

MÔ HÌNH SỐ THỦY ĐỘNG LỰC HỌC Ở CÁC VÙNG NƯỚC ĐỨNG DƯỚI TÁC DỤNG CỦA GIÓ

TS. Bùi Quốc Lập

Bộ môn Quản lý Môi trường - Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Thủy động lực học ở các vùng nước đứng như các hồ tự nhiên và hồ chứa, chủ yếu gây ra bởi lực cắt của gió tác động lên bề mặt hồ và một phần do sự trao đổi nhiệt giữa hồ và khí quyển thông qua bề mặt hồ, là một trong các vấn đề chủ yếu của khoa học môi trường nước. Nó liên quan chặt chẽ đến chất lượng nước ở các vùng nước đứng thông qua việc ảnh hưởng trực tiếp đến sự phân bố các thông số chất lượng nước trong hồ. Do đó, việc hiểu biết và tính toán được sự vận chuyển của nước trong các vùng nước đứng dưới tác dụng của gió có ý nghĩa quan trọng trong việc duy trì và bảo tồn chất lượng nước của các nguồn nước này. Với ý nghĩa đó, bài báo này sẽ trình bày một số kết quả ban đầu về việc xây dựng một mô hình số hai chiều để mô phỏng dòng thủy động lực học ở các vùng nước đứng dưới tác dụng trực tiếp của gió lên bề mặt hồ. Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu này, có thể nâng cấp để xây dựng mô hình cho việc mô phỏng chất lượng nước ở các vùng nước đứng.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Thủy động lực học ở các vùng nước đứng như các ao, hồ tự nhiên do không có sự trao đổi nước với các nguồn nước bên ngoài nên chủ yếu được gây ra bởi ứng suất cắt của gió ($\tau = C_d \rho_a U^2$) tác dụng lên mặt nước và bị ảnh hưởng một phần bởi sự chênh lệch tỷ trọng nước, các thực vật nước và các nhân tố khác. Do vậy, dòng tuần hoàn (circulation) trong các hồ rất phức tạp và chúng ta vẫn chưa thể giải quyết được tất cả các vấn đề liên quan đến chúng. Ví dụ, trong nghiên cứu này gió được xem là nhân tố chính gây ra dòng tuần hoàn ở các vùng nước đứng bởi vì dòng do gió gây ra ảnh hưởng một cách đáng kể đến sự phân bố các thông số chất lượng nước của chúng (Mori *et al.*, 2001). Ngoài ra, các thực vật nước trôi nổi cũng được xem là một trong những nhân tố quan trọng tác động lớn đến thủy động lực học của các hồ. Để hiểu biết sâu hơn về dòng tuần hoàn trong các vùng nước đứng và ảnh hưởng của nó đến sự phân bố các thông số chất lượng nước, việc áp dụng công cụ mô hình toán để mô phỏng diễn biến của chúng một cách định lượng có ý nghĩa khoa học và thực tiễn sâu sắc. Trên thế giới đã có một vài phần mềm mô hình hóa vấn đề này với mức độ chi tiết khác nhau đã được

thương mại hóa trên thị trường. Tuy nhiên, để mua được các phần mềm này thường là với chi phí rất đắt. Hơn nữa, việc vận hành cũng khá phức tạp.

Với mục đích tạo ra một phần mềm riêng cho việc nghiên cứu vấn đề này cũng như phục vụ cho công tác đào tạo, nghiên cứu này đã được thực hiện với giả thiết là dòng trong hồ là hòa trộn đều theo phương bên (laterally-averaged) để phát triển một mô hình hai chiều mô phỏng các dòng tuần hoàn này dưới tác dụng của gió.

Để giải các hệ phương trình cơ bản của mô hình, phương pháp sai phân theo thể tích hữu hạn (FVM) đã được áp dụng. Các phương trình sai phân được giải theo phương pháp số bằng cách áp dụng thuật toán SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) (Patankar, 1980) kết hợp với thuật toán TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) và được lập trình bằng ngôn ngữ Fortran 90 (Nyhoff and Leestma, 1997; 1999).

Mô hình đã được áp dụng vào việc mô phỏng dòng tuần hoàn trong một hồ giả định với hai kích bản không có và có sự hiện diện của thực vật nước trên một phần diện tích mặt hồ. Các kết quả mô phỏng ban đầu sẽ được trình bày dưới đây.

Các kết quả của nghiên cứu này sẽ tạo cơ sở quan trọng cho các bước tiếp sau trong việc mở rộng mô hình để mô phỏng diễn biến chất lượng nước ở các vùng nước đứng.

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

Trong đó u và w là các vận tốc theo phương ngang x và phương đứng z ; ρ là tỷ trọng của nước, p là áp suất của nước, g là gia tốc trọng trường, μ_x và μ_z là các hệ số nhớt xoáy theo phương ngang và đứng.

2.2. Phương pháp sai phân

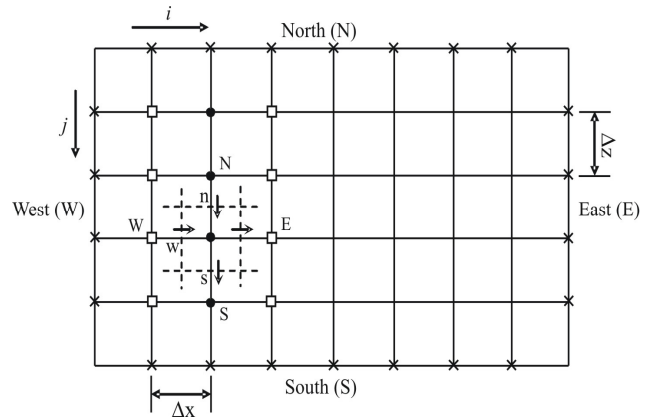
Để giải theo phương pháp số các trường vận tốc và áp suất, các phương trình (1) – (3) ở trên được sai phân hóa theo phương pháp thể tích hữu hạn. Phương pháp này lấy tích phân các phương trình (1) – (3) trên một thể tích có kiểm soát theo hai phương được xác định bởi các đường nét đứt trên một lưới sai phân so le (Patankar, 1980) như được chỉ ra trong Hình. 1.

Trong lưới so le, phạm vi tính toán được chia thành các ô có kiểm soát bởi các đường liền. Áp suất được đặt ở các giao điểm của các đường liền của lưới. Những nút này được biểu thị bằng các ký tự P, W, E, N, và S. Các thành phần vận tốc u được đặt ở các mặt ô phía đông và phía tây của ô tính được ký hiệu là e và w . Các thành

2.1. Các phương trình cơ bản

Trong nghiên cứu này, các mô phỏng số được giải quyết đối với trường hợp dòng chảy được giả thiết là hòa trộn đều theo phương bên, hai chiều và không ổn định, tuân theo một hệ các phương trình vi phân sau:

phần vận tốc w được đặt ở các mặt ô phía bắc và nam của ô tính được ký hiệu là n và s . Δx và Δz tương ứng là chiều dài và chiều sâu của ô tính.



Hình 1. Lưới so le mô tả ô kiểm soát với các thông số dòng chảy cho trường hợp hai hướng

Sau khi sai phân, phương trình liên tục được sai phân hóa trở thành:

$$[(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta z + [(\rho w)_s - (\rho w)_n] \Delta x = 0 \quad (4)$$

Phương trình mô men u được sai phân hóa trở thành

$$a_e^{(u)} u_e = \sum a_{nb}^{(u)} u_{nb} + b^{(u)} + (p_P - p_E) \Delta z \quad (5)$$

$$\text{Với: } a_e^{(u)} = \frac{\rho_e^o \Delta x \Delta z}{\Delta t} + a_E^{(u)} + a_W^{(u)} + a_S^{(u)} + a_N^{(u)}, \quad b^{(u)} = u_e^o \frac{\rho_e^o \Delta x \Delta z}{\Delta t}$$

Và phương trình mô men w được sai phân thành :

$$a_n^{(w)} w_n = \sum a_{nb}^{(w)} w_{nb} + b^{(w)} + (p_N - p_P) \Delta x \quad (6)$$

$$\text{Với: } a_n^{(w)} = \frac{\rho_n^o \Delta x \Delta z}{\Delta t} + a_E^{(w)} + a_W^{(w)} + a_S^{(w)} + a_N^{(w)}, \quad b^{(w)} = -\rho_n g \Delta x \Delta z + \frac{w_n^o \rho_n^o \Delta x \Delta z}{\Delta t}$$

Trong đó $\rho_e^o, \rho_n^o, u_e^o$, and w_n^o chỉ những giá trị đã biết ở thời điểm t , trong khi tất cả các giá trị khác là những giá trị chưa biết ở thời điểm $t+\Delta t$. Các hệ số với chỉ số trên (u) và (w) là các hệ số tương ứng cho u và w . $a_{nb}^{(u)}$ và $a_{nb}^{(w)}$ chỉ các hệ số bên cạnh $a_E^{(u)}, a_W^{(u)}, a_N^{(u)}, a_S^{(u)}, a_E^{(w)}, a_W^{(w)}, a_N^{(w)}$, và $a_S^{(w)}$, đại diện cho ảnh hưởng kết hợp của sự khuếch tán – đối lưu tại các mặt của các ô vận tốc u và w . Giá trị các hệ số này được tính dựa trên hàm mũ (Patankar, 1980). Các thành phần vận tốc u_{nb} và w_{nb} là các thành phần được đặt ở các nút xung quanh bên ngoài ô kiểm soát. p_E, p_W, p_N , và p_S chỉ áp suất đặt ở các mặt đông, tây, bắc và nam của ô kiểm soát

2.3. Các điều kiện biên

Các điều kiện biên ở đáy và các thành bên hồ được áp dụng điều kiện biên no-slip ($u = w = 0$).

Tại mặt nước hồ, w được đặt bằng 0, và u được tính từ quan hệ sau (Cole and Buchak, 1995):

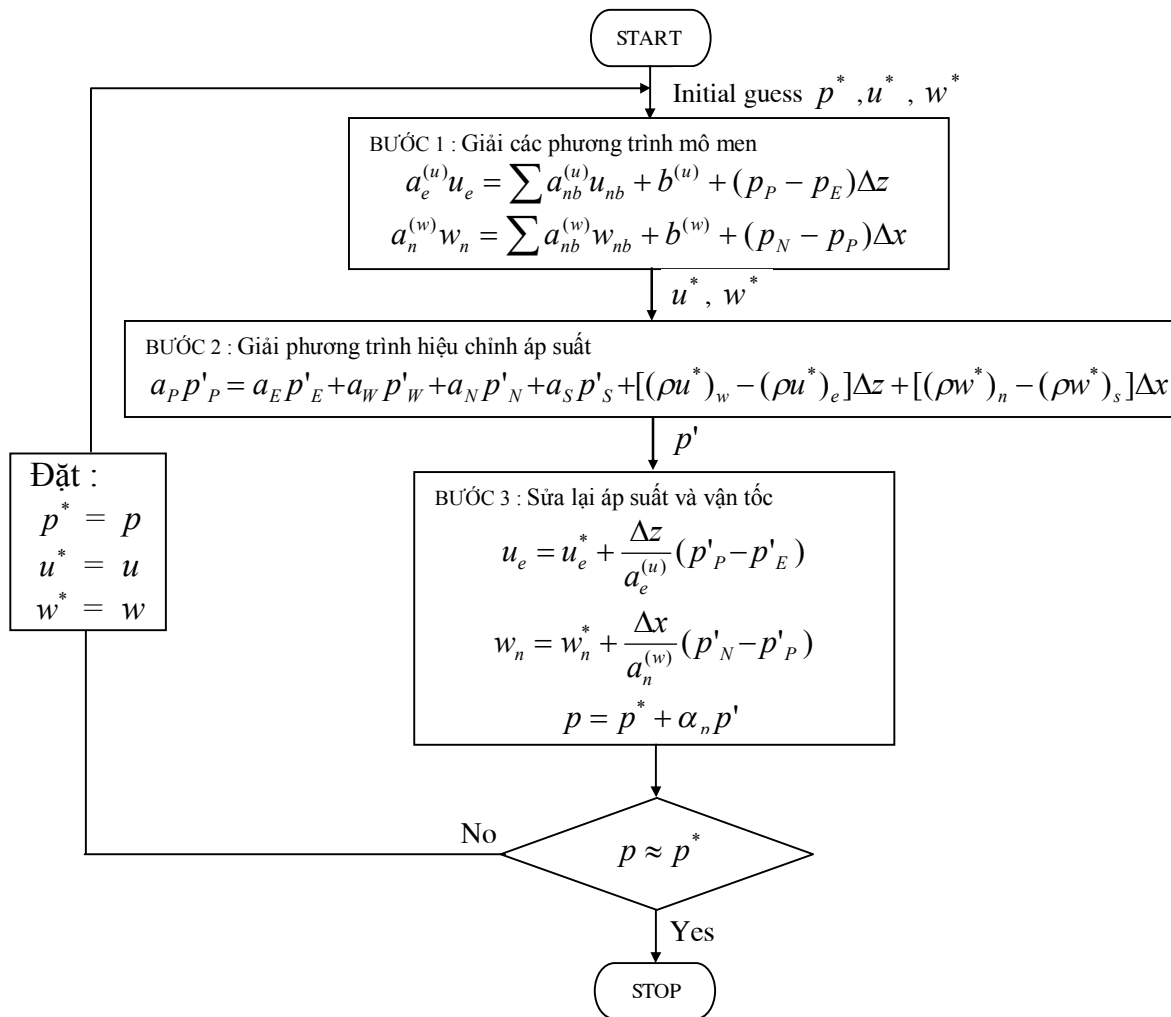
$$\tau_s = C_D \rho_a U^2 = C_D \rho_w u_s^2 \quad (7)$$

Trong đó τ_s là ứng suất cắt bề mặt tại mặt nước, C_D là hệ số kéo, ρ_a tỷ trọng không khí, U là vận tốc gió ở điểm có chiều cao cách mặt nước 10 m, ρ_w là tỷ trọng của nước, u_s là vận tốc bề mặt trong nước. Từ công thức (7), u_s được tính như sau:

$$u_s = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \times U \approx 0.03U \quad (8)$$

Công thức (8) được biết đến như là “ luật 3% ” (Cole and Buchak, 1995).

2.4. Thuật toán số



Hình 2. Sơ đồ thuật toán SIMPLE

Để giải các phương trình (4) - (6), thuật toán SIMPLE (Patankar, 1980) mà về cơ bản dựa trên quá trình thử - hiệu chỉnh trong việc tính thành phần áp suất trên lưới so le ở trên, được áp dụng. Hình 2 tóm tắt sơ đồ thuật toán SIMPLE mà sẽ được áp dụng trong mỗi bước tính.

Trong Hình 2, α_p là hệ số giãn dưới (under-relaxation) của áp suất. Các ký hiệu còn lại đã được giải thích ở trên.

Thuật toán SIMPLE được mở rộng cho việc tính toán theo thời gian để bao gồm thời đoạn tính toán như mong muốn. Biểu đồ cho việc tính toán các dòng không ổn định được chỉ ra ở Hình 3.

Trong Hình 3, t là thời gian, Δt là bước thời gian tính toán, và t_{\max} là thời đoạn tính toán mong muốn. Các ký hiệu khác đã được giải thích ở trên.

Thuật toán SIMPLE được thực hiện với sự trợ giúp của thuật toán TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) hay còn gọi là thuật toán Thomas, vốn đã trở nên quen thuộc đối với việc xử lý hệ các phương trình ba đường chéo (Anderson, 1995).

2.5. Số liệu đầu vào cho tính toán

Để tính toán trường vận tốc dòng chảy do gió gây ra, ta phải thu thập số liệu về tốc độ gió. Ngoài ra, cũng phải biết số liệu về kích thước hồ như chiều sâu trung bình của hồ (H) và chiều dài trung bình của hồ (L).

Trong mô hình này, hệ số nhớt xoáy theo chiều đứng (μ_z) được tính từ công thức sau (Bengtsson, 1973) :

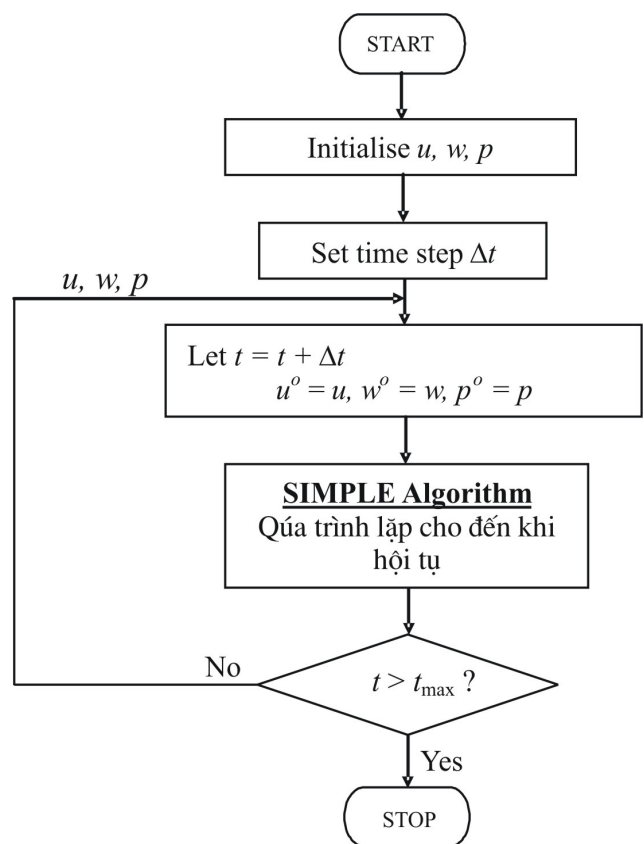
$$\mu_z = \rho chU \quad (27)$$

Trong đó h là chiều sâu trung bình hồ, c là hằng số $= 2 \times 10^{-5}$, các ký hiệu khác đã giải thích ở trên.

Hệ số nhớt xoáy theo phương ngang (μ_x) được xác định theo hệ số nhớt xoáy theo phương đứng : $\mu_x = E \cdot \mu_z$, với E là hằng số, tham khảo theo các tài liệu nghiên cứu trước đây $E \approx 100$.

2.6. Áp dụng mô hình và các kết quả ban đầu

Trong nghiên cứu này chúng ta giả định có một hồ nhỏ tự nhiên (không có sự trao đổi nước với bên ngoài) có chiều sâu trung bình là 2.2m, chiều rộng trung bình hồ là 80 m. Giả thiết vận tốc gió ở cách mặt hồ 10 m trong thời đoạn tính toán là 2,0 m/s. Trong mặt cắt đứng tính toán của hồ, chiều rộng hồ được chia thành các đoạn nhỏ có chiều dài 2 m và độ sâu hồ được chia thành các phân đoạn 0.2 m để tạo nên các ô có kích thước (2 m \times 0.2 m). Phạm vi tính toán được bố trí trên một lưới so le như đã minh họa trong Hình 1 ở trên. Bước thời gian tính (Δt) được chọn là 0,5 giờ.

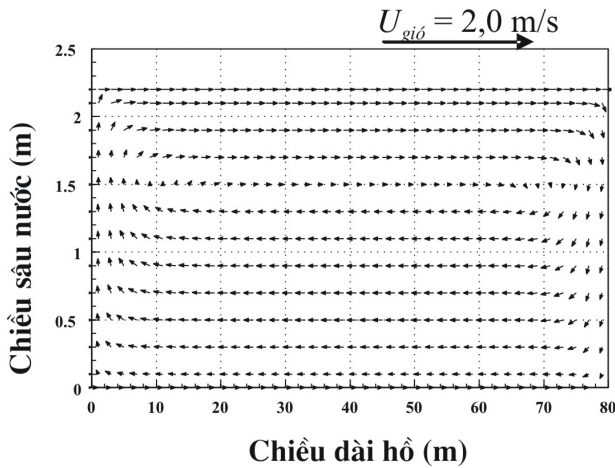


Hình 3. Sơ đồ thuật toán cho việc tính dòng không ổn định với việc áp dụng thuật toán SIMPLE

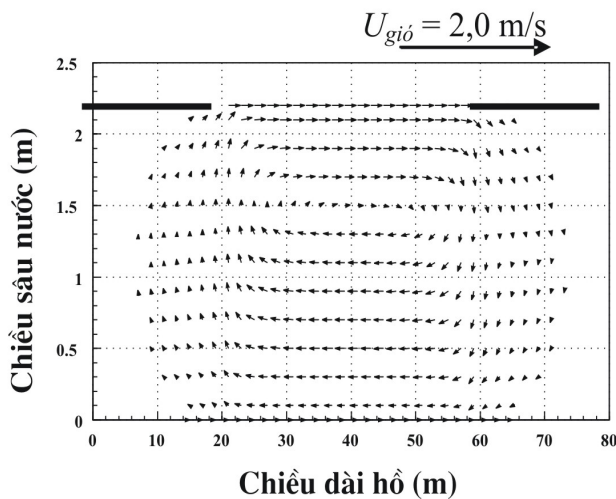
Ở các vùng nước đứng, sự phát triển quá mức của các thực vật nước trôi nổi thường xảy ra vào mùa hè. Do đó, các tính toán mô phỏng được thực hiện trong cả hai trường hợp là không có và có thực vật nước trên mặt hồ. Trong nghiên

cứu này, đối với trường hợp có thực vật nước, giả sử rằng nó che phủ 50 % diện tích mặt hồ và phát triển từ hai bên bờ hồ hướng ra giữa hồ.

Kết quả của các trường hợp tính toán mô phỏng được hiển thị dưới dạng đồ họa bằng phần mềm Stanford Graphics như trình bày trong các Hình 4 & 5.



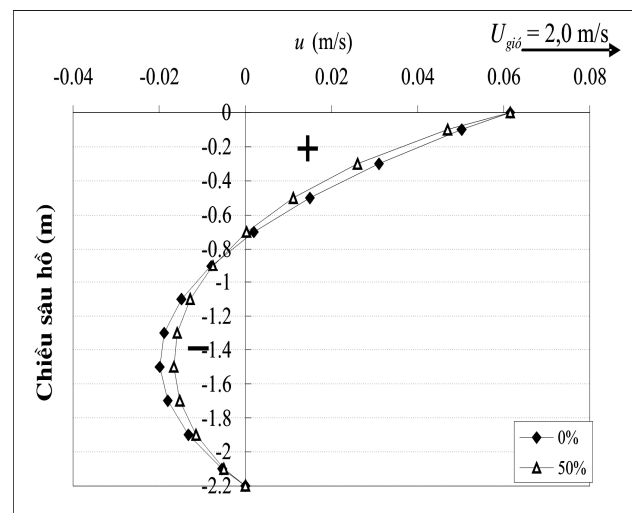
Hình 4. Trường vận tốc dòng chảy do gió gây ra trong trường hợp không có thực vật nước trên bề mặt hồ



Hình 5. Trường vận tốc dòng chảy trong trường hợp có 50 % diện tích mặt hồ bị che phủ bởi thực vật nước.

Hình 4 & 5 mô tả một cách trực quan dòng tuần hoàn do gió gây ra trong hồ với trường hợp không có và có 50 % diện tích mặt hồ bị che phủ bởi thực vật nước trôi nổi (ví dụ, bèo tây).

Nhìn vào kết quả ta có thể thấy rằng gió có thể gây ra dòng tuần hoàn của hồ bằng cách gây ra sự pha trộn nước ở các lớp bề mặt vào các lớp bên dưới. Ở các vùng nước đứng, các vấn đề như sự phân tầng nhiệt vào mùa hè, sự thiếu ô xy hòa tan ở lớp nước đáy hồ thường dễ xảy ra. Do vậy, quá trình vật lý này (circulation) rất quan trọng vì nó giúp thu hẹp sự chênh lệch nồng độ của các thông số chất lượng nước giữa các lớp nước bên trên và bên dưới hồ. Nói cách khác, nó có ảnh hưởng tích cực lên sự phân bố chất lượng nước. Có thể thấy rõ ràng, thực vật nước trôi nổi có ảnh hưởng đáng kể đến dạng chuyển động của dòng do gió gây ra. Từ Hình 4 ta thấy rằng dòng tuần hoàn (circulation) trong hồ bao phủ gần như toàn bộ mặt cắt hồ khi mà mặt hồ hoàn toàn không có thực vật nước che phủ. Khi có thực vật nước che phủ 50 % diện tích mặt hồ, khu vực tuần hoàn bị thu hẹp lại, tạo ra các vùng nước ở bên dưới diện tích bị thực vật nước che phủ không được tham gia vào quá trình tuần hoàn (circulation) (Hình 5). Do không được tham gia vào quá trình tuần hoàn nên các vấn đề chất lượng nước có thể xuất hiện ở các vùng này như hiện tượng thiếu ô xy hòa tan trong nước mà có thể kéo theo hàng loạt vấn đề chất lượng nước khác.



Hình 6. Phân bố thành phần vận tốc u theo chiều sâu hồ trong hai trường hợp không có và có 50 % diện tích mặt hồ bị che phủ bởi thực vật nước

Hình 6 chỉ ra sự thay đổi về phân bố theo chiều đứng thành phần vận tốc u ở giữa hồ tương ứng với trường hợp không có và có sự che phủ 50 % của thực vật nước ở mặt hồ. Kết quả này cho thấy rằng trong trường hợp có sự che phủ của thực vật nước, tốc độ của dòng tuần hoàn nhỏ hơn đối với trường hợp không có thực vật nước che phủ là do thực vật nước đã thu hẹp diện tích mặt thoáng hồ, làm giảm đi tổng lực gió tác động lên hồ. Về mối quan hệ giữa diện tích mặt hồ bị thực vật nước che phủ với tốc độ tuần hoàn nước trong hồ sẽ được tiếp tục xem xét trong các nghiên cứu sau.

3. KẾT LUẬN

Từ các kết quả mô phỏng được trình bày ở trên, có thể rút ra một vài kết luận như sau:

- Ở các vùng nước đứng như các ao, hồ tự nhiên khi mà không có sự trao đổi nước đáng kể với bên ngoài, gió đóng một vai trò quan trọng trong sự tuần hoàn (circulation) của chúng bằng cách pha trộn các lớp nước bên trên xuống các lớp nước dưới. Tốc độ gió càng cao thì khả năng pha trộn càng tăng.

- Thực vật nước trôi nổi có ảnh hưởng đáng kể lên cả dạng và tốc độ của dòng do gió gây ra ở trong các vùng nước đứng thông

qua việc thu hẹp diện tích mặt nước tự nhiên để làm giảm đi tổng lực của gió. Dòng tuần hoàn do gió gây ra đến lượt nó có thể lại ảnh hưởng đến chất lượng nước thông qua ảnh hưởng đến sự phân bố các thông số chất lượng nước.

- Khi thực vật nước phát triển che phủ bề mặt hồ, chúng có thể thu hẹp vùng tuần hoàn (circulation) của hồ, tạo ra các vùng không tham gia vào quá trình tuần hoàn do gió gây ra ở bên dưới vùng bị thực vật nước che phủ. Điều này có thể gây ra các vấn đề chất lượng nước như là sự thiếu ô xy hòa tan trong các vùng này.

- Trong mô hình này, các hệ số nhớt xoáy (μ_x và μ_z) được lấy trung bình cho cả hồ. Để kết quả tính được sát với thực tế hơn có thể đầu tư nghiên cứu để cải tiến mô hình bằng cách kết hợp với mô hình $k - \varepsilon$. Hơn nữa, trên cơ sở của mô hình này có thể mở rộng để tính đến cả sự xáo trộn trong hồ do sự trao đổi nhiệt giữa hồ và khí quyển (thermal disturbance) thông qua bề mặt hồ cũng như việc nâng cấp mô hình bằng cách bổ sung thêm thành phần tính chất lượng nước để mô hình có thể mô phỏng được diễn biến chất lượng nước ở các vùng nước đứng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Anderson JD (1995) Computational fluid dynamics. McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 150-442
- [2]. Bengtsson L (1973) Conclusions about turbulent exchange coefficients from model studies. International Symposium Hydrology of reservoirs, Helsinki, IAHS Publ. No. 109, pp. 306-312
- [3]. Cole TM, Buchak EM (1995) CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 2.0: Users Manual, Instruction Report EL-95-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, pp. 19-25
- [4]. Chapra SC (1997) Surface water-quality modeling. McGraw-Hill, New York, pp. 26-650
- Mori K, Shikasho S, Hiramatsu K (2001) Wind-induced flow in a closed-water area with discrete wind shear. Fisheries Engineering 37(3), pp.195-201
- [5]. Nyhoff L, Leestma S (1997) Fortran 90 for Engineer and Scientists. Prentice Hall, America, pp. 30-46
- [6]. Nyhoff L, Leestma S (1999) Introduction to Fortran 90. Prentice Hall, America, pp. 15-196
- [7]. Patankar SV (1980) Numerical heat transfer and fluid flow. McGraw-Hill, New York, pp. 41-143

[8]. Sündermann J (1979) Numerical modelling of circulation in reservoirs. In Walter HG, Clifford HM (ed) Hydrodynamics of reservoirs. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, pp.1-5

[9]. Versteeg HK, Malalasekera W (1995) An introduction to computational fluid dynamics. Longman House, Burnt Mill, Harlow, pp. 135-159

Abstract

NUMERICAL MODELING OF HYDRODYNAMICS IN CLOSED WATER BODIES UNDER THE ACTING OF WIND

Dr. Bui Quoc Lap

*Division of Environmental Management
Water Resources University*

Hydrodynamics in closed water bodies such as lakes and reservoirs, which is primarily caused by wind shear acting on the water surface, and partly affected by thermal exchange between the water bodies and atmosphere is one of the key issues in the field of water environment. It is closely relevant to water quality through influencing the distribution of water quality variables in the water bodies. Therefore, the knowledge and calculation of water movements in closed water bodies in response to winds blowing over the water surface is great of significance in maintaining and conserving their water quality in good condition. With that significance, this paper will present primary results regarding to development of a two-dimensional numerical model for simulating the wind-induced flow in closed water bodies. On the basic of this research, the model can be extended to simulate water quality in this water bodies.