

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH DÒNG CHẢY RỐI TRONG TÍNH TOÁN DÒNG CHẢY TỰ DO QUA ĐẬP TRÀN

Nguyễn Công Thành¹

Tóm tắt: Đối với dòng chảy qua đập tràn của các công trình thủy lợi, dòng chảy thường có tính nhớt và độ rối tương đối cao. Việc mô phỏng dòng chảy qua đập tràn trước đây bằng phương pháp số thường áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn với tính chất của chất lỏng là không nhớt, dòng không xoáy... Với sự phát triển của máy tính hiện nay cũng như sự phát triển của các nghiên cứu về mô hình dòng chảy rối, việc mô phỏng dòng chảy qua đập tràn nói riêng và dòng chảy tự do nói chung bằng mô hình toán đã có những bước phát triển đáng kể. Bài báo này sẽ trình bày tổng hợp một số mô hình dòng chảy rối phổ biến, ứng dụng mô hình ứng suất rối Reynolds và phương pháp thể tích hữu hạn vào việc mô phỏng và tính toán dòng chảy tự do qua đập tràn mặt cắt WES. Kết quả giữa mô phỏng số và thí nghiệm mô hình đã được kiểm tra và sự sai khác nhau là không đáng kể.

Từ khóa: Dòng chảy rối, đập tràn, mô hình dòng chảy rối, phương pháp thể tích hữu hạn.

1. MỞ ĐẦU

1.1. Hệ phương trình Navier-Stokes trong tính toán thủy động lực học chất lỏng

Căn cứ vào định luật 2 Newton, hệ phương trình bảo toàn động lượng của phần tử chất lỏng không nén được chuyển động trong hệ tọa độ Descartes ba chiều dưới dạng chỉ số được viết như sau^[1]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S_{Mi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Trong đó u_i là thành phần lưu tốc theo 3 phương x, y, z . p là áp suất, ν là hệ số nhớt động học, t là thời gian và S_{Mi} là 3 thành phần nguồn của phần tử chất lỏng theo 3 phương x, y, z . σ_{ij} là thành phần ứng suất nhớt xác định theo công thức $\sigma_{ij} = 2\nu S_{ij}$. Với chất lỏng Newton, S_{ij} là tenso vận tốc biến dạng

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad u_i \quad \text{và} \quad u_j \quad \text{là các thành phần}$$

lưu tốc theo các phương ($i, j = x, y, z$).

Phương trình bảo toàn khối lượng cho chất lỏng nhớt, không nén được viết trong hệ tọa độ Descartes ba chiều như sau

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{or} \quad \text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

Hai phương trình (1) và (2) kết hợp thành hệ phương trình Navier-Stokes cho chất lỏng nhớt, không nén được dùng để mô phỏng chuyển động của phần tử chất lỏng, gồm 4 phương trình với 4 ẩn số là u, v, w và p ^[2].

1.2. Hệ phương trình Reynolds Navier-Stokes trong tính toán thủy động lực học chất lỏng

Hệ phương trình (1) và (2) chỉ có thể giải được bằng toán học trong một số bài toán dòng chảy tầng có điều kiện biên đơn giản như dòng phẳng Poiseuille, dòng phẳng Couette, dòng Hele-shaw, dòng chảy tầng có áp trong ống trụ tròn^[3]. v.v.... Trong thực tế, dòng chảy tự do qua đập tràn là dòng chảy nhớt (có thể xem là không nén được) với độ rối cao. Như vậy, các thành phần lưu tốc và áp suất tại một điểm có độ lớn, phương chiều biến đổi liên tục theo thời gian và không gian. Ngoài thành phần dọc chiều dòng chảy còn có thành phần lưu tốc, áp suất ngang dòng tạo nên hiện tượng xáo trộn ngang của các phần tử chất lỏng. Về bản chất chuyển động của dòng chảy rối là dòng không ổn định. Do vậy, để giải được hệ phương trình (1) và (2) trong trường hợp dòng chảy rối, người ta thường dùng một số phương pháp như sau^[4]:

Mô hình dòng chảy rối cho hệ phương trình trung bình Reynolds Navier-Stokes (RANS)

Mô phỏng dòng chảy rối là chuyển động của các xoáy nước (LES)

¹ Đại học Xây Dựng (Hiện đang là NCS tại Đại học Hà Hải - Trung Quốc)

Mô phỏng dòng chảy rối bằng cách tính toán trực tiếp các thông số trung bình của dòng chảy và các thành phần dao động của lưu tốc và áp suất (DNS)

Trong những phương pháp trên thì phương pháp mô hình dòng chảy rối cho hệ phương trình RANS là được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật tính toán hiện nay. Để phát triển hệ phương trình RANS (do Reynolds phát triển năm 1985^[5]), các tham số đặc trưng của dòng chảy gồm lưu tốc, áp suất tại một điểm phụ thuộc thời gian được chia làm 2 phần: trung bình và các đại lượng mạch động, cụ thể như sau:

$$u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w', p = \bar{p} + p' \quad (3)$$

Trong đó $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ là các thành phần lưu tốc và áp suất trung bình thời gian. u', v', w', p' là các thành phần lưu tốc và áp suất mạch động xung quanh các giá trị trung bình. Thay thế phương trình (3) vào (1) và (2), sau một số bước biến đổi, hệ phương trình RANS được viết như sau:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Phương trình bảo toàn động lượng (viết dưới dạng chỉ số):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = S_{m_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_i} \quad (5)$$

Trong đó $\bar{\sigma}_{ij} = 2\nu \bar{S}_{ij}$ với \bar{S}_{ij} là vận tốc biến dạng trung bình và $\overline{u_i u_j}$ là tenso ứng suất Reynolds

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \begin{bmatrix} -\rho \overline{u'^2} & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'w'} \\ -\rho \overline{v'u'} & -\rho \overline{v'^2} & -\rho \overline{v'w'} \\ -\rho \overline{w'u'} & -\rho \overline{w'v'} & -\rho \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Hai phương trình (4) và (5) kết hợp thành hệ phương trình RANS mô phỏng chuyển động rối của phần tử chất lỏng không nén được phụ thuộc cả không gian và thời gian. Nhận thấy hệ phương trình này có 4 phương trình nhưng có 10 ẩn số, đó là 4 đại lượng $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ và 6 thành phần ứng suất rối Reynolds $\overline{u_i u_j}$, do vậy cần phải có thêm 6 phương trình nữa để có thể tìm được các đại lượng đặc trưng của dòng chảy là lưu tốc và áp suất.

1.3. Mô hình dòng chảy rối

Để có thể tính toán được hệ phương trình (4) và (5), mô hình dòng chảy rối được phát triển để mô tả được 6 thành phần ứng suất rối Reynolds. Các phương trình cần được thêm vào để đóng kín hệ phương trình RANS. Mức độ phức tạp của một mô hình dòng chảy rối được đánh giá bằng số lượng phương trình vi phân và số lượng các hằng số thực nghiệm thêm vào để mô tả dòng chảy rối. Căn cứ vào số lượng các yếu tố trên, mô hình dòng chảy rối được phân thành bốn mức độ cơ bản và theo thứ tự phức tạp theo Jaw và Chen^[6] như sau:

Mô hình đại số: Đây là mô hình đơn giản nhất của mô hình dòng chảy rối. Mô hình này dựa trên giả thiết của Boussinesq về hệ số nhớt rối μ_t (giá trị này khác với hệ số nhớt động lực học μ) để tính toán các giá trị ứng suất nhớt Reynolds. Đại diện cho mô hình này là mô hình chiều dài xáo trộn.

Mô hình một phương trình: Những mô hình này cũng vẫn dựa trên giả thiết của Boussinesq nhưng đã phát triển thêm một phương trình để mô tả đại lượng động năng rối $k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2} [(\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2]$. Mô hình của Prandtl & Kolmogorov hay mô hình của Spalart-Allmaras là những mô hình phổ biến thuộc dạng này.

Mô hình hai phương trình: Mô hình này gồm hai phương trình. Một phương trình mô tả đại lượng μ_t được thông qua đại lượng hệ số phân tán rối ε hay hệ số phân tán riêng ω và một phương trình mô tả đại lượng động năng rối k . Những phương trình này có thể được suy ra từ thực nghiệm hoặc cũng có thể nhận được từ lý thuyết. Hai mô hình $k - \varepsilon$ và mô hình $k - \omega$ là hai mô hình phổ biến trong mô hình rối với 2 phương trình. Ngoài ra còn có thể kể đến những mô hình khác thuộc dạng này như mô hình ứng suất đại số, mô hình ứng suất Reynolds không tuyến tính.v.v...

Mô hình bậc hai: Với mô hình này, tất cả các thành phần của ứng suất rối Reynolds được mô tả bằng các phương trình vi phân từng phần như mô hình ứng suất chuyển động, mô hình đại số ứng suất Reynolds.v.v...

1.4. Ứng dụng mô hình dòng chảy rối trong mô phỏng dòng chảy qua đập tràn thủy lợi

Đập tràn là một trong những công trình phổ biến trong hệ thống công trình thủy lợi. Nghiên cứu về dòng chảy qua đập tràn thường kết hợp giữa lý thuyết và thí nghiệm mô hình thủy lực. Việc nghiên cứu lý thuyết thường được áp dụng với các bài toán 2 chiều, điều kiện biên đơn giản và dòng chảy là ổn định. Thí nghiệm mô hình thủy lực có thể áp dụng cho bài toán 2 chiều và 3 chiều với điều kiện biên phức tạp. Tuy nhiên nó cũng có nhược điểm là chi phí cao, thời gian kéo dài và kết quả phụ thuộc nhiều vào chất lượng của thiết bị đo cũng như mức độ tương tự của mô hình. Trong một vài thập kỷ gần đây, việc ứng dụng mô hình toán và phương pháp số trong công trình thủy lợi đã được nghiên cứu nhiều như trong các tài liệu Savage và Johnson^[7,8], Angela^[9], Peter và Jin Yee-Chung^[10], Yang Xuejun^[11]... và đã cho những kết quả khả quan. Cùng với sự phát triển của công nghệ máy tính, các bài toán đã được giải từ sơ đồ đơn giản đến phức tạp, từ bài toán 2 chiều sang bài toán 3 chiều, từ việc mô phỏng dòng chảy là dòng chảy thể không nhớt đến các mô hình dòng chảy rối. Dòng chảy thực tế qua đập tràn là dòng chuyển tiếp dần dần từ dòng chảy êm sang dòng chảy xiết, ảnh hưởng bởi lực ly tâm do mặt tràn là cong, dòng chảy có bề mặt tự do... do vậy việc lựa chọn một mô hình phù hợp để có thể mô phỏng chính xác dòng chảy qua đập tràn cũng là một vấn đề

cần xem xét. Trong bài báo này, mô hình rối bậc 2 được sử dụng kết hợp với mô hình VOF (volume of fluid model) để mô phỏng dòng chảy tự do qua đập tràn. Kết quả của mô phỏng sẽ được kiểm tra so sánh về lưu lượng, đường mặt nước qua tràn và phân bố áp suất trên mặt tràn của đập tràn có mặt cắt dạng WES theo USACE^[12]. Bài toán sẽ được thực hiện với sơ đồ hai chiều (2-D).

2. MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY TỰ DO QU A ĐẬP TRÀN

2.1 Kích thước hình học và các thông số cơ bản

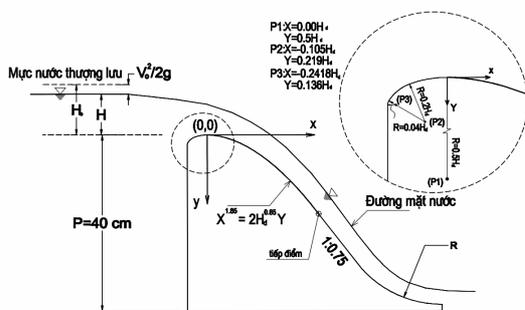
Đập tràn trong nghiên cứu này là đập tràn tiêu chuẩn có mặt cắt dạng WES với mái thượng lưu thẳng đứng, phương trình mô tả tọa độ của mặt cong tràn theo USACE^[12] như sau

$$\frac{Y}{H_d} = \frac{1}{K} \left(\frac{X}{H_d} \right)^n \quad \text{với } K=2 \text{ và } n=1.85 \quad (7)$$

H_d là cột nước thiết kế mặt cắt. X và Y là tọa độ của mặt cắt tràn và để đơn giản, trong bài báo này lấy $H_d = 25$ cm với chiều cao đập là $P = 35$ cm. Bài toán sẽ được xét với sơ đồ bài toán phẳng (2-D). Chi tiết mặt cắt tràn và các thông số xem hình 1. Để thuận tiện trong việc so sánh kết quả, tính toán sẽ được thực hiện với 3 trường hợp cột nước lần lượt là $H_o = (0.5-1.0-1.33)H_d$ tương ứng với $H_o = (12.5-25-33.25)$ m Tọa độ các điểm được dùng để tính toán và so sánh đường mặt nước, áp suất được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Tọa độ vị trí các điểm tính toán trên mặt tràn

Points	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X (cm)	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
Y (cm)	0.00	0.18	0.64	1.35	2.29	3.47	4.86	6.46	8.27	10.29	12.50



Hình 1. Mặt cắt đập tràn tiêu chuẩn dạng WES với $H_d = 25$ cm

2.2 Mô hình ứng suất Reynolds

Để tăng độ chính xác kết quả của bài toán, mô hình rối bậc hai sẽ được ứng dụng trong bài báo này. Một trong những mô hình thuộc loại này là mô hình ứng suất Reynolds. Theo Ansys^[13], mô hình ứng suất Reynolds (RSM) là một trong những mô hình phức tạp nhất trong các mô hình dòng chảy rối. Mô hình này xét đến ảnh hưởng của độ cong của dòng chảy, tính xoáy và sự biến đổi gấp của tenso vận tốc biến

dạng hơn so với mô hình một phương trình và hai phương trình. Vì vậy, RSM cho kết quả dự báo chính xác hơn trong những dòng chảy phức tạp. Hệ phương trình chuyển động của các thành phần ứng suất Reynolds $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ có thể nhận được từ các phương trình (2) được nhân với các thành phần vận tốc u'_i và sau đó dùng phương pháp trung bình của Reynolds. Chi tiết về cách biến đổi có thể xem trong Wilcox^[5]. Hệ phương trình RSM được viết tổng quát như sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} - P_{ij} - G_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} - F_{ij} + S_{source}$$

Trong đó $C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u'_k \overline{u'_i u'_j})$ gọi là đại lượng

đổi lưu, $D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j))$ gọi

là đại lượng khuếch tán rối,

$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right]$ gọi là đại lượng khuếch

tán phân tử, $P_{ij} = \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)$ gọi là

Stress production, $G_{ij} = \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})$ gọi

là Buoyancy Production, $\phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)$ gọi

là đại lượng biến dạng do áp suất,

$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$ gọi là đại lượng phân tán,

$F_{ij} = -2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{ikm})$ gọi là đại

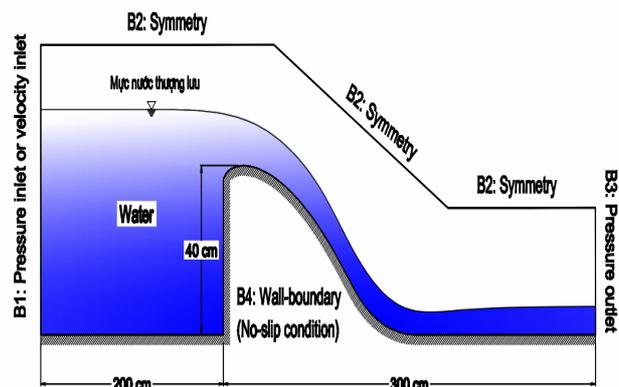
lượng do tính xoáy của dòng chảy gây ra. Số hạng cuối cùng là nguồn của dòng chảy và đó có thể là sự thêm vào hay giảm đi về áp suất, vận tốc, v.v... Chi tiết các đại lượng này có thể xem tại tài liệu Ansys^[13]. Hệ phương trình (8) kết hợp với hệ phương trình (4) và (5) trở thành một hệ đóng kín và các ẩn số sẽ được giải.

Nói chung để giải hệ phương trình trên, các phương trình vi phân sẽ được rời rạc thành các phương trình đại số và phương pháp số sẽ được áp dụng cùng với các sơ đồ giải khác nhau ví dụ như phương pháp thể tích hữu hạn, phần tử hữu hạn hay sai phân hữu hạn. Miền tính toán được chia thành các phần tử 2 chiều hay 3 chiều tùy

thuộc vào sơ đồ tính toán. Các ẩn số sẽ được giải tại các nút hoặc tâm của lưới phần tử tùy thuộc vào phương pháp tính.

2.3. Sơ đồ tính toán và điều kiện biên

Theo kết quả nghiên cứu của Dae Geun Kim^[15], ảnh hưởng của việc dùng phương pháp số với tỷ lệ phóng to hay thu nhỏ mô hình thì cũng không ảnh hưởng nhiều đến kết quả tính toán. Do vậy, việc áp dụng với các kích thước đã nêu ở phần trên (hình 1) của đập tràn là chấp nhận được trong quá trình mô phỏng. Chi tiết về điều kiện biên và các kích thước của mô hình được thể hiện trong hình 2. Việc tạo lưới phần tử và tính toán được thực hiện bởi phần mềm Ansys V12.0.6. Phương pháp số được dùng ở đây là thể tích hữu hạn và thuật toán PISO được sử dụng để giải hệ phương trình (4), (5) và (8) trên. Lưới phần tử là lưới tam giác và các tiêu chuẩn về chất lượng lưới phần tử như tỷ số biến lệch, tỷ số đặc trưng đều đảm bảo yêu cầu. Chi tiết có thể xem tại Ansys^[14].



Hình 2. Kích thước và các điều kiện biên cho mô hình

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

3.1. Lưu lượng qua đập tràn

Công thức tính toán lưu lượng qua đập tràn có mặt cắt dạng WES với mái thượng lưu thẳng đứng trong trường hợp không có co hẹp bên có thể được xác định theo công thức sau^[16]:

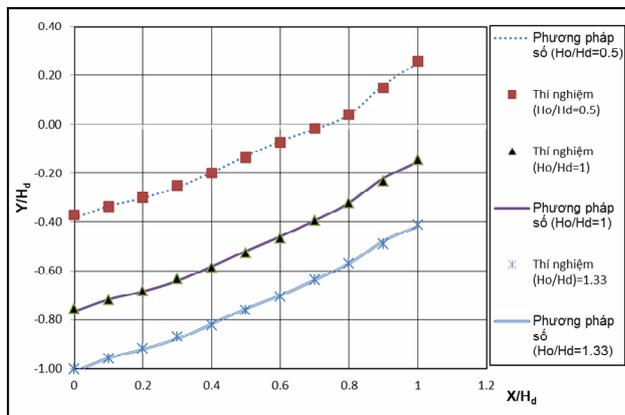
$$Q = mL\sqrt{2gH_o^{1.5}} \text{ với } m = m_o (H_o / H_d)^{0.16}$$

Trong đó: m là hệ số lưu lượng ứng với cột nước thực tế trên tràn, m_o là hệ số lưu lượng ứng với cột nước thiết kế H_d ($m_o = 0.4956$), L là chiều dài ngưỡng, H_o là cột nước toàn phần có kể đến

lưu tốc tới gần. Do bài toán là 2-D nên có thể coi $L=1m$. Kết quả tính toán từ công thức (9) và kết quả phương pháp số trong 3 trường hợp tính toán được thể hiện trong bảng 2 như sau:

Bảng 2. So sánh lưu lượng qua tràn theo công thức (9) và phương pháp số

H_o/H_d	Phương trình (9)		Phương pháp số	Sai số %
	m	Q (m ³ /s)		
0.5	0.443	0.087	0.0878	-1.25%
1	0.4956	0.274	0.275	-0.22%
1.33	0.519	0.441	0.4356	1.17%



Hình 3. Đường mặt nước qua tràn ứng với các trường hợp $H_o/H_d = (0.5 \div 1.0 \div 1.33)$

Các giá trị trong bảng và trên hình đều thể hiện các đại lượng không thứ nguyên X/H_d và Y_n/H_d . Trong đó X là tọa độ điểm tính toán, Y_n là cao độ mực nước lấy theo trục tọa độ như hình 1. Từ hình 3 và bảng 3, có thể thấy rằng sự

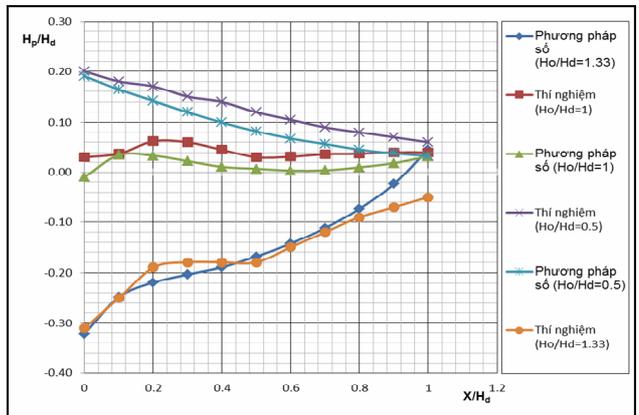
Bảng 3. So sánh đường mặt nước giữa phương pháp số và thí nghiệm

STT	X/H_d	$H_o/H_d = 0.5$		$H_o/H_d = 1.0$		$H_o/H_d = 1.33$	
		Y_n/H_d (ex)	Y_n/H_d (nume)	Y_n/H_d (ex)	Y_n/H_d (nume)	Y_n/H_d (ex)	Y_n/H_d (nume)
1	0	-0.371	-0.383	-0.755	-0.767	-1.000	-1.012
2	0.1	-0.336	-0.334	-0.718	-0.717	-0.960	-0.958
3	0.2	-0.300	-0.302	-0.681	-0.683	-0.919	-0.921
4	0.3	-0.250	-0.258	-0.634	-0.642	-0.870	-0.878
5	0.4	-0.200	-0.196	-0.586	-0.582	-0.821	-0.817
6	0.5	-0.138	-0.130	-0.526	-0.518	-0.763	-0.755
7	0.6	-0.075	-0.070	-0.465	-0.460	-0.705	-0.700
8	0.7	-0.018	-0.019	-0.393	-0.394	-0.637	-0.638

Từ bảng trên thấy rằng sai lệch giữa tính toán lưu lượng bằng lý thuyết và phương pháp số có sự sai khác không đáng kể, trong phạm vi cho phép.

3.2. Đường mặt nước qua đập tràn

Kết quả thí nghiệm đường mặt nước qua đập tràn tiêu chuẩn mặt cắt WES với 3 trường hợp tính toán được lấy từ USACE^[12] hay Ven Te Chow^[17]. Tọa độ của điểm thí nghiệm được lấy theo bảng 1. Trên cơ sở kết quả của quá trình mô phỏng, đường mặt nước theo phương pháp số cũng được lấy theo tọa độ các điểm trên. Sự so sánh đường mặt nước giữa thí nghiệm và phương pháp số được thể hiện trên hình 3 và bảng 3.



Hình 4. Áp suất trên mặt tràn ứng với các trường hợp $H_o/H_d = (0.5 \div 1.0 \div 1.33)$

sai khác nhau trong kết quả tính toán đường mặt nước giữa hai phương pháp có sự sai khác nhau rất nhỏ, chênh lệch là bé. Trong trường hợp cột nước thiết kế thực tế H_d bằng 20m thì sự sai số này cũng chỉ là trong khoảng 0.25m.

STT	X/H _d	H _o /H _d = 0.5		H _o /H _d = 1.0		H _o /H _d = 1.33	
		Y _n /H _d (ex)	Y _n /H _d (nume)	Y _n /H _d (ex)	Y _n /H _d (nume)	Y _n /H _d (ex)	Y _n /H _d (nume)
9	0.8	0.040	0.039	-0.320	-0.321	-0.569	-0.570
10	0.9	0.149	0.161	-0.233	-0.221	-0.490	-0.478
11	1	0.258	0.250	-0.145	-0.153	-0.411	-0.419

(ex : thí nghiệm, nume : phương pháp số)

3.3. Kết quả tính toán áp suất phân bố trên mặt tràn

Hình 4 thể hiện kết quả phân bố áp suất trên mặt tràn ứng với các trường hợp tính toán và thí nghiệm khác nhau. Có thể thấy rằng, so với đường mặt nước, kết quả phân bố áp suất có sự sai khác lớn hơn khi so sánh giữa kết quả thí nghiệm và phương pháp số. Trong các trường hợp cột nước trước tràn nhỏ ($H_o/H_d \leq 1$) thì kết quả thí nghiệm lớn hơn so với phương pháp số. Đối với trường hợp $H_o/H_d = 1.33$, hai kết quả này khá gần nhau, sự sai

khác là không đáng kể. Tuy nhiên, về mặt tổng thể, sự sai khác giữa 2 phương pháp không quá lớn, sai số vẫn nằm trong phạm vi cho phép. Nếu cột nước thiết kế H_d trong thực tế bằng 20m thì sự sai khác về áp suất giữa thí nghiệm và phương pháp số trong phạm vi 1m cột nước. Chi tiết về sự sai khác này được thể hiện trong bảng 4.

Các giá trị trong bảng và trên hình đều thể hiện các đại lượng không thứ nguyên X/H_d và H_p/H_d. Trong đó X là tọa độ điểm tính toán, H_p là chiều cao đo áp tại điểm tính toán.

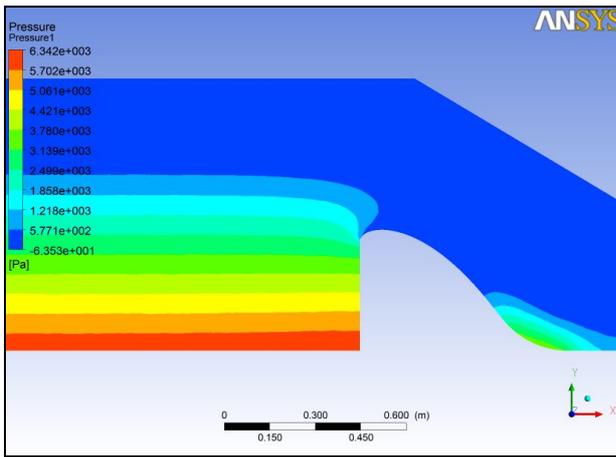
Bảng 4. So sánh áp suất trên mặt tràn giữa phương pháp số và thí nghiệm

STT	X/H _d	H _o /H _d = 0.5		H _o /H _d = 1.0		H _o /H _d = 1.33	
		H _p /H _d (ex)	H _p /H _d (nume)	H _p /H _d (ex)	H _p /H _d (nume)	H _p /H _d (ex)	H _p /H _d (nume)
1	0	0.200	0.190	0.030	-0.009	-0.310	-0.321
2	0.1	0.180	0.164	0.037	0.034	-0.250	-0.248
3	0.2	0.170	0.142	0.062	0.033	-0.190	-0.219
4	0.3	0.150	0.120	0.060	0.022	-0.180	-0.203
5	0.4	0.140	0.099	0.045	0.011	-0.180	-0.189
6	0.5	0.120	0.082	0.030	0.007	-0.180	-0.169
7	0.6	0.105	0.067	0.031	0.003	-0.150	-0.143
8	0.7	0.090	0.057	0.036	0.004	-0.120	-0.112
9	0.8	0.080	0.045	0.037	0.010	-0.090	-0.073
10	0.9	0.070	0.038	0.040	0.018	-0.070	-0.024
11	1	0.060	0.032	0.040	0.032	-0.050	0.046

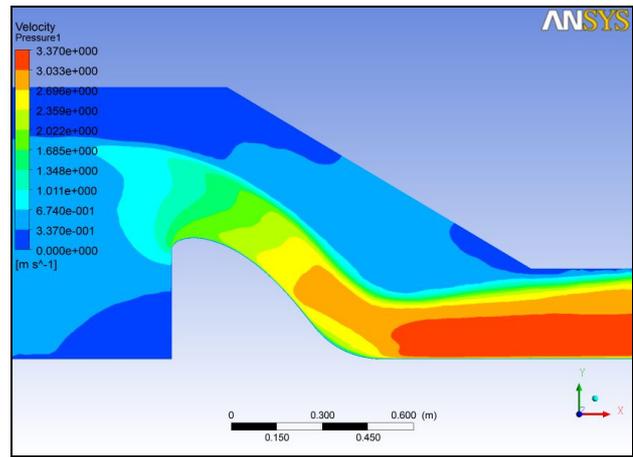
3.4. Một số kết quả trên toàn miền tính toán

Một trong những ưu điểm của phương pháp số đó là có thể cho kết quả tính toán phân bố lưu tốc, áp suất.v.v... trên toàn miền tính toán mà trong thực tế sẽ gặp khó khăn trong việc đo đạc tại phòng thí nghiệm do sự chính xác phụ thuộc vào thiết bị đo. Hình 5 và 6 thể hiện phân bố áp suất và lưu tốc trên toàn miền tính toán (hình 2). Căn

cứu vào các kết quả trên chúng ta sẽ có thể có được hình ảnh tổng thể về điều kiện làm việc thực tế của công trình, đặc biệt với những bài toán có sơ đồ và điều kiện biên phức tạp. Trên cơ sở đó sẽ có được sự đánh giá và điều chỉnh, đảm bảo mức độ an toàn cho công trình, giảm thiểu được thời gian và chi phí xây dựng mô hình vật lý, nâng cao hiệu quả thiết kế và quản lý vận hành công trình.



Hình 5. Phân bố áp suất tĩnh trường hợp $H_o/H_d = 1$



Hình 6. Phân bố lưu tốc trường hợp $H_o/H_d = 1$

4. NHẬN XÉT-KẾT LUẬN

4.1. Nhận xét

–Từ các kết quả tính toán trên, có thể nhận thấy rằng trong trường hợp dùng phương pháp số và mô hình dòng chảy rối mô phỏng dòng chảy tự do qua đập tràn cho kết quả khá sát với thí nghiệm mô hình về áp suất, lưu lượng, đường mặt nước và sai số trong phạm vi cho phép. Kết quả kiểm chứng trên nhằm nâng cao sự tin cậy trong việc sử dụng phương pháp số để mô phỏng dòng chảy tự do qua đập tràn nói riêng và trong công trình thủy lợi nói chung.

–Việc áp dụng mô hình dòng chảy rối cho phép người nghiên cứu mô tả được dòng chảy thực tế qua đập tràn cũng như sự biến đổi các thông số của dòng chảy rối theo chiều dòng chảy. Ngoài ra việc ứng dụng phương pháp số giúp chúng ta có thể tính toán được các thông số của dòng chảy như phân bố áp suất, lưu tốc, động năng rối.v.v...trên toàn miền tính toán mà trong thực tế sẽ gặp khó khăn trong việc đo đạc tại phòng thí nghiệm.

4.2. Kết luận

–Dòng chảy qua công trình thủy lợi thường là dòng chảy có độ rối cao, trạng thái chảy phức tạp và ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố đầu vào. Do vậy, việc áp dụng các mô hình dòng chảy rối trong tính toán là cần thiết, nó phản ánh được

các trạng thái chảy thực tế của dòng chảy hơn so với việc áp dụng giả thiết về dòng chảy thế. Tuy nhiên việc lựa chọn mô hình dòng chảy rối còn tùy thuộc vào điều kiện thực tế của bài toán nhằm giảm thiểu thời gian tính toán.

–Có thể ứng dụng phương pháp số với các mô hình dòng chảy rối vào việc mô phỏng dòng chảy tự do qua công trình thủy lợi nhằm giảm được chi phí về thời gian và tiền bạc so với việc xây dựng mô hình vật lý.

–Với việc phát triển của các mô hình toán cũng như khả năng mạnh mẽ của máy tính hiện nay thì việc tính toán cho các bài toán có sơ đồ ba chiều, điều kiện biên phức tạp, ảnh hưởng của yếu tố không gian.v.v...đều có thể giải quyết được. Tuy nhiên việc đánh giá được sự chính xác kết quả của mô phỏng cần phải có các kết quả thí nghiệm mô hình để kiểm chứng. Ngoài ra, đây cũng là công cụ hữu ích cho người nghiên cứu, kỹ sư thiết kế.v.v...trong việc nghiên cứu, thiết kế công trình. Người thiết kế có thể nhanh chóng thay đổi điều kiện biên nhằm tìm ra được phương án tối ưu cho công trình. Những nhà nghiên cứu có thể dựa trên các kết quả chi tiết về áp suất, lưu tốc, ứng suất rối.v.v...nhằm tìm ra những quy luật của dòng chảy khi mà việc đo đạc trong phòng thí nghiệm không đủ điều kiện thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Thanh Nam, Hoàng Đức Liên ,2000, *Phương pháp khối hữu hạn-Ứng dụng trong các bài toán thủy khí động lực*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.

2. White, Frank M, 2003, *Fluid mechanics-4th editor*, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York.
3. Hoàng Văn Quý, Lê Văn Thuận, Lê Bá Sơn, 2005, *Cơ học chất lỏng ứng dụng*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
4. Versteeg, H.K, and Malalasekera, W, 2007. *An introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method- 2nd edition*, Longman Scientific & Technical, Essex, United Kingdom.
5. Wilcox, David C, 2000, *Turbulence Modeling for CFD- 3rd edition*, DCW Industries Inc, California, USA.
6. Jaw S.Y, Chen, C.J, 1998, *Present Status of Second-Order Closure Turbulence Models I: Overview*, Journal Engineering Mechanic, số 12(5), pp.485-487
7. Bruce M.Savage, Michael C.Johnson, 2001, *Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model case Study*, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, số 127(8), tr. 640-648.
8. Michael C.Johnson, Bruce M.Savage, 2006, *Physical and numerical comparison of flow over Ogee spillway in presence of tailwater*, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, số 132(12), tr. 1353-1357.
9. Ferrari Angela, 2010, *SPH simulation of free surface flow over a sharp-crested weir*, Advances in Water Resources Journal, số 33, 270-276.
10. Peter M.S Jin Yee-Chung, 1993, *Depth averaged and moment equations for moderately shallow free surface flow*, Journal of Hydraulic Research, số 31(1), tr. 5-17.
11. Yang Xuejun, 2007, *3D Numerical modeling of the Turbulent flow in Hydraulic Structure*, The University of Illinois, Urbana - Champaign.
12. USACE, 1992, *EM 1110-2-1603 Hydraulic Design of Spillway*, Washington, DC, USA.
13. Ansys, Inc, 2009, *Ansys Theory Guide*, Ansys software V12.1.
14. Ansys, Inc 2009, *User Guide*, Ansys software V12.1.
15. Dae Geun Kim, Jae Hyun Park, 2005, *Analysis of Flow Structure over Ogee-Spillway in Consideration of Scale and Roughness Effects by Using CFD Model*, KSCE Journal of Civil Engineering, số 9(2), tr. 161-169.
16. Senturk F. ,1994, *Hydraulics of Dams and Reservoirs*, Colorado, USA: Water Resources Publications.
17. Ven Te Chow, 1959, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Companies, United States of America.

Abstract:

**THE APPLICATION OF TURBULENT MODEL TO SIMULATE
THE FREE FLOW OVER SPILLWAY**

In fact, the flow over spillway has a viscosity property and high turbulence, etc. To simulate exactly the flow over spillway, we must consider these quantities in numerical model. The recent development in computer software has advanced the use of computational fluid dynamics in analyzing flow over spillway or free surface flow. In this study, some turbulent models were presented, using Reynolds stresses model and finite volume method to simulate the flow over spillway with a standard WES profile. It is shown that there is a reasonable good agreement between numerical results and experimental ones.

Keywords: *turbulent flow, turbulent model, spillway, finite volume method.*

Người phản biện: PGS.TS. Nguyễn Thu Hiền

BBT nhận bài: 28/10/2013

Phản biện xong: 13/01/2014