \theta \frac{dt}{\Delta y} (\beta_k^{t+1} Z_l^{t+1} + \beta_l^{t+1} Z_m^{t+1}) + \\ & \left[1 + \theta \frac{dt}{\Delta x} (\alpha_i^{t+1} + \alpha_j^{t+1}) + \theta \frac{dt}{\Delta y} (\beta_k^{t+1} + \beta_l^{t+1}) \right] Z_i^{t+1} = \\ & (1-\theta) \frac{dt}{\Delta x} (\alpha_i^t Z_k^t + \alpha_j^t Z_j^t) + (1-\theta) \frac{dt}{\Delta y} (\beta_k^t Z_l^t + \beta_l^t Z_m^t) - \\ & \left[(1-\theta) \frac{dt}{\Delta x} (\alpha_i^t + \alpha_j^t) + (1-\theta) \frac{dt}{\Delta y} (\beta_k^t + \beta_l^t) \right] Z_i^t + q_{bs}(i) * dt \end{aligned} \quad (0.11)$$

trong đó:

$$\alpha_j = \frac{k_{str} h_j^{5/3}}{[\Delta x |Z_i - Z_j|]^{0.5}} ; \beta_l = \frac{k_{str} h_l^{5/3}}{[\Delta y |Z_i - Z_m|]^{0.5}}$$

Hay dưới dạng thu gọn:

$$G(Z_i^{t+1}, Z_j^{t+1}, Z_k^{t+1}, Z_l^{t+1}, Z_m^{t+1}) = B^t \quad (0.12)$$

Trên cơ sở phương trình (0.12), viết phương trình sai phân cho tất cả các ô của toàn mạng lưới sẽ nhận được hệ gồm $M \times N$ phương trình (M : số ô theo phương ngang, N : số ô theo phương đứng) với các hệ số phụ thuộc vào ẩn số cần tìm.

Hệ phương trình thiết lập (dạng ma trận band) cho mạng lưới tính cao độ mực nước ô ruộng Z , trên cơ sở (0.12) là một hệ phương trình phi tuyến được tuyến tính hóa và giải lặp bằng phương pháp Woods Charles để xác định Z_i^{t+1} tại thời điểm mới (các hệ số phương trình phụ thuộc vào giá trị cao trình mực nước tại thời điểm mới, Z^{t+1}).

2.5 Điều kiện đặc biệt và biên

Tại vị trí hội tụ của các nhánh sông trong bài toán 1D, phương trình liên tục có dạng sau đây sẽ được thay thế cho phương trình (1.12):

$$\sum_{k=1}^N Q_k = 0 \quad (1.13)$$

Q_k : lưu lượng nhánh thứ k đi vào nút hội tụ mạng lưới.

Trong trường hợp dòng chảy đi qua các loại công trình: cống làm việc theo 1 hoặc 2 chiều, đập tràn, đập ngăn ... phương trình động lực sẽ được thay thế bởi phương trình biểu diễn quy luật thủy lực qua công trình thích hợp tương ứng. Mô hình đã xử lý cho các trường hợp cống 1 và 2 chiều, đập tràn, đập ngăn.

Điều kiện biên : Mô hình được thiết lập cho phép mô tả các điều kiện biên loại mực nước Z_b và loại lưu lượng Q_b .

2.6 Kết hợp mô hình (1D+2D)

Mỗi bước thời gian mô hình toán 1D và 2D sẽ được giải tách biệt nhau. Sự quan hệ giữa hai mô hình thông qua phương trình trao đổi nước giữa sông và các ô ruộng kế cận sông. Quá trình trao đổi lưu lượng q được thể hiện qua phương trình sau:

$$q = \pm \varphi * h * \Delta L \sqrt{2g |Z_s - Z_r|} \quad (1.14)$$

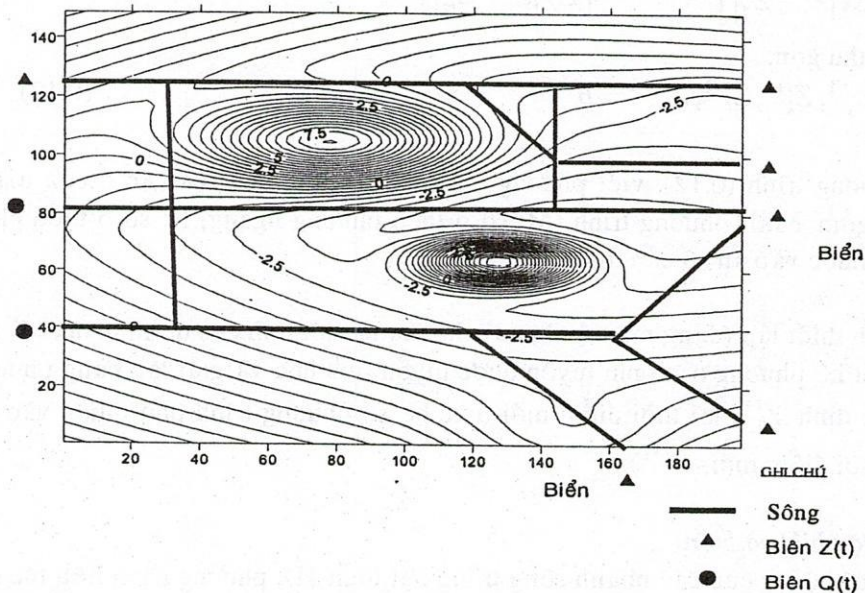
trong đó φ hệ số lưu lượng, phụ thuộc vào điều kiện địa hình; h cột nước tràn; ΔL chiều dài cạnh sông tiếp xúc; Z_s, Z_r cao trình mực nước trong sông, ô ruộng.

3. Ví dụ áp dụng

Mô hình được ứng dụng để mô phỏng dòng chảy trên vùng địa hình giả định được hình thành trên cơ sở 30000 ô ruộng vuông (chữ nhật) cạnh dài 2.5km, gồm 200 ô theo phương ngang và 150 ô theo phương đứng. Mạng lưới sông được mô phỏng thành 894 đoạn và gồm có 9 biên mực nước và 1 biên lưu lượng.

Mô phỏng được thực hiện cho 50 ngày bắt đầu từ trạng thái cao trình mực nước toàn vùng là như nhau. Kết quả sau đây giới thiệu trường vận tốc dòng chảy tại một số thời điểm điển hình và sự thay đổi dòng chảy khi giả thiết xây dựng một đường lộ trong vùng mô phỏng.

Hình 2: Địa hình và mạng lưới sông



Điều kiện biên

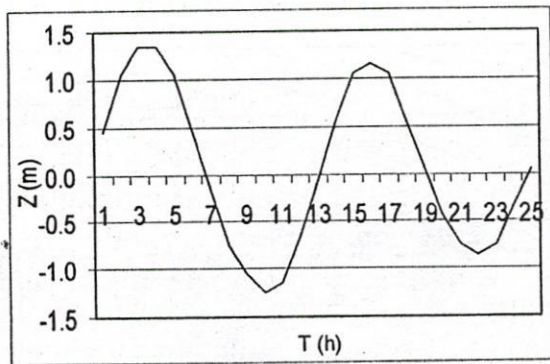
Tại vị trí các nhánh sông đổ ra biển mực nước biên thay đổi theo thời gian với mô hình triều sử dụng như đồ thị 3. Tại các vị trí vào hệ thống các điều kiện về mực nước, lưu lượng không đổi sẽ được áp đặt theo thời gian.

Mô phỏng được thực hiện cho 2 trường hợp, trường hợp không có đường lộ và trường hợp có đường lộ (một ví dụ ứng dụng trong bài toán quy hoạch).

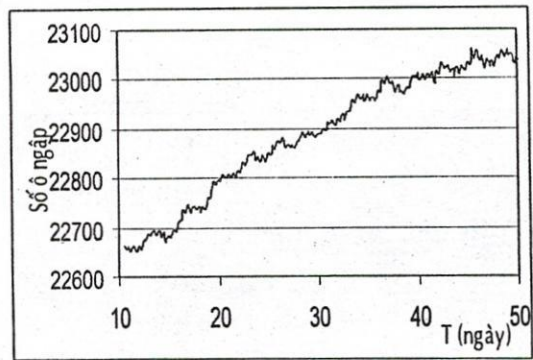
6.1 Trường hợp không có đường lộ

Một số kết quả điển hình sau đây cho trường hợp trong vùng chưa có quy hoạch đường lộ.

Hình 3: Biên độ triều Z

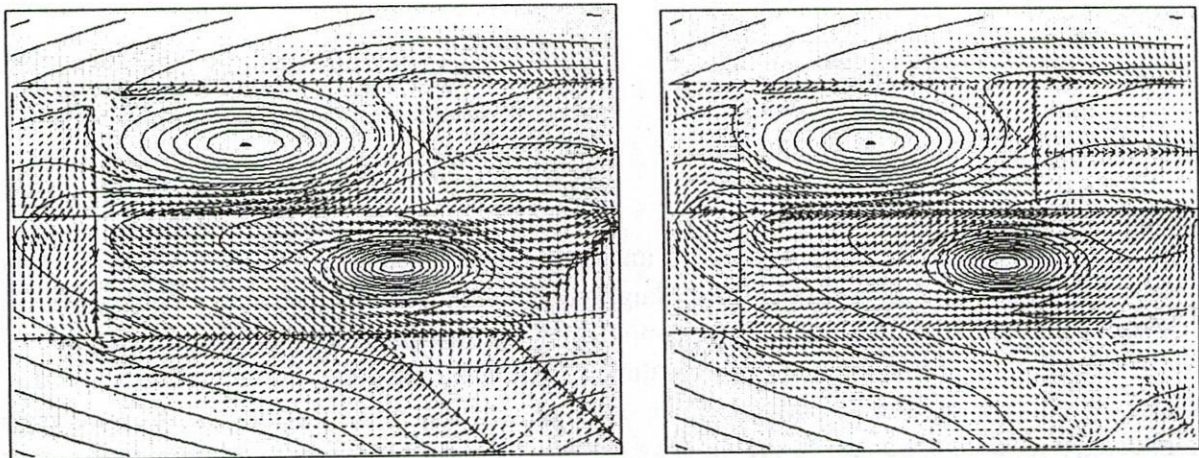


Hình 4 : Số ô bị ngập theo thời gian



Trường vận tốc dòng chảy tại một số thời điểm điển hình như sau:

Hình 5 : Trường vận tốc sau 47 ngày và 49 ngày 6 mô phỏng

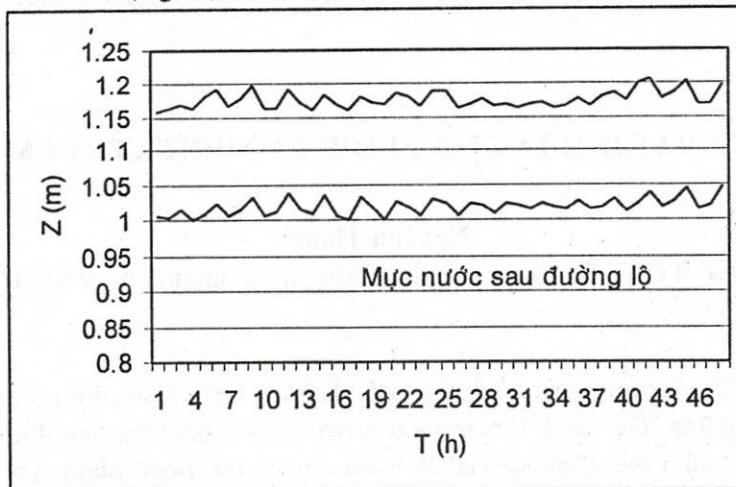


Ghi chú: $V_{max} = 0.8m/s$

6.2 Trường hợp có đường lộ

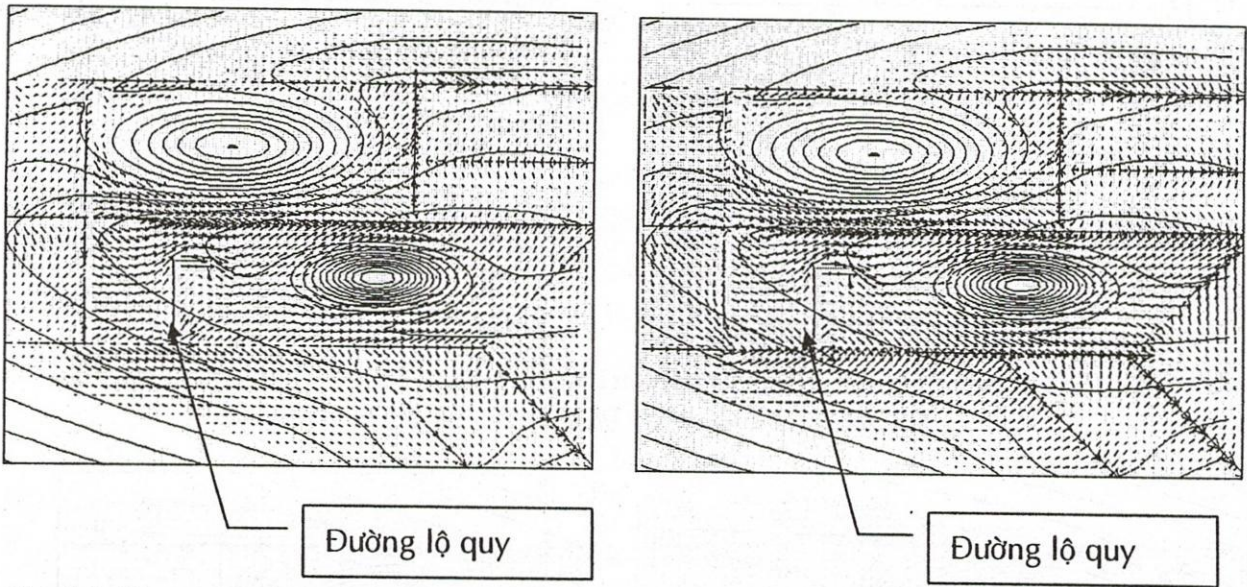
So với mô phỏng nêu trên trong trường hợp này trong khu vực có dự kiến quy hoạch một đường lộ như hình vẽ. Tác dụng làm thay đổi dòng chảy trong trường hợp này sẽ được nghiên cứu. Sau đây là một số kết quả.

Hình 7 : Dao động mực nước trước và sau đường điển hình



Trường vận tốc dòng chảy cho một số thời điểm như sau:

Hình 8 : Trường vận tốc sau 47 ngày 20 và 48 ngày 22 giờ mô phỏng



Ghi chú: $V_{\max} = 0.8\text{m/s}$

7. Kết luận

Mô hình giới thiệu trên tương đối đơn giản khi ứng dụng, phù hợp cho bài toán dòng chảy tràn mặt biến đổi chậm như trường hợp lũ ở vùng đồng bằng sông Cửu Long. Cao độ địa hình lưu vực được mô tả dễ dàng theo độ chính xác yêu cầu thông qua định nghĩa số lượng ô theo hai phương x và y. Các ký hiệu ô và liên kết giữa các ô được chương trình tính tự động. Mô hình được tổ chức nhằm để dễ dàng áp dụng trong bài toán nghiên cứu hiện trạng và đánh giá các phương án quy hoạch. Các công trình dự kiến: cống, đập, đường, kênh..., có thể dễ dàng đưa vào để nghiên cứu ảnh hưởng của nó lên vùng nghiên cứu mà không làm thay đổi kết cấu chương trình.

Các kết quả giới thiệu trên chỉ mới thực hiện để kiểm tra mô hình trên một địa hình giả định. Để có thể hiệu chỉnh các thông số mô hình (ma sát đáy, hệ số trao đổi nước giữa sông và ô ruộng, hệ số dòng chảy của cống ngầm qua đường...) và đánh giá mô hình chính xác hơn trong tương lai cần sử dụng số liệu lũ, mực nước quan trắc thực và địa hình thực đo cho bài toán cụ thể có số liệu quan trắc. Ví dụ bài toán mô phỏng lũ đồng bằng sông Cửu Long là một trường hợp điển hình trong điều kiện Việt Nam.

GRADUALLY VARIED FLOOD FLOW COMPUTATION MODELLING

Nguyen Thong

Faculty of Civil Engineering University of Technology – VNU-HCM

ABSTRACT: The proposed model was established to simulate the propagation of gradually varied flood flow in deltas. The model incorporates two flow models: a one-dimensional flow model for the river network and a two-dimensional flow model for the flood plain. The combination of the two models was carried out through the exchange of flow between the river and the adjacent flood plain subareas. The momentum equation was approximated by a diffusion model; in which only two

terms representing the water surface slope and the friction slope are considered. The implicit Preissmann scheme was utilized to discretize of the governing equations in an alternate grid. This results in a nonlinear system of equations and the unknowns are the representative water surface in each flood plain subareas. The resulting equations was solved iteratively using the Wood Charles method. The flood plain subareas whether inundated or not will be treated after each time step. The velocity field after each time step can be smoothed or not.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. A. Cunge. *Simulation des écoulements non permanents dans les rivières et canaux*. Institut national Polytechnique de Grenoble. Cours de 3^{ème} année (1986).
- [2] Nguyễn Thống. *Simulation des écoulements 3D aux équations primitives. Effets des topographies sous marines à grandes et à moyennes échelles*. Thèse de doctorat en 1991 à l'INPG, France.
- [3] Nguyễn Ân Niên. *Phân tích các mô hình tính toán thủy lực sử dụng cho đồng bằng sông Cửu Long*. Hội thảo Thiết kế & Thi công công trình Thủy lợi đồng bằng sông Cửu Long. (2002).