

NGHIÊN CỨU TÁC ĐỘNG CỦA MẬT ĐỘ THÂM THỰC VẬT VEN KÊNH DẪN ĐẾN ĐẶC TÍNH DÒNG CHẢY

Vũ Huy Công

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

Tóm tắt: Sự hiện diện của thảm thực vật ven kênh dẫn ảnh hưởng đáng kể đến cấu trúc và đặc tính dòng chảy. Trong nghiên cứu này, một mảng thực vật được đơn giản hóa bằng các hình trụ tròn và được mô phỏng thông qua mô hình số để phân tích tác động đối với dòng chảy. Hai kịch bản với các mật độ thực vật khác nhau đã được nghiên cứu. Kết quả cho thấy mật độ thảm thực vật ảnh hưởng lớn đến độ lệch của dòng chảy và độ gia tăng vận tốc trong lòng sông nơi không có thảm thực vật. Ngược lại, trong vùng có thảm thực vật, vận tốc dòng chảy giảm đáng kể. Sự thay đổi vận tốc này càng rõ rệt khi dòng chảy di chuyển về phía hạ lưu, với vận tốc giảm dần trong vùng thảm thực vật và tăng mạnh trong khu vực không có thảm thực vật. Nghiên cứu cũng cho thấy sự xuất hiện các xoáy nước ở phía sau thảm thực vật có kích thước tương đương với bề dày thảm thực vật. Các xoáy nước kiểu “Kelvin-helmholtz” cũng được phát hiện ở mép ngoài của khu vực thảm thực vật. Những kết quả trên đã góp phần làm sáng tỏ hơn tác động của thảm thực vật đối với dòng chảy và cung cấp thông tin quan trọng trong việc thiết kế và bảo vệ kênh một cách dân hiệu quả.

Từ khóa: Mô hình số, thực vật, hình trụ tròn.

Summary: The presence of riparian vegetation significantly affects the structure and characteristics of flow. In this study, a vegetation patch was simplified as cylindrical shapes and simulated through a numerical model to analyze its impact on the flow. Two scenarios with different vegetation densities were investigated. The results show that vegetation density significantly influences the deviation of the flow and the increase in velocity in the river section without vegetation. Conversely, in areas with vegetation, the flow velocity decreases significantly. This change in velocity is more pronounced as the flow moves downstream, with the velocity decreasing in the vegetated region and increasing sharply in the non-vegetated area. The study also reveals the formation of vortices behind the vegetation, with sizes equivalent to the thickness of the vegetation. Kelvin-Helmholtz vortices were also observed at the outer edge of the vegetated area. These findings contribute to a better understanding of the impact of vegetation on flow dynamics and provide important information for the design and protection of channels in an effective way.

Keywords: Numerical model, vegetation, cylinder.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thảm thực vật ven kênh dẫn đóng vai trò thiết yếu trong việc bảo vệ và duy trì sự ổn định của bờ kênh. Chúng không chỉ giúp giảm nguy cơ

xói mòn và bảo vệ bờ kênh trước tác động của dòng chảy mà còn hấp thụ và điều hòa năng lượng dòng chảy, đồng thời hỗ trợ quá trình lắng đọng bùn cát, góp phần cải thiện chất lượng dòng nước và duy trì hệ sinh thái ven kênh (Singh *et al.*, 2021, Ali 2023). Bên cạnh đó, thảm thực vật còn đóng vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh quá trình vận chuyển

Ngày nhận bài: 05/5/2025

Ngày thông qua phản biện: 20/6/2025

Ngày duyệt đăng: 21/7/2025

trầm tích lơ lửng, đồng thời ảnh hưởng đến sự di chuyển của các thành phần sinh học, hóa học và chất dinh dưỡng trong dòng chảy (Zong & Nepf, 2011). Tác động của thảm thực vật lên dòng chảy rất phức tạp, phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cấu trúc, mật độ, vận tốc dòng chảy và hướng dòng chảy tác động. Các động lực dòng chảy trong kênh có thảm thực vật đã trở thành chủ đề nghiên cứu rộng rãi, với phần lớn các nghiên cứu được tiến hành thông qua các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Một số thí nghiệm nhằm mô tả cấu trúc dòng chảy và sự trao đổi tại vùng tiếp giáp giữa thảm thực vật và kênh hở đã được thực hiện bởi White & Nepf, (2007, 2008) cũng như Zong & Nepf (2010). Sau đó Zong & Nepf (2011) đã mở rộng các nghiên cứu trước đây để tìm hiểu sâu hơn về sự đối lưu của các hạt trong mảng thảm thực vật. Kết quả chỉ ra rằng sự phân tán ngang của trầm tích lơ lửng xảy ra rõ rệt tại vùng chuyển tiếp giữa thảm thực vật và kênh hở. Bennett et al., (2008) đã tập trung nghiên cứu tác động của vị trí và hình dạng các thảm thực vật ven sông đến dòng chảy, đồng thời đề xuất việc sử dụng các mảng thực vật để phục hồi và bảo vệ bờ kênh. Gần đây Zhang & Liu (2023) đã kết hợp thí nghiệm và mô hình số để mô phỏng sự xói mòn trên sườn dốc có thảm thực vật. Từ các nghiên cứu trước đây, có thể thấy rằng việc sử dụng các mảng hình trụ tròn để nghiên cứu thảm thực vật đã được áp dụng rộng rãi (Han et al., 2023, White & Nepf, 2007; Zong & Nepf, 2010; Zong & Nepf, 2011). Tuy nhiên do tính phức tạp trong tương tác giữa thực vật và dòng chảy, tác động của mật độ thảm thực vật lên các đặc trưng dòng chảy vẫn chưa được nghiên cứu chi tiết. Những nghiên cứu cần có để hiểu rõ hơn về tác động của thảm thực vật đối với dòng chảy và cung cấp nền tảng khoa học quan trọng cho các chiến lược bảo vệ và quản lý môi trường sông ngòi một cách hiệu quả.

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ thông tin, đặc biệt là các mô hình số, việc mô

phỏng tương tác giữa thực vật và dòng chảy đã trở nên khả thi và hiệu quả hơn bao giờ hết. Trong nghiên cứu này, tác giả tập trung vào mô phỏng đánh giá tác động của mật độ thảm thực vật đến sự thay đổi dòng chảy khi đi qua chúng. Mô phỏng này được thiết kế dựa trên thí nghiệm của Zong & Nepf (2011) để kiểm định và xác thực. Kết quả nghiên cứu không chỉ làm rõ mối quan hệ giữa mật độ thảm thực vật và các yếu tố thủy lực quan trọng như vận tốc dòng chảy và sự hình thành các xoáy nước, mà còn đặc biệt nhấn mạnh vai trò của các xoáy xuất hiện ở mép thực vật

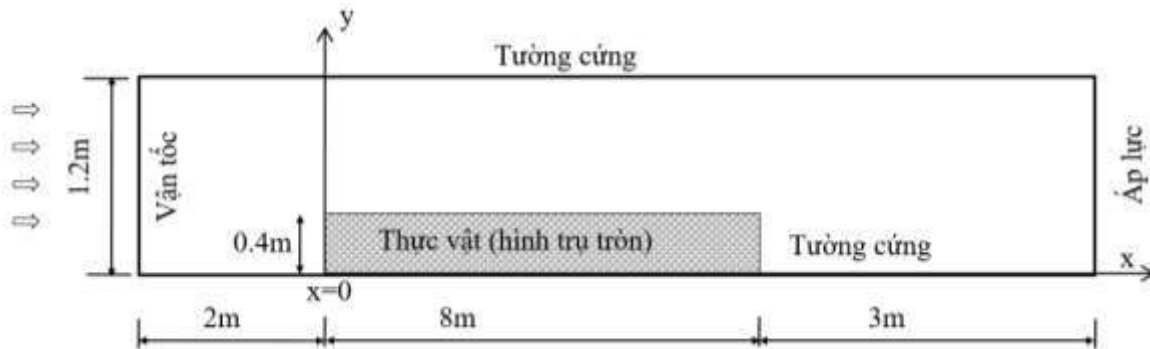
2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH

Việc sử dụng phần mềm Fluent để mô phỏng dòng chảy qua một hình trụ và mảng nhiều hình trụ đã được tác giả áp dụng thành công trong các nghiên cứu trước đây (Vu, 2023; Vũ, 2017; Vu et al., 2016). Trong nghiên cứu mới nhất Vu, (2023) đã tập trung khảo sát dòng chảy qua mảng hình trụ được bố trí trong kênh dẫn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ số lực cản thu được từ mô phỏng phù hợp chặt chẽ với dữ liệu thực nghiệm của Nepf (1999), qua đó khẳng định độ chính xác và tính đáng tin cậy của mô hình được thiết lập. Để đảm bảo tính tin cậy trong nghiên cứu hiện tại, tác giả tiếp tục áp dụng các thiết lập đã được kiểm chứng trước đó, bao gồm các điều kiện biên và thiết lập mô hình rối. Hình 1 minh họa sơ đồ nghiên cứu chi tiết.

Trong nghiên cứu một mảng các trụ tròn tương trưng cho thảm thực vật được bố trí dọc theo bờ kênh. Miền tính toán có kích thước $13 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ tương tự như Zong & Nepf (2011), nhằm đảm bảo đủ không gian để dòng chảy phát triển ổn định và giảm thiểu ảnh hưởng của các biên đến kết quả mô phỏng. Trụ x được đặt theo hướng dòng chảy, với $x = 0$ đặt tại mép thượng lưu của thảm thực vật; trục y vuông góc với dòng chảy và điểm $y = 0$ đặt tại bờ kênh. Vùng thảm thực vật được bố trí kéo dài từ $x=0$ đến $x=8 \text{ m}$ theo hướng dòng chảy

và từ $y = 0$ đến $y = 0,4$ m theo phương vuông góc. Khoảng cách từ mép ngoài của vùng thăm thực vật đến biên trên của miền tính toán là 0,8

m, đảm bảo một khu vực đủ rộng để quan sát và phân tích sự thay đổi của dòng chảy trong khu vực này.



Hình 1: Miền tính toán và điều kiện biên

Thảm thực vật bao gồm các hình trụ được bố trí xen kẽ, có đường kính $D = 6\text{mm}$. Tham số mật độ thực vật, aD , được đề xuất bởi Nepf (1999) và được sử dụng bởi Zong & Nepf (2011). Trong đó $a = nD$ với n là số lượng các hình trụ trong mảng (số trụ tròn/cm²). Trong nghiên cứu này hai trường hợp mật độ

được xem xét, với các giá trị $a = 0.04$ và $a = 0.21$. Số lượng hình trụ tương ứng cho hai trường hợp này lần lượt là 2133 và 10666 hình trụ. Hai trường hợp này sau đây được gọi tắt là phân bố thưa và phân bố dày. Các thông số chi tiết của từng trường hợp được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1: Thông số thảm thực vật

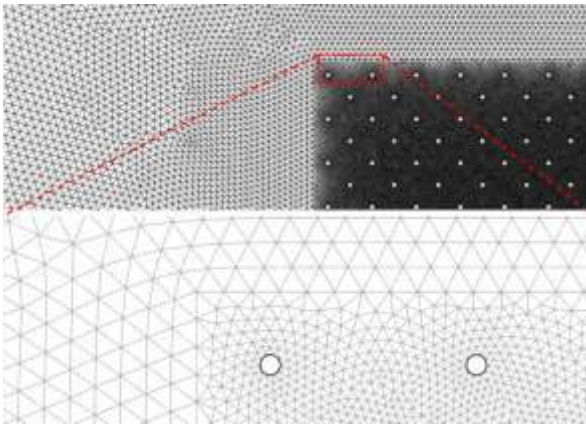
Trường hợp	Tham số mật độ $a=nD$	Khoảng cách giữa hai hình trụ (cm)	Tổng số hình trụ
Phân bố thưa	0.04	2,8	2133
Phân bố dày	0.21	1,2	10666

Các điều kiện biên trong mô phỏng được thiết lập như sau: Điều kiện không trượt (no-slip condition) được áp dụng cho biên dưới của miền tính toán, đảm bảo rằng vận tốc tại bề mặt tiếp xúc bằng không. Điều kiện không trượt này cũng được áp dụng cho các hình trụ để mô phỏng chính xác sự tương tác giữa dòng chảy và các cấu trúc thảm thực vật. Tại biên đầu vào, điều kiện vận tốc được thiết lập để mô phỏng dòng chảy đều, với vận tốc đầu vào là 11.6 cm/s tương ứng với thí nghiệm của Zong & Nepf, (2011). Tại biên đầu ra, điều kiện áp suất được áp dụng để duy trì sự cân bằng của dòng chảy. Phương pháp "Semi-

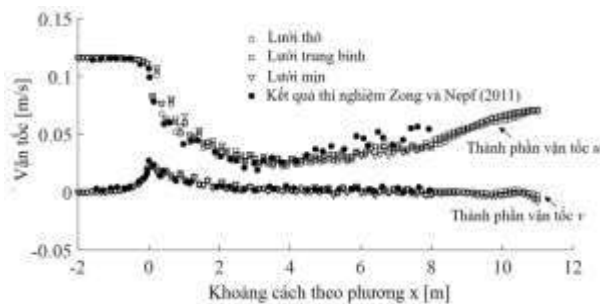
Implicit Method for Pressure Linked Equations" (SIMPLE), một phương pháp phổ biến trong cơ học chất lỏng tính toán, được sử dụng trong phần mềm Fluent để giải quyết mối liên kết giữa áp suất và vận tốc trong các bài toán dòng chảy không nén được. Mô hình rối SST $k-w$ được áp dụng vì hiệu quả của nó trong việc mô phỏng các dòng chảy phức tạp và tương tác với các vật thể rắn, như đã được giải thích trong nghiên cứu của (Vu *et al.*, 2016).

Quá trình chia lưới mô hình được thực hiện theo cách tương tự như trong nghiên cứu của Vu, (2023). Miền tính toán được chia lưới

bằng các phần tử tam giác. Lưới được chia mịn tại khu vực có thảm thực vật để nắm bắt chi tiết sự biến đổi của dòng chảy, trong khi tại các khu vực gần tường bên của kênh, lưới được làm thưa hơn để giảm thiểu số lượng tính toán. Chi tiết về cách chia lưới được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2: Lưới tính mô hình với các ô lưới nhỏ hơn ở khu vực xung quanh thảm thực vật



Hình 3: Sự thay đổi các thành phần vận tốc u , v tại mặt cắt $y = 0,2$ m đi qua thảm thực vật

Để đảm bảo độ tin cậy và tính chính xác trong mô phỏng số, công tác kiểm tra về độ phân giải của lưới tính đã được thực hiện. Ba trường hợp lưới với độ phân giải khác nhau đã được xem xét: lưới thô gồm 2.130.635 phần tử, lưới trung bình gồm 3.029.233 phần tử, và lưới mịn gồm 5.795.005 phần tử. Hình 3 minh họa sự thay đổi của hai thành phần vận tốc theo phương dòng chảy (u) và phương vuông góc với dòng chảy (v) tại mặt cắt $y = 0,2$ m, thu được từ ba trường hợp lưới này. Đồng thời, kết quả thí nghiệm của Zong & Nepf, (2011) cũng

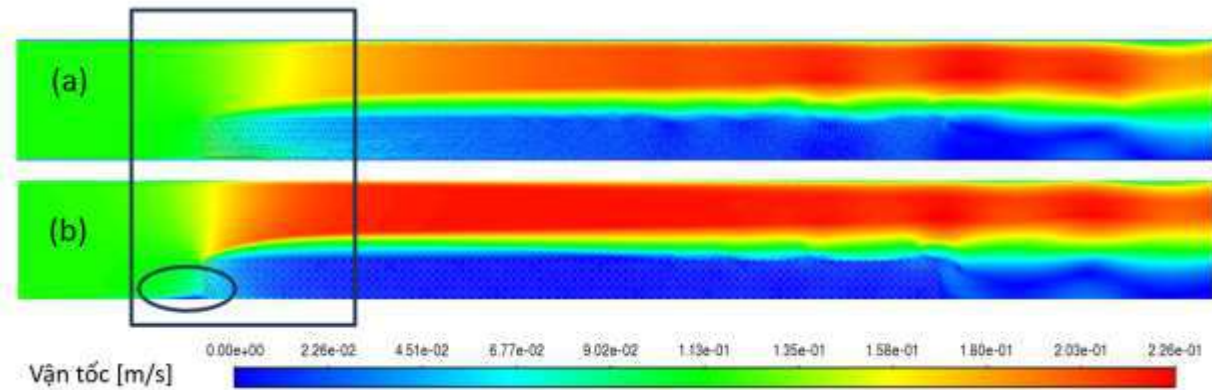
được đưa ra để so sánh. Kết quả cho thấy cả ba trường hợp lưới đều tương đồng và phù hợp tốt với dữ liệu thí nghiệm. Do đó, để giảm tải nguyên máy tính đồng thời vẫn đảm bảo độ chính xác, trường hợp lưới thô đã được lựa chọn cho các mô phỏng tiếp theo.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Sự thay đổi về vận tốc

Hình 4 thể hiện sự thay đổi vận tốc tương ứng với hai trường hợp thảm thực vật phân bố thưa và dày. Đối với trường hợp thảm thực vật thưa, trong khoảng $x = 0$ m đến $x = 2$ m, vận tốc dòng chảy ban đầu duy trì ở mức khoảng 0,05 m/s, sau đó giảm xuống dưới 0,01 m/s tại cuối thảm thực vật ($x = 8$ m). Ngược lại, với trường hợp thảm thực vật dày, sự suy giảm vận tốc xảy ra rõ rệt ngay từ đầu. Trong khoảng $x = 0$ m đến $x = 2$ m, vận tốc dòng chảy giảm mạnh xuống mức 0,005 m/s và duy trì ở mức rất nhỏ này trong suốt chiều dài thảm thực vật.

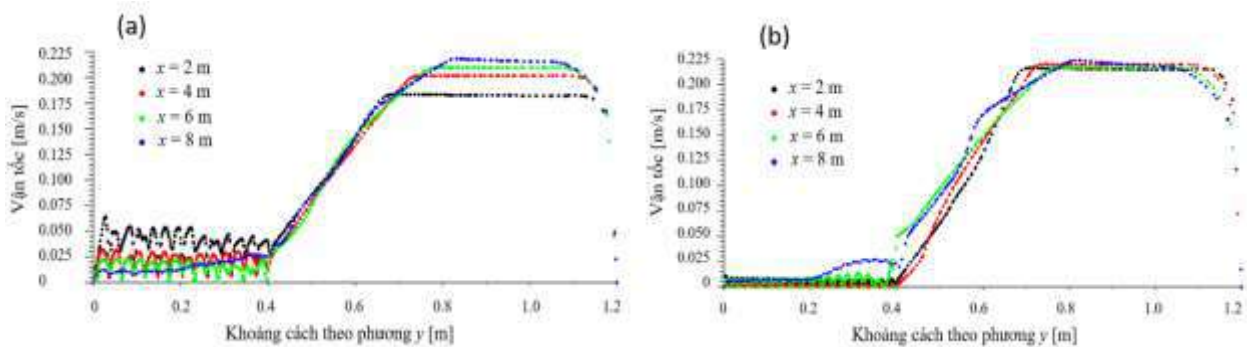
Trong khu vực ô vuông được đánh dấu trên Hình 4, quan sát cho thấy tại vị không có thảm thực vật (vị trí bờ bên kia kênh), vận tốc dòng chảy tăng nhanh hơn trong trường hợp thảm thực vật dày. Ngược lại, đối với thảm thực vật thưa, sự gia tăng vận tốc này diễn ra chậm hơn. Hiện tượng này có thể được lý giải bởi tác động cản trở mạnh của thảm thực vật dày đối với dòng chảy, khiến năng lượng dòng chảy tập trung nhiều hơn vào khu vực không có thảm thực vật. Trong khi đó, ở trường hợp thảm thực vật thưa, mức độ cản trở dòng chảy thấp hơn, dẫn đến sự phân tán đều hơn của dòng chảy trên toàn bộ kênh, làm giảm sự chênh lệch vận tốc giữa khu vực giữa kênh và các vùng có thảm thực vật. Đặc biệt, trong trường hợp thảm thực vật dày, một vùng vận tốc nhỏ xuất hiện ở khu vực phía trước thảm thực vật và sát bờ kênh (trong khu vực hình elip), kết quả hình thành một xoáy ngược nhỏ. Hiện tượng này xảy ra do dòng chảy bị cản trở mạnh, dẫn đến sự lệch đáng kể về phía giữa kênh và có dòng chảy ngược ở phía bờ kênh.



Hình 4: Sự thay đổi vận tốc: (a) thăm thực vật thưa và (b) thăm thực vật dày

Hình 5 thể hiện thay đổi vận tốc theo phương y tại các mặt cắt lần lượt là $x = 2\text{ m}$, $x = 4\text{ m}$, $x = 6\text{ m}$ và $x = 8\text{ m}$. Trong phạm vi $y = 0 - 4\text{ m}$, tương ứng với khu vực có thăm thực vật, vận tốc dòng chảy rất nhỏ tại tất cả các mặt cắt. Đối với trường hợp thăm thực vật thưa (hình 5a), vận tốc trong vùng này giảm dần từ 0,05

m/s tại mặt cắt $x = 2\text{ m}$ xuống còn 0,01 m/s tại mặt cắt $x = 8\text{ m}$. Ngược lại, trong trường hợp thăm thực vật dày hơn (Hình 5b), vận tốc gần như bằng 0 tại tất cả các mặt cắt, phản ánh rõ rệt mức độ cản trở dòng chảy cao hơn của thăm thực vật dày đặc.



Hình 5: Sự thay đổi vận tốc tại các mặt cắt $x = 2, 4, 6, 8\text{ m}$ đối với thăm thực vật (a) thưa, (b) dày

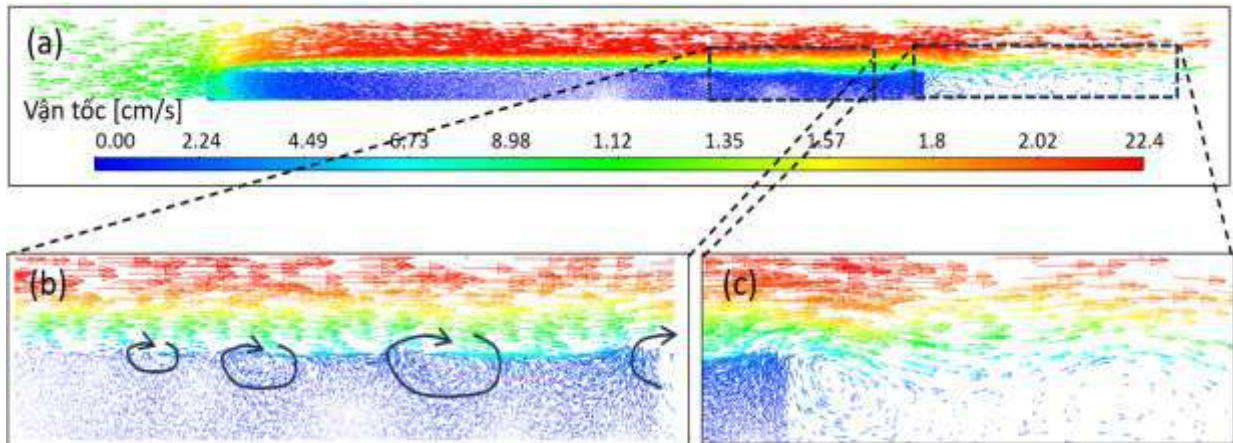
Trong khoảng từ $y = 0,4\text{ m}$ đến $y = 0,7\text{ m}$, vận tốc dòng chảy tăng mạnh, sau đó đạt trạng thái ổn định khi $y > 0,7\text{ m}$ đối với tất cả các mặt cắt. Đối với thăm thực vật thưa, vận tốc tăng đồng nhất tại tất cả các mặt cắt theo phương x (xem hình 5a). Ngược lại, với thăm thực vật dày hơn, vận tốc trong phạm vi này tăng dần theo thứ tự các mặt cắt từ $x = 2\text{ m}$ đến $x = 8\text{ m}$. Những kết quả này cho thấy thăm thực vật không chỉ làm giảm vận tốc dòng chảy bên trong nó mà còn ảnh hưởng đến sự phân bố vận tốc theo phương vuông góc với dòng chảy.

Khi $1,2 > y > 0,7\text{ m}$, vận tốc tại các mặt cắt $x = 2\text{ m}$, $x = 4\text{ m}$, $x = 6\text{ m}$ và $x = 8\text{ m}$ thể hiện rõ sự khác biệt giữa hai trường hợp thăm thực vật thưa và thăm thực vật dày. Với thăm thực vật dày, vận tốc trong vùng này gần như bằng nhau ở tất cả các mặt cắt và đạt giá trị khoảng 0,225 cm/s. Điều này có nghĩa trong vùng kênh hở, vận tốc dòng chảy ít thay đổi dọc theo chiều dài kênh. Ngược lại, đối với thăm thực vật thưa, vận tốc tại mặt cắt $x = 2\text{ m}$ là nhỏ nhất nhưng tăng dần theo chiều dài kênh và đạt giá trị lớn nhất tại mặt cắt $x = 8\text{ m}$.

3.2. Sự xuất hiện của các xoáy nước

Ở cả hai trường hợp thấm thực vật thưa và dày, các xoáy nước đều xuất hiện ở phía sau thảm thực vật, với kích thước tương đương bề rộng của thảm thực vật. Hiện tượng này được giải thích bởi sự chênh lệch vận tốc dòng chảy.

Cụ thể, tại khu vực ngay sau thảm thực vật, dòng chảy có vận tốc thấp, trong khi tại rìa thảm thực vật, dòng chảy lại có vận tốc cao hơn. Sự chênh lệch này tạo ra các dòng chảy ngược, dẫn đến sự hình thành các xoáy nước (xem hình 6a, c).

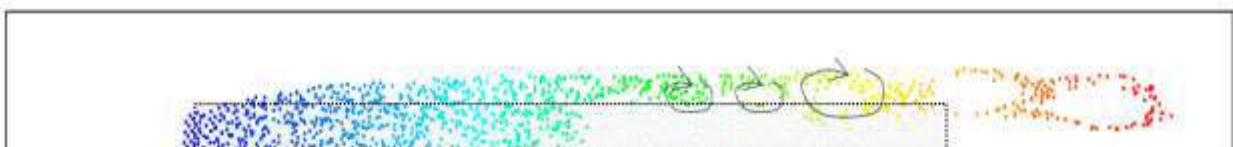


Hình 6: Hình ảnh vec tơ thể hiện các xoáy xuất hiện xung quanh thảm thực vật

Một hiện tượng thú vị quan sát được đó là sự xuất hiện các xoáy nước ở mép ngoài rìa của thảm thực vật, được nhận định là các xoáy Kelvin-Helmholtz (xem hình 6a, b). Đây là một loại xoáy hình thành ở vùng có sự chênh lệch vận tốc giữa hai lớp dòng chảy. Các xoáy Kelvin-Helmholtz thường hình thành khi một lớp dòng chảy có vận tốc cao di chuyển trên một lớp dòng chảy có vận tốc thấp hơn. Sự khác biệt này tạo ra sự bất ổn định giữa hai lớp dòng chảy, dẫn đến việc hình thành các xoáy cuộn tại rìa của thảm thực vật, nơi có sự phân tách rõ rệt giữa khu vực bị cản trở (có thảm thực vật) và khu vực không bị cản trở (vùng hở của kênh). Sự xuất hiện của các xoáy này đóng vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu

vận chuyển bùn cát và các chất lơ lửng xung quanh thảm thực vật, bởi chúng ảnh hưởng đến quá trình phân tán và lắng đọng của các hạt.

Hình 7 minh họa kết quả mô phỏng “particle tracking” theo dõi sự di chuyển của các hạt trong dòng chảy. Các hạt này được giả định có khối lượng tương đương với nước. Kết quả cho thấy tại mép ngoài của thảm thực vật, các hạt có thể bị dòng chảy đẩy ra khỏi thảm thực vật nhưng sau đó có thể lại bị hút quay trở lại bên trong thảm thực vật. Hiện tượng này cho thấy vai trò của các xoáy nước trong việc luân chuyển vật chất tại rìa thảm thực vật, đồng thời góp phần hình thành các vùng xáo trộn mạnh giữa dòng chảy bên trong và bên ngoài khu vực thảm thực vật.



Hình 7: Mô phỏng “particle tracking” theo dõi sự chuyển động của các hạt

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng số để đánh giá tác động của mật độ thảm thực vật đến sự thay đổi của dòng chảy xung quanh chúng. Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa tác động của thảm thực vật dày và thưa. Đối với thảm thực vật dày, vận tốc dòng chảy bên trong thảm thực vật giảm nhanh chóng, trong khi vận tốc ở vùng kênh hở tăng nhanh và đạt giá trị ổn định sớm hơn so với trường hợp thảm thực vật thưa. Đối với thảm thực vật thưa, sự thay đổi vận tốc diễn ra chậm hơn, cho thấy mức độ cản trở của thảm thực vật đối với dòng chảy ít hơn.

Kết quả mô phỏng “*particle tracking*” và hình

ảnh véc tơ vận tốc cho thấy sự xuất hiện của các xoáy Kelvin-Helmholtz liên tiếp dọc theo rìa thảm thực vật. Các xoáy này được phân bố khá đều và có xu hướng tăng kích thước dần về phía hạ lưu. Ngoài ra, một xoáy lớn phía sau thảm thực vật cũng được ghi nhận, với kích thước tương đương với bề rộng của thảm thực vật. Những kết quả này nhấn mạnh vai trò của mật độ thảm thực vật trong việc điều chỉnh động lực học dòng chảy và hình thành các xoáy nước quan trọng xung quanh thảm thực vật. Các xoáy này có thể đóng vai trò trong việc vận chuyển trầm tích và các chất lơ lửng, ảnh hưởng đến sự phân bố vật chất trong hệ sinh thái sông ngòi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ali, S. R. (2023). Riparian Wetlands and Water Quality. In *Advanced Technologies for Water Quality Treatment and Management* (pp. 121–148). Apple Academic Press.
- [2] Bennett, S. J., Wu, W., Alonso, C. V., & Wang, S. S. Y. (2008). Modeling fluvial response to in-stream woody vegetation: implications for stream corridor restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(6), 890–909. <https://doi.org/10.1002/esp.1581>
- [3] Han, J.-K., Wang, W.-J., Dong, F., Zhao, J.-Y., Peng, W.-Q., Zhu, Z.-B., ... Liu, B. (2023). On deducing the drag coefficient formula of cylindrical vegetation in non-uniform channel flow. *Journal of Hydro-Environment Research*.
- [4] Nepf, H. M. (1999). Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*, 35(2), 479–489. <https://doi.org/10.1029/1998WR900069>
- [5] Singh, R., Tiwari, A. K., & Singh, G. S. (2021). Managing riparian zones for river health improvement: an integrated approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 17(2), 195–223.
- [6] Vu, H. C. (2023). A study of flow structure, drag force, and particle tracking through many circular cylinders. *Journal of Water Resources & Environmental Engineering*, 87, 16–24.
- [7] Vũ, H. C. (2017). Nghiên cứu cấu trúc dòng chảy xung quanh hai hình trụ tròn sử dụng Lagrangian coherent structures. *Tuyển Tập Công Trình Hội Nghị Khoa Học Cơ Học Thủy Khí Toàn Quốc Lần Thứ 20, 1*, 107–114.
- [8] Vu, H. C., Ahn, J., & Hwang, J. H. (2016). Numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangement at low Reynolds numbers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1594–1604.

- [9] White, B. L., & Nepf, H. M. (2007). Shear instability and coherent structures in shallow flow adjacent to a porous layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 593, 1–32. <https://doi.org/10.1017/S0022112007008415>
- [10] White, B. L., & Nepf, H. M. (2008). A vortex-based model of velocity and shear stress in a partially vegetated shallow channel. *Water Resources Research*, 44(1), W01412. <https://doi.org/10.1029/2006WR005651>
- [11] Zhang, S., & Liu, X. (2023). Theoretical, experimental, and numerical studies of flow field characteristics and incipient scouring erosion for slope with rigid vegetations. *Journal of Hydrology*, 622, 129638.
- [12] Zong, L., & Nepf, H. (2010). Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation. *Geomorphology*, 116(3–4), 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.020>
- [13] Zong, L., & Nepf, H. (2011). Spatial distribution of deposition within a patch of vegetation. *Water Resources Research*, 47(3), W03516. <https://doi.org/10.1029/2010WR009516>