

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH TOÁN SỐ NGHIÊN CỨU SỰ LAN TRUYỀN CÁC CHẤT Ô NHIỄM TỪ BÈ CÁ TRÊN SÔNG HẬU ĐOẠN TP. LONG XUYÊN

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTANT TRANSPORT FROM FLOATING CAGES IN HAU RIVER

Trần Thị Ngọc Triều và Lê Song Giang

Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. HCM

BẢN TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu một mô hình tính toán lan truyền chất 3 chiều trong sông và ứng dụng nghiên cứu ô nhiễm do nuôi cá bè trên sông Hậu. Trường vận tốc 3 chiều được tính bằng cách phân bố theo quy luật logarit lùi giải vận tốc 2 chiều trung bình chiều sâu, trong khi lan truyền chất ô nhiễm được giải từ phương trình vận tải 3 chiều đầy đủ. Phương trình chuyển động 2 chiều được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn theo sơ đồ ADI của Ponce-Yabusaki. Phương trình tải chất 3 chiều được giải theo phương pháp thể tích hữu hạn, sơ đồ ADI của Douglas – Gunn trong tọa độ “sigma”. Mô hình được kiểm chứng với lời giải giải tích. Một số kết quả ban đầu mô phỏng lan truyền ô nhiễm ở làng nuôi cá bè Mỹ Hoà Hưng, Long Xuyên cũng được trình bày.

ABSTRACT

The paper presented a 3D model for substance transport in river and its application for simulation of pollutant transport in Hau river due to floating cages raising . 3D flow-field was solved by logarithmic distributing 2D flow-field of averaged height. Pollutant transport are calculated by solving its full 3D transport equation. The 2D continuum and momentum equations was solved by finited difference method with ADI scheme of Ponce-Yabusaki. The 3D transport equation was solved by finited volume method with ADI scheme of Douglas – Gunn in “sigma” transformed co-ordinate. The model was tested over analytical solution. Some preliminary results of simulation for pollutant transport of My Hoa Hung floating cages area are also presented.

1. Giới thiệu:

Hiện nay việc nuôi cá bè ở đồng bằng sông Cửu long rất phát triển. Tuy nhiên, nó diễn ra một cách tự phát. Mật độ và vị trí neo đậu chưa đ được bố trí sắp xếp một cách khoa học nên đã ảnh hưởng đến chất lượng nguồn nước. Đánh giá được diễn biến môi trường sẽ là cơ sở để quy hoạch và xây dựng kế hoạch phát triển việc nuôi cá bè, bảo đảm sự cân bằng hài hoà các nguồn lợi, bảo vệ bền vững tài nguyên thiên nhiên. Vì vậy việc xây dựng một mô hình tính toán mô phỏng lan truyền chất trong sông là việc cần thiết. Bài báo sẽ giới thiệu 1 mô hình toán có thể đáp ứng yêu cầu này. Trong mô hình, trường vận tốc được giải từ phương trình

chuyển động 2 chiều bằng phương pháp sai phân hữu hạn theo sơ đồ ADI của Ponce-Yabusaki. Trong khi đó lan truyền chất ô nhiễm được giải từ phương trình vận tải 3 chiều đầy đủ theo phương pháp thể tích hữu hạn, sơ đồ ADI của Douglas – Gunn trong tọa độ “sigma”. Mô hình được kiểm chứng với lời giải giải tích. Một số kết quả ban đầu mô phỏng lan truyền ô nhiễm ở làng nuôi cá bè Mỹ Hoà Hưng, Long Xuyên cũng được trình bày.



H1: Dây bè nuôi cá

2. Mô hình toán số:

2.1 Phương trình cơ bản:

Vận tốc được giải từ phương trình dòng chảy 2 chiều nước nông:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = q_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Sau đó được phân bố lại theo chiều sâu theo quy luật logarit:

$$u(x, y, z) = \frac{U}{\left[\frac{z_0}{h} - 1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

$$v(x, y, z) = \frac{V}{\left[\frac{z_0}{h} - 1 + \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - \omega_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_c \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_c \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S \quad (6)$$

Trong đó:

- D – độ sâu
- z_0 – cao trình mà ở đó vận tốc bằng 0
- C – nồng độ chất bẩn.

- u, v và w – 3 thành phần vận tốc
- ω – vận tốc theo phương đứng trong hệ tọa độ sigma
- A_c, K_c – các hệ số khuếch tán rối trên các phương ngang và phương đứng
- ω_s – độ thô thủy lực.
- S – số hạng nguồn.
- U, V – 2 thành phần vận tốc trung bình chiều sâu theo phương x và y tương ứng.
- t – thời gian
- g – gia tốc trọng trường
- η – cao trình mặt nước
- z_b – cao độ đáy.
- h – chiều sâu nước ($h = \eta - z_b$)
- ρ – khối lượng riêng của nước
- q_s – lưu lượng nguồn và các thành phần vận tốc của nó

F_x, F_y – ngoại lực trên các phương x, y
 Phương trình (6) được giải với điều kiện biên
 - Biên mặt thoáng: không có thông lượng chất tải qua mặt thoáng:

$$\left[\omega_s C + K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{\eta} = 0 \quad (7)$$

- Biên dưới của tầng lơ lửng: tại mặt phân cách với tầng đáy: thông lượng chất tải ngang qua ngang qua mặt phân cách bằng:

$$\left[\omega_s C + K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z_b+a} = D_b - E_b \quad (8)$$

Với D_b – lượng thức ăn dư, chất thải lắng xuống đáy; E_b – lượng thức ăn dư, chất thải bốc lên từ đáy. Theo Van Rijn (1987) chúng được tính:

$$D_b - E_b = \omega_s (C_b - C_{b*}) \quad (9a)$$

$$D_b - E_b = \omega_s C_b \quad (9b)$$

Với C_b và C_{b*} là nồng độ hiện hành và nồng độ bão hòa tại đáy. Có một số công thức thực nghiệm cho phép xác định C_{b*} trong trường hợp bùn cát lơ lửng. Tuy nhiên trong nghiên cứu này, hạt lơ lửng là thức ăn dư của cá và chưa có một nghiên cứu riêng nào cho vấn đề này. Do vậy, ở nghiên cứu ban đầu, chúng tôi tạm lấy $C_{b*} = 0$. Khi thay (9) vào (8), ta được biểu thức mới:

$$\left[\omega_s C + K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{z_b+a} = \omega_s C_b \quad (10)$$

- Trên biên kín bao quanh: thông lượng chất bẩn qua biên bằng 0.

- Trên biên hở bao quanh: nếu dòng chảy đi vào miền tính, điều kiện biên sẽ là nồng độ chất tải

nếu dòng chảy đi ra khỏi miền tính, điều kiện không có gradient nồng độ được sử dụng.

2.2 Mô hình rối.

Trong dòng chảy 3 chiều sông, biển, do sự khác biệt rất lớn giữa các đại lượng đặc trưng cho chuyển động theo phương ngang và phương thẳng đứng nên độ nhớt rối cho 2 chuyển động này thường được làm theo các mô hình riêng rẽ.

Hệ số khuếch tán rối A_C lấy bằng độ nhớt rối trên phương ngang A_M được tính theo mô hình Smagorinsky:

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Với hệ số C nằm trong khoảng 0,01 – 0,5 và thường được lấy bằng 0,10.

Hệ số khuếch tán rối K_C lấy bằng độ nhớt rối theo phương đứng K_M được tính bằng các mô hình chiều dài xáo trộn Prandtl-Kolmogorov (1942):

$$K_M = C'_\mu L \sqrt{k} \quad (12)$$

Trong đó C'_μ - hằng số mô hình; L - chiều dài xáo trộn; k - động năng rối.

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} \left[(u_*^b)^2 (\zeta) + (u_*^s)^2 (1 - \zeta) \right] \quad (13)$$

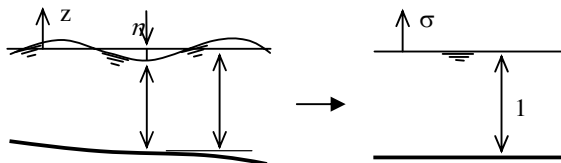
$$L = \kappa h (1 - \zeta) \sqrt{\zeta} \quad (14)$$

Với $c_\mu = 0.09$ - hằng số mô hình; $\kappa = 0.4$ - hằng số Karman; u_*^s - vận tốc ma sát trên mặt thoáng; u_*^b - vận tốc ma sát đáy và $\zeta = (\eta - z)/(\eta + h)$ - độ sâu tương đối.

2.3 Phương pháp giải:

Các phương trình được đưa về tọa độ sigma với phép biến đổi

$$\sigma = \frac{z - \eta}{h + \eta} \quad (15)$$



H2: Biến đổi tọa độ

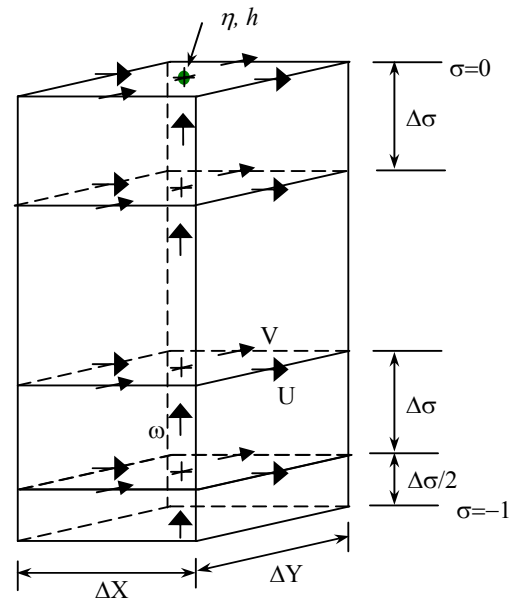
Trong hệ tọa độ này miền tính với mặt thoáng và mặt đáy cong trở thành miền chữ nhật có chiều sâu bằng 1, trong đó mặt thoáng ở tọa độ $\sigma = 0$ và mặt đáy ở tọa độ $\sigma = -1$ (Hình 2). Nó cho phép mô tả chính xác hơn dòng chảy và quá trình tải chất ở các khu vực gần mặt thoáng và sát đáy.

Phương trình tải chất (6) được giải theo phương pháp thể tích hữu hạn trên lưới so le vuông góc. Trước tiên, phương trình (6) được đưa về tọa độ sigma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[u q_C - D A_C \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_C}{D} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[v q_C - D A_C \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_C}{D} \right) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\left(\omega - \frac{\omega_s}{D} \right) q_C - \frac{K_C}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{q_C}{D} \right) \right] = D.S \quad (16) \end{aligned}$$

Với $q_C = D.C$ - lưu lượng chất tải đơn vị

Sau khi xác định được mặt thoáng, và các thành phần vận tốc, nồng độ các chất tải sẽ được tính toán từ phương trình (16) theo sơ đồ



H3: Vị trí các biến trên lưới tính

ADI của Douglas – Gunn. Các số hạng đối lưu của phương trình vận tải các chất được nội suy theo sơ đồ trung tâm. Do đặc tính truyền sóng khác nhau nên bước thời gian giải các phương trình vận tải được lấy lớn hơn nhiều lần so với các phương trình động lượng.

3. Kết quả tính toán và phân tích:

3.1 Mô hình được kiểm tra bằng lời giải giải tích

Trong trường dòng chảy với các thành phần vận tốc $W = V = 0$ và $U = \text{const}$, bỏ qua khuếch tán theo phương trục x, lời giải chính xác của phương trình vận tải (6) cho nguồn điểm liên tục với công suất M đặt tại tọa độ $(x = 0, y = 0, z = H)$ là:

$$C(x,y,z) = \frac{M}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \text{EXP} \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \text{EXP} \left[-\frac{(z - H + w_s x / U)^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (16)$$

Trong đó σ_y và σ_z là các hệ số khuếch tán và chỉ biến thiên trên trục x:

$$\sigma_y^2 = \frac{2A_H}{U} x, \quad \sigma_z^2 = \frac{2K_C}{U} x$$

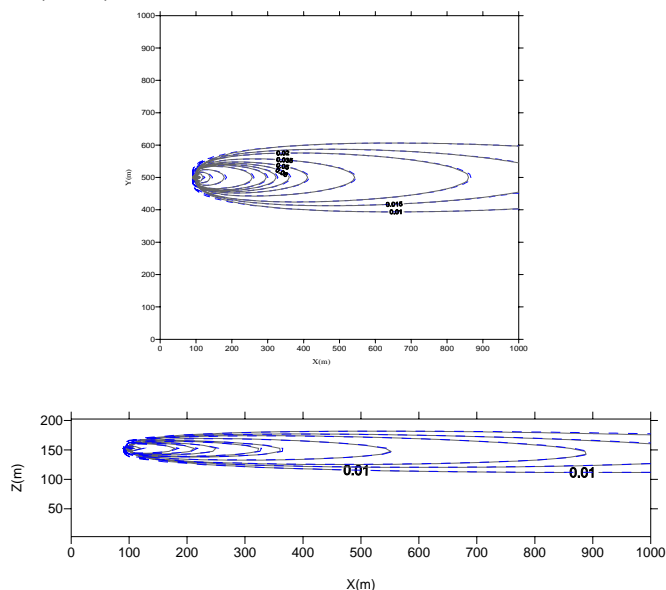
Lời giải trên là công thức của mô hình lan truyền chất ô nhiễm theo luật phân phối chuẩn Gauss, còn được gọi tắt là mô hình Gauss (xem [8], tr.100)

Miền tính được chọn là hình chữ nhật có cạnh song song với chiều dòng chảy ($X=1000\text{m}$, $Y=1000\text{m}$) chia thành 100×100 ô lưới và kéo từ đáy lòng dẫn, $z_b = 0\text{m}$ lên tới độ cao $\eta = 202,5\text{m}$ chia thành 41 lớp, mỗi lớp dày 5m, riêng lớp sát đáy dày 2,5m nhằm tăng độ chính xác. Độ cao này được lấy sao cho địa hình không còn ảnh hưởng đến chuyển động. Thời gian mô phỏng là $T = 20\text{h}$ với bước thời gian $\Delta t = 5\text{s}$.

Dưới đây là một vài hình ảnh so sánh kết quả giữa lời giải số và lời giải giải tích:

- Phân bố nồng độ chất tải trên mặt phẳng ngang đi qua nguồn theo chiều dòng chảy trong trường hợp điểm nguồn ở tọa độ $(x = 100\text{m}, y = 500\text{m}, z = 152,5\text{m})$ có công suất $M = 314 \text{ kg/s}$, $U = 1\text{m/s}$, $A_C = 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_C = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$. Các đường đồng mức có đơn vị gam/lít.

H4: So sánh lời giải số & lời giải Gauss (XOY)



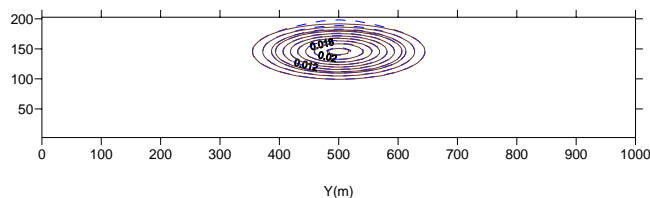
Ghi chú: _____ Lời giải Gauss
 - - - - - Lời giải số

Phân bố nồng độ chất bản trên mặt phẳng đứng đi qua nguồn theo chiều dòng chảy

H5: So sánh lời giải số & lời giải Gauss (XOZ)

Sự phân bố nồng độ chất bản trên trên các mặt phẳng XOY, XOZ ở lời giải số nhìn chung đúng với lời giải giải tích, chỉ có vị trí điểm nguồn, vết chất bản ở lời giải số có phần lan về phía sau so với lời giải giải tích đó là do lời giải giải tích đã không tính đến khuếch tán trên phương x.

- Phân bố nồng độ chất tải trên mặt phẳng đứng vuông góc với hướng dòng chảy ở tọa độ $x = 800\text{m}$ cho trên hình:



Ghi chú: _____ Lời giải Gauss
 - - - - - Lời giải số

H6: So sánh lời giải số & lời giải Gauss (YOZ)

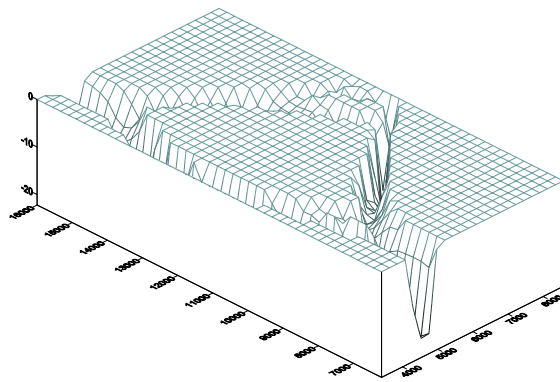
Điểm khác biệt lớn nhất của sự phân bố nồng độ ở mặt phẳng ngang là vết chất bản của

lời giải số cao hơn so với lời giải giải tích ở khu vực gần biên mặt thoáng.

Qua kiểm chứng với lời giải giải tích cho thấy mô hình có độ chính xác khá tốt.

3.2 Kết quả tính toán lan truyền các chất ô nhiễm trên sông Hậu đoạn Long Xuyên

Mô hình được áp dụng thử cho khu vực làng cá bè Mỹ Hoà Hưng. Miền tính có kích thước 10000mx5000mx25m được chia lưới vuông 25mx25m theo phương ngang và 10 lớp theo phương đứng.



H 7: Địa hình vùng tính

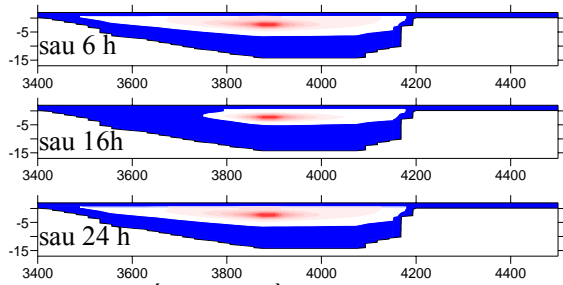
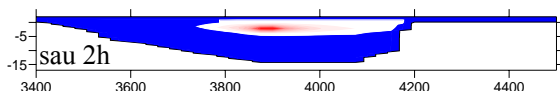
Riêng ô lưới sát đáy cao bằng $\frac{1}{2}$ ô lưới kề với nó. Bước thời gian cho $\Delta t = 1s$ nhằm bảo đảm độ ổn định của chương trình khi giải mặt thoáng và các thành phần vận tốc, bước thời gian tính các phương trình tải chất lớn hơn 30 lần để tăng tốc độ tính toán.

Mô phỏng được thực hiện cho năm 2000, thời điểm tính toán là thời gian đầu mùa mưa, bắt đầu từ 20:00:00 ngày 09/04/2000 đến 20:00:00 ngày 12/04/2000.

Mỗi dãy bố trí từ 4 -5 bè, kích thước khoảng (12-30)x(9-12)x(4-4,5)m/bè theo phương dọc hoặc phương ngang, gần bờ, ở độ sâu từ 3,5 – 5,0m.

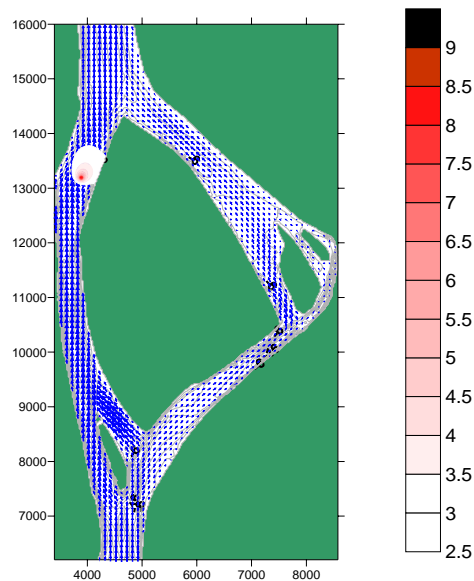
Tiến hành tính toán cho 2 dạng chất tải: BOD và cặn lơ lửng.

Trường hợp I: Nồng độ BOD tại cụm bè đạt từ 8 -10mg/l xem như liên tục thải ra. Điểm đặt nguồn thải ở tầng thứ 8 tức cách mặt nước 0,8 – 1,0m. Hệ số tự làm sạch $3,6 \times 10^{-7}$.



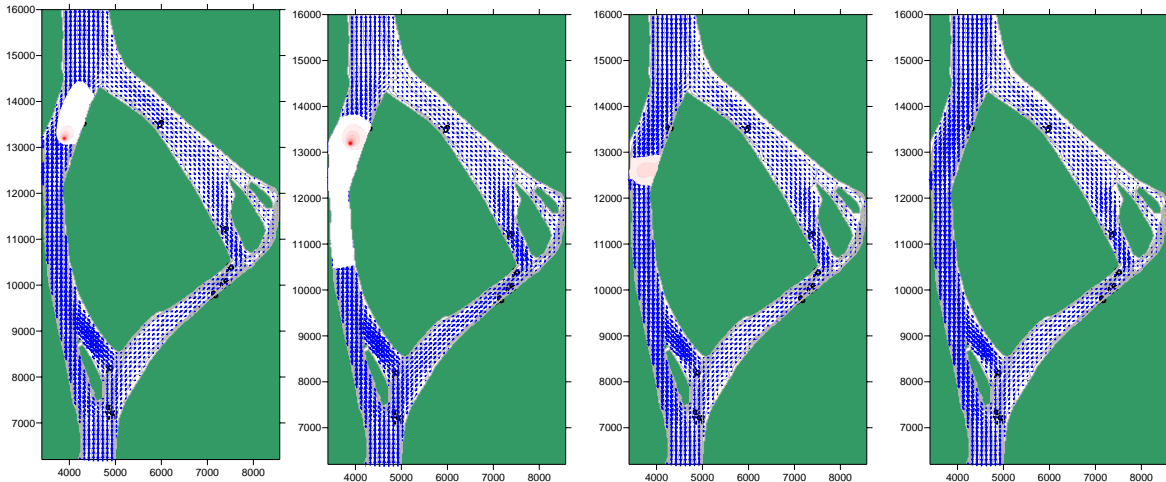
H8: Mặt cắt qua ngu ồn theo ph ương x sau 2h - 6h - 16h - 24h

Khi sau 2 giờ tính toán triều đang lên, vệt chất tải lan về phía thượng lưu. Đến khi mô phỏng được 6 giờ triều rút mạnh, vệt chất tải bị trôi về hạ lưu và khuếch tán ra xa nguồn, nồng độ chất tải giảm dần.



H9: Mặt cắt ngang qua tầng 8 sau 2h & 6h

Đến giờ thứ 16, thì vệt chất tải lại lan về thượng lưu theo dòng chảy. Đến khi triều rút lại vào giờ thứ 24 thì vệt chất mới lan về hạ lưu, nồng độ càng giảm do khả năng tự làm sạch của dòng chảy.

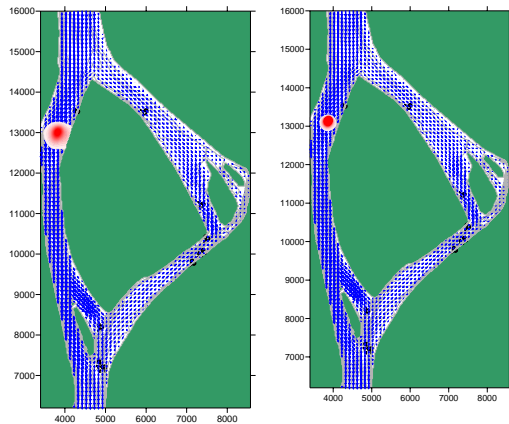


H10: Mặt cắt ngang qua tầng 8 sau 16h & 24h

Kết luận: BOD chỉ có tính cục bộ không ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng môi trường nước do sông quá rộng, vận tốc dòng chảy khá lớn do đó chất hữu cơ đã bị pha loãng, nên nồng độ thấp do khả năng phân tán tự làm sạch của dòng chảy.

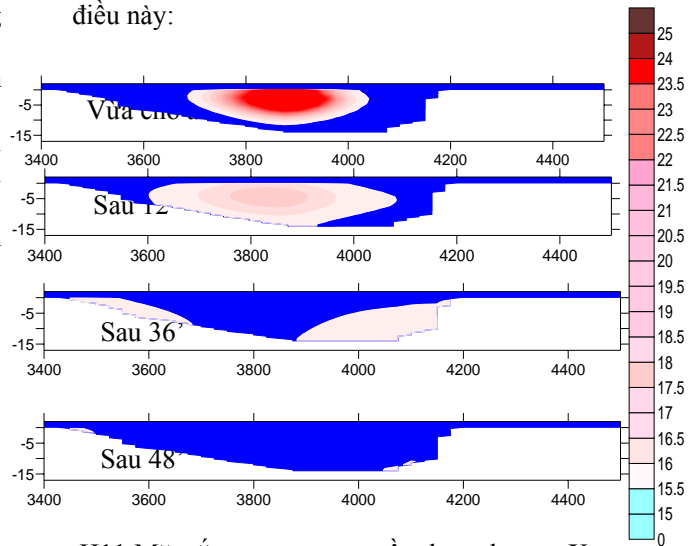
Trường hợp II: Nồng độ thức ăn lơ lửng tại cụm bè đạt từ 20 -25mg/l. Điểm đặt nguồn thải ở tầng thứ 8 tức cách mặt nước từ 0,8- 1,0m. Vận tốc rơi của dạng hạt thức ăn lơ lửng tạm lấy $w_s = 0.05\text{m/s}$.

Tính từ lúc cho ăn đến sau 12'



H11: Mặt cắt ngang qua tầng 8 lúc cho ăn đến sau 12' - 36' - 48'

Kết luận: Trường hợp chất tải dạng hạt, tính chất lan truyền cũng tương tự BOD, nhưng nó có tốc độ lắng đọng. Vì thế nó lan truyền đi chưa xa thì đã bị lắng và tiêu tán gần hết. Trên mặt cắt ngang, chúng ta sẽ thấy rõ hơn điều này:



H11: Mặt cắt ngang qua nguồn theo phương X từ lúc cho ăn đến sau 12' - 36' - 48'

Do các bè bố trí đều khắp dọc theo bờ sông nên nồng độ của chất tải tương đương nhau cho vùng gần bờ và được dòng chảy pha loãng đi rất nhiều nên tình trạng ô nhiễm chưa đến mức báo động cũng như ảnh hưởng nghiêm trọng đến quá trình nuôi cá nói riêng và phát triển các ngành kinh tế thủy sản trong khu vực.

Kết luận:

Bài báo đã trình bày một mô hình tính toán lan truyền chất trong sông. Mô hình giải các phương trình vận tải chất bằng phương pháp thể tích hữu hạn. Kiểm chứng với lời giải giải tích cho thấy mô hình có độ chính xác khá tốt. Mặc dù số liệu so sánh không đầy đủ nhưng kết quả mô phỏng lan truyền BOD và thức ăn dư ở làng cá bè Mỹ Hoà Hưng tương đối hợp lý.

Lời cảm ơn:

Bài báo được hoàn thành với sự hỗ trợ kinh phí của Hội đồng Khoa học Tự nhiên

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Van Rijn (1987). "Mathematical Modelling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport", *Delft Hydraulics Communication No. 382*.
2. Smagorinsky, J. (1963). "General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I: The Basic Experiment". *Monthly Weather Rev.*, 91, pp. 99 - 164.
3. Mellor, G. L. and Yamada, T. (1982). "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems". *Rev. of Geophys. And Space Phys.* 20(4), pp. 851 - 875.
4. Lê Song Giang (2002). "Mô hình số cho dòng chảy 3 chiều nước nông". *Tuyển tập Công trình Hội nghị Khoa học Cơ học thủy khí và Công nghệ mới, Lãng cô 24 - 25/7/2001*, tr. 124 - 129.
5. Lê Song Giang, Nguyễn Văn Nghiệp và Nguyễn Cửu Tuệ (2003). "Mô hình số cho dòng chảy 3 chiều trong đoạn sông cong", *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VII, Hà nội, 12/2002*. Tập IV, trg. 127-133.
6. Lê Song Giang, Nguyễn Thị Phương (2004) *Nghiên cứu bằng phương pháp số trường gió Vũng Tàu*. Hội nghị KH Cơ học Thủy khí toàn quốc năm 2004, Hà Tiên, 21-23/7/2004.
7. Douglas, J. J. and Gunn, J. E. (1964). "A General Formulation of Alternating Direction Methods - Part I. Parabolic and Hyperbolic Problems", *Num. Math.*, Vol. 6, pp. 428-453.
8. Trần Ngọc Chân (2000), *Ô nhiễm không khí và xử lý khí thải, Tập 1*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà nội, 216 trg.