

Mô phỏng dòng chảy trong sông bằng sóng động học một chiều phi tuyến

Bùi Văn Chanh^{1,*}, Trần Ngọc Anh^{2,3}, Lương Tuấn Anh⁴

¹*Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Trung Bộ, Trung tâm KTTV Quốc gia,
Bộ TNMT, 22 Pasteur, Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam*

²*Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,
ĐHQGHN, 334 Nguyễn Trãi, Hà Nội, Việt Nam*

³*Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,
ĐHQGHN, 334 Nguyễn Trãi, Hà Nội, Việt Nam*

⁴*Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu, Bộ Tài nguyên và Môi trường,
62 Nguyễn Chí Thanh, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 08 tháng 8 năm 2016

Chỉnh sửa ngày 26 tháng 8 năm 2016; Chấp nhận đăng ngày 16 tháng 12 năm 2016

Tóm tắt: Mô phỏng dòng chảy thượng nguồn các con sông là rất quan trọng và cần thiết, do hạn chế về số liệu nên việc mô phỏng gặp nhiều khó khăn. Trong nghiên cứu này trình bày phương pháp mô phỏng dòng chảy phân bố bằng mô hình sóng động học phi tuyến, vừa giải quyết hạn chế vấn đề số liệu vừa đáp ứng yêu cầu mô phỏng và cho kết quả nhanh hơn. Mô hình sóng động học phi tuyến được xây dựng từ hệ phương trình Saint Venant, trong đó gồm một chương trình sóng động học phi tuyến giải hệ phương trình bằng phương pháp lặp Newton và một chương trình sóng động học tuyến tính phục vụ tính toán giá trị lưu lượng ban đầu. Chương trình sóng động học tuyến tính được xây dựng từ hệ phương trình Saint Venant và được giải bằng sơ đồ sai phân ẩn 4 điểm. Chương trình sóng động học tuyến tính sau khi lập trình cho kết quả trùng khớp với kết quả tính toán trong giáo trình Thủy văn ứng dụng của Vante Chow [1, 1988]. Mô hình sóng động học phi tuyến gồm 2 phần, trong đó phần đầu là chương trình sóng động học phi tuyến, phần sau là chương trình sóng động học phi tuyến. Trong nghiên cứu đã xây dựng phương pháp, sơ đồ giải, lập trình chương trình tính toán cho mô hình. Mô hình được lập trình bằng ngôn ngữ lập trình Fortran 90 và kiểm tra chất lượng mô phỏng tại trạm thủy văn Tà Pao, Võ Xu trên sông La Ngà tỉnh Bình Thuận. Kết quả mô phỏng của mô hình khá tốt, tuy nhiên mô hình có nhược điểm là không mô phỏng được cho đoạn sông có ảnh hưởng triều, nước vật.

Từ khóa: Sóng động học, Saint Venant, phương pháp lặp Newton.

1. Mở đầu

Phương trình Saint Venant có nhiều dạng giản hóa khác nhau, mỗi dạng xác định một mô hình diễn toán dòng chảy không ổn định phân

bố một chiều. Các phương trình liên tục và động lượng bảo toàn và không bảo toàn bỏ qua dòng bên, lực cản của gió và các tổn thất xoáy được dùng để định nghĩa các loại mô hình khác nhau về diễn toán dòng chảy không ổn định phân bố một chiều.

Phương trình động lượng bao gồm các thành phần thuộc các quá trình vật lý điều khiển

* Tác giả liên hệ. ĐT.: 84-915620289
Email: buivanchanh@gmail.com

dòng động lượng. Các thành phần này là: thành phần gia tốc địa phương mô tả sự thay đổi của động lượng do thay đổi của vận tốc trong thời gian, thành phần gia tốc đối lưu mô tả sự thay đổi của động lượng gây ra bởi sự thay đổi của vận tốc dọc theo kênh, thành phần áp lực tỉ lệ với sự thay đổi độ sâu của nước dọc theo kênh, thành phần trọng lực tỉ lệ với độ dốc đáy S_0 và thành phần ma sát tỉ lệ với độ dốc ma sát S_f . Thành phần gia tốc địa phương và gia tốc đối lưu đại biểu cho tác động của các lực quán tính lên dòng chảy.

+ Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

+ Phương trình động lượng:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3)$$

Sóng động học chi phối dòng chảy khi các lực quán tính và áp lực có thể bỏ qua, trong sóng động học lực ma sát và trọng lực cân bằng nhau nên dòng nước chảy không có gia tốc. Đối với sóng động học, đường năng song song với đáy kênh và dòng chảy trong đoạn nguyên tố là một dòng đều ổn định (vì $S_0 = S_f$).

Sóng động học tạo nên do sự thay đổi trong dòng chảy như thay đổi về lưu lượng nước hoặc tốc độ sóng là vận tốc truyền thay đổi dọc theo kênh dẫn. Tốc độ sóng phụ thuộc vào loại sóng đang xét và có thể hoàn toàn khác biệt với vận tốc dòng nước. Đối với sóng động học, các thành phần gia tốc và áp suất trong phương trình động lượng đã bị bỏ qua nên chuyển động của sóng được mô tả chủ yếu bằng phương trình liên tục. Do đó sóng đã mang tên sóng động học và động học nghiên cứu chuyển động trong đó không xét đến ảnh hưởng của khối lượng và lực. Mô hình sóng động học được xác định bằng các phương trình như sau:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (5)$$

- Phương trình động lượng:

$$S_0 = S_f \quad (6)$$

$$A = \alpha Q^\beta \quad (7)$$

Trong phương trình Manning với $S_0 = S_f$ và $R = A/P$ ta có:

$$Q = \frac{1.49 S_0^{\frac{1}{2}}}{n P^{\frac{5}{3}}} A^{\frac{5}{3}} \quad (8)$$

Viết lại phương trình (8) cho A từ đó tìm được α và $\beta = 0.6$ như sau:

$$A = \left(\frac{n P^{\frac{2}{3}}}{1.49 \sqrt{S_0}} \right)^{\frac{3}{5}} Q^{\frac{3}{5}} \quad (9)$$

$$A = \left(\frac{n P^{\frac{2}{3}}}{1.49 \sqrt{S_0}} \right)^{0.6} Q^{0.6} \quad (10)$$

Phương trình (1) chỉ phụ thuộc vào A và Q, trong đó A được xác định trong phương trình (7). Đạo hàm riêng phương trình (7) của biến A và Q theo t và thế vào phương trình (1) được phương trình (11). Thế phương trình (11) vào phương trình (5) được phương trình (12). Phương trình (12) được sai phân theo sơ đồ tuyến tính theo phương trình (19), sai phân theo sơ đồ phi tuyến theo phương trình (24).

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (12)$$

2. Xây dựng mô hình

Mô hình được xây dựng trên ngôn ngữ lập trình Fortran 90 gồm hai phần chính là mô hình sóng động học tuyến tính và phi tuyến. Trong đó mô hình tuyến tính được sử dụng để làm nghiệm thứ nhất của mô hình phi tuyến. Mô hình tuyến tính được giải bằng sơ đồ sai phân ẩn, mô hình phi tuyến được giải bằng phương pháp lặp Newton.

2.1. Sơ đồ sóng động học tuyến tính

Áp dụng sơ đồ sai phân ẩn:

$$\frac{\partial u_{i+1}^{j+1}}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_{i+1}^{j+1}}{\partial t} = \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_{i+1}^{j+1}}{\partial x} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q_{i+1}^{j+1}}{\partial t} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (16)$$

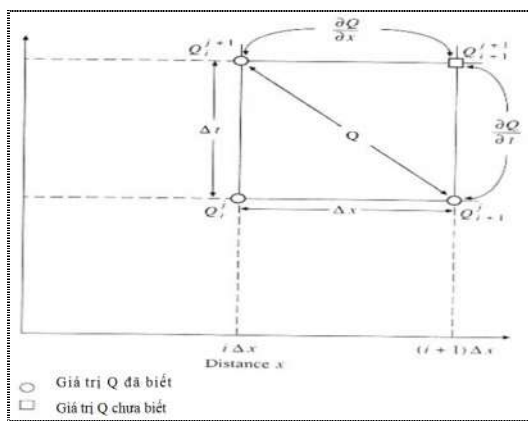
$$Q \approx \frac{Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^j}{2} \quad (17)$$

$$q \approx \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (18)$$

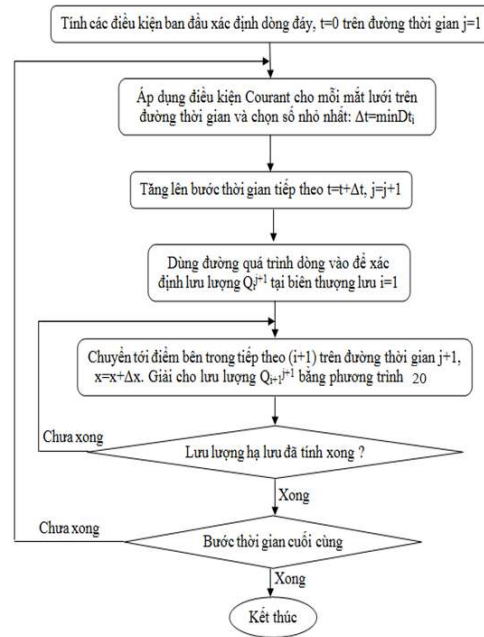
Thay thế các phương trình từ (15) đến (18) vào phương trình (12) được phương trình sai phân sóng động học tuyến tính cho sơ đồ ẩn như sau:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \right) = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (19)$$

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha\beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(2 \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (20)$$



Hình 1. Sơ đồ sai phân ẩn giải phương trình sóng động học tuyến tính.



Hình 2. Sơ đồ khối tính toán sóng động học tuyến tính.

2.2. Sơ đồ sóng động học phi tuyến

Sai phân phương trình (12) như sau:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_{i+1}^j}{\Delta t} = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (21)$$

$$A_{i+1}^{j+1} - \alpha (Q_{i+1}^{j+1})^\beta \quad (22)$$

$$A_{i+1}^j = \alpha (Q_{i+1}^j)^\beta \quad (23)$$

Thế phương trình (22) và (23) vào (21) ta được:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha (Q_{i+1}^{j+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^j + \alpha (Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (24)$$

Phương trình này đã được sắp xếp cho lưu lượng chưa biết Q_{i+1}^{j+1} nằm ở vế trái và các đại lượng đã biết nằm ở vế phải. Đây là phương trình phi tuyến đối với Q_{i+1}^{j+1} do đó cần được giải bằng phương pháp số, trong chương trình lập trình và sơ đồ khối dưới đây áp dụng phương pháp lặp Newton. Mô hình tuyến tính xây dựng trong mô hình phi tuyến được thể hiện trong khối ước lượng ban đầu bằng cách sử dụng ước lượng tuyến tính 20 như hình dưới đây.

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (25)$$

Từ đó một sai số dư $f(Q_{i+1}^{j+1})$ được xác định bằng phương trình (24).

$$f(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^{j+1})^\beta - C \quad (26)$$

Đạo hàm bậc nhất của $f(Q_{i+1}^{j+1})$ như sau:

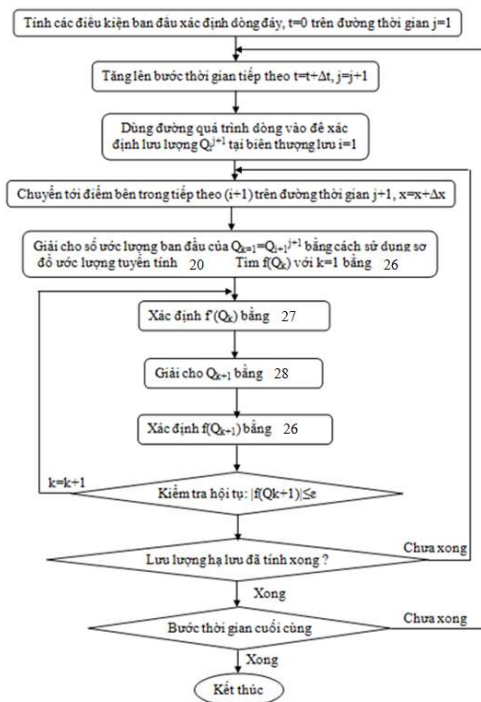
$$f'(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta(Q_{i+1}^{j+1})^{\beta-1} \quad (27)$$

Mục tiêu là tìm Q_{i+1}^{j+1} để $f(Q_{i+1}^{j+1})$ bằng không. Sử dụng phương pháp lặp Newton và các bước lặp $k = 1, 2, 3, \dots$

$$(Q_{i+1}^{j+1})_{k+1} = (Q_{i+1}^{j+1})_k - \frac{f(Q_{i+1}^{j+1})_k}{f'(Q_{i+1}^{j+1})_k} \quad (28)$$

Tiêu chuẩn hội tụ cho quá trình lặp là:

$$|f(Q_{i+1}^{j+1})_{k+1}| \leq \varepsilon \quad (29)$$



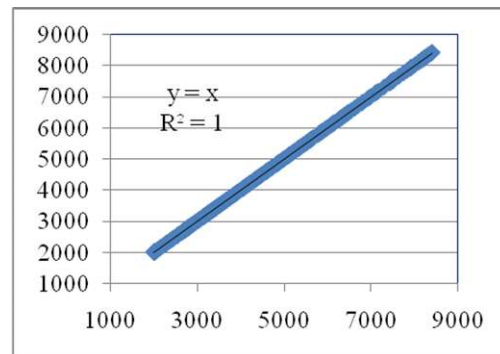
Hình 3. Sơ đồ khối tính toán sóng động học phi tuyến.

Ước lượng giá trị khởi đầu của Q_{i+1}^{j+1} trong mỗi quá trình lặp có ảnh hưởng quan trọng đến sự hội tụ của sơ đồ. Một cách tiếp cận là sử dụng nghiệm của sơ đồ tuyến tính, phương trình (20) như là nghiệm gần đúng thứ nhất của sơ đồ phi tuyến. Li Simons và Stevens (1975) [1] sau khi tiến hành các phân tích về tính ổn định đã chỉ ra sơ đồ sử dụng phương trình (24) là một sơ đồ ổn định không điều kiện và có thể sử dụng các trị của $\Delta t/\Delta x$ trong một phạm vi khá rộng mà không tạo ra sai số lớn trong hình dạng của đường quá trình lưu lượng.

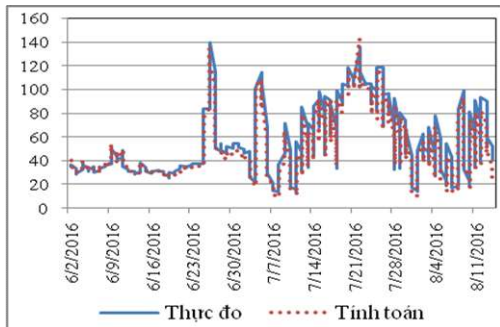
3. Mô phỏng thử nghiệm mô hình

Mô hình sau khi lập trình được kiểm tra với ví dụ 9.6.1 trong giáo trình Thủy văn Ứng dụng của Vente Chow [1]. Kết quả của mô hình trùng khớp với kết quả tính toán của ví dụ trên, tương quan kết quả tính được thể hiện trong hình 4.

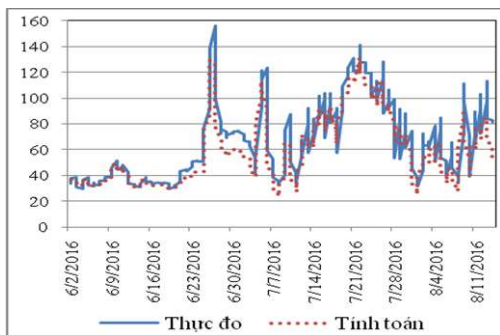
Mô hình sóng động học một chiều phi tuyến sau khi xây dựng được mô phỏng thử nghiệm mô phỏng dòng chảy trên sông La Ngà đoạn từ đập thủy điện Đa Mì đến trạm thủy văn Phú Hiệp. Điều kiện ban đầu xác định như sau: độ rộng trung bình của sông là 95m, độ dốc sông trung bình 1%, chiều dài sông 115310m, số đoạn sông là 8 đoạn, bước thời gian mô phỏng là 360 phút, lưu lượng ban đầu $40\text{m}^3/\text{s}$, hệ số nhám Manning được xác định từ bảng tra thủy lực của M.F. Xripnut cho sông La Ngà 0.032.



Hình 4. Tương quan kết quả tính bằng chương trình và của Vente Chow.



Hình 5. Đường tính toán và thực đo trạm Tà Pao.



Hình 6. Đường tính toán và thực đo trạm Võ Xu.

Mô hình mô phỏng dòng chảy từ dữ liệu xả hồ Đa Mi và gia nhập khu giữa được tính từ mô hình MIKE NAM của Đan Mạch với thời đoạn 6 giờ, thời gian mô phỏng từ 01h/01/6 đến 07h/14/8 năm 2016. Mô hình MIKE NAM được kế thừa từ phương án dự báo thủy văn lưu

vực sông La Ngà của Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Trung Bộ. Mô hình được thiết lập cho khu vực hạ lưu hồ thủy điện Đa Mi với các trạm mưa Tà Pao, Võ Xu, Suối Kiết, Đông Giang, Mê Pu, bốc hơi tính theo trạm khí tượng Phan Thiết. Bộ thông số MIKE NAM được hiệu chỉnh và kiểm định tại trạm thủy văn Đại Nga trên sông La Ngà, đánh giá chất lượng hiệu chỉnh theo chỉ tiêu Nash là 90%, kiểm định là 87%, đạt loại tốt theo tiêu chí của Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO). Từ số liệu thực đo tại trạm Tà Pao và Phú Hiệp tiến hành hiệu chỉnh theo phương pháp thử sai đã tìm được bộ thông số hiệu chỉnh với độ dốc sông trung bình là 1,2%, hệ số nhám là 0.0357. Kết quả hiệu chỉnh tại trạm thủy văn Tà Pao theo chỉ tiêu Nash là 93,5% đạt loại tốt theo tiêu chí của WMO; trạm thủy văn Võ Xu là 82,0%, đạt loại khá theo tiêu chí của WMO.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ven Techow, David R.Maidment, Larry W.Mays (1988), Applied Hydrology, New York, McGraw-Hill, 1988.
- [2] Nguyễn Hữu Khải, Nguyễn Thanh Sơn, Mô hình toán thủy văn, Nxb Đại học Quốc gia Hà Nội, 2003.

Somulation River Discharge by Non-linear One Dimension Kinematic Wave

Bui Van Chanh¹, Tran Ngoc Anh^{2,3}, Luong Tuan Anh⁴

¹South Center Regional Hydro - Meteorological Center, NHMS, MONRE

²Faculty of Hydro-Meteorology & Oceanography, VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Hanoi, Vietnam

³Center for Environmental Fluid Dynamic, VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Hanoi, Vietnam

⁴Vietnam Institute of Meteorology Hydrology and Climate Change, MONRE, 62 Nguyen Tri Thanh, Dong Da, Hanoi, Vietnam

Abstract: Simulating discharge on upstream of rivers is very important and necessary, by restrict about data so the simulating is very difficult. This research that is presented distributed discharge

simulating method by by non-linear one dimension kinematic wave model. This model overcome restrict by lack data and satisfy demand by simulating, calculate more quickly.

Non-linear one dimension kinematic wave model is built by Saint Venant system equation that include non-linear one dimension kinematic wave program and linear one dimension kinematic wave program. Saint Venant system equation in the non-linear and linear program are solved correlatively by Newton iteration method and 4 points latent difference schedule. The linear program is used to calculate initial discharge for the non-linear program and result of the linear program is same result in Applied Hydrology syllabus of Vante Chow [1, 1988]. The linear program is first section and the non-linear program is second section in the model. This research built method, solving schedule, programming calculating for the model. Fortran 90 programming language is used to build the model and checked simulating quality at Ta Pao, Vo Xu hydrology stations on La Nga river Binh Thuan province. Simulating result of the model is good, but the model can't simulate on river section that is effected by tide and backwater and that is restrict of the model.

Keywords: Kinematic wave, Saint Venant, Newton iteration method.