

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PHÁT TRIỂN NÔNG THÔN

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

NGUYỄN MINH NGỌC

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HÌNH HỌC
CỦA NƯỚC NHẢY ĐÁY TRONG LÒNG DẪN
LĂNG TRỤ MẶT CẮT NGANG HÌNH THANG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI, NĂM 2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PHÁT TRIỂN NÔNG THÔN

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

NGUYỄN MINH NGỌC

**NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HÌNH HỌC
CỦA NƯỚC NHẢY ĐÁY TRONG LÒNG DẪN
LĂNG TRỤ MẶT CẮT NGANG HÌNH THANG**

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình thủy

Mã số: 9-58-02-02

CÁN BỘ HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. GS.TS Hoàng Tư An

2. PGS.TS Phạm Hồng Cường

HÀ NỘI, NĂM 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân tác giả. Các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận án là trung thực, không sao chép từ bất kỳ một nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào.

Việc tham khảo các nguồn tài liệu đã được thực hiện trích dẫn và ghi nguồn tài liệu tham khảo đúng quy định.

Hà Nội, ngày 01 tháng 08 năm 2022

Tác giả luận án

Nguyễn Minh Ngọc

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn tới GS.TS Hoàng Tư An và PGS.TS Phạm Hồng Cường đã chỉ dẫn và đồng hành cùng tác giả trong suốt quá trình tìm hiểu, nghiên cứu và hoàn thiện luận án.

Tác giả xin được gửi lời cảm ơn đến các thầy giáo, cô giáo, các nhà khoa học và cán bộ Viện Khoa học thủy lợi Việt Nam, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội đã tạo điều kiện thuận lợi cho tác giả trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận án.

Trân trọng cảm ơn Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về động lực học sông biển, Khoa Kỹ thuật hạ tầng và môi trường Đô Thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội đã tạo điều kiện về thiết kế và vận hành hệ thống thí nghiệm, hỗ trợ nhân lực và thời gian cho tác giả tập trung học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến gia đình, bạn bè, đồng nghiệp đã giúp đỡ, tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tác giả trong suốt thời gian học tập, nghiên cứu và thực hiện luận án.

Tác giả

Nguyễn Minh Ngọc

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC HÌNH	ix
DANH MỤC BẢNG BIỂU	xii
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT	xiv
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU CƠ BẢN	xv
MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết của luận án	1
2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	3
4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu	3
4.1 Cách tiếp cận của luận án	3
4.2 Các phương pháp nghiên cứu	3
5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn	4
5.1 Ý nghĩa khoa học	4
5.2 Ý nghĩa thực tiễn	5
6. Những điểm mới của luận án	5
7. Cấu trúc của luận án	6
CHƯƠNG I - TỔNG QUAN VỀ NƯỚC NHẢY ĐÁY	7
1.1 Các khái niệm cơ bản	7
1.1.1 Dòng chảy ổn định không đều	7
1.1.2 Năng lượng đơn vị dòng chảy	7
1.1.3 Năng lượng đơn vị của mặt cắt	7
1.1.4 Độ sâu phân giới	8
1.1.5 Số Froude	8
1.2 Hiện tượng nước nhảy	8
1.2.1 Khái quát về nước nhảy	8
1.2.2 Cấu trúc nước nhảy đáy trong kênh hình thang	9
1.3 Phân loại nước nhảy	12
1.4 Các nghiên cứu về nước nhảy trên thế giới và ở Việt Nam	13
1.4.1 Nghiên cứu nước nhảy trên thế giới	13

1.4.1.1 Nhận diện về nước nhảy	13
1.4.1.2. Độ sâu phân giới dòng chảy ổn định không đều trong kênh hình thang	13
1.4.1.3. Nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang hình chữ nhật.....	19
1.4.1.4. Nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang.....	24
1.4.1.5 Ứng dụng công nghệ “Trí tuệ nhân tạo” trong nghiên cứu nước nhảy	33
1.4.2 Nghiên cứu nước nhảy ở Việt Nam.....	34
1.4.2.1 Các nghiên cứu về nước nhảy	34
1.4.2.2 Một số công trình thực tế	37
1.5 Các yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến đặc trưng hình học nước nhảy	39
1.5.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến độ sâu liên hiệp nước nhảy	39
1.5.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy.....	40
1.6 Vấn đề đặt ra và hướng nghiên cứu.....	41
1.6.1 Các vấn đề cần nghiên cứu	41
1.6.2 Định hướng nghiên cứu.....	43
1.7 Kết luận Chương I	43
CHƯƠNG II – CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH LĂNG TRỤ MẶT CẮT HÌNH THANG	45
2.1 Cơ sở lý thuyết phân tích đặc trưng hình học của nước nhảy	45
2.1.1 Đặc điểm của nước nhảy	45
2.1.2 Phương trình cơ bản xác định độ sâu dòng chảy của khu xoáy	46
2.1.2.1 Phương trình vi phân cơ bản của chất lỏng chuyển động	46
2.1.2.2 Các giả thiết áp dụng cho phương trình Navier-Stokes	47
2.1.2.3 Phương trình Navier-Stokes cho dòng chất lỏng chuyển động.....	47
2.1.2.4 Tích phân phương trình Navier-Stokes cho nước nhảy trong kênh lăng trụ đáy bằng	49
2.1.3 Phương trình cơ bản xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy.....	50
2.1.3.1 Các giải thiết cơ bản	50
2.1.3.2 Phương trình xác định chiều dài dòng chảy	51

2.2 Cơ sở lý thuyết tương tự và mô hình hóa	53
2.2.1 Lý thuyết về phân tích thứ nguyên	53
2.2.1.1 Thứ nguyên của một đại lượng.....	53
2.2.1.2 Lý thuyết Pi (II) của Buckingham	53
2.2.2 Các đại lượng đầu vào và ra của nghiên cứu.....	54
2.2.3 Hiện tượng tương tự và chuẩn tương tự về kích thước mô hình vật lý ...	55
2.2.3.1 Hiện tượng tương tự	55
2.2.3.2 Ứng dụng định luật tương tự cho dòng chảy hở.....	55
2.3 Các hàm toán học mô tả mối quan hệ giữa các dữ liệu	57
2.3.1 Một số thuật toán hồi quy	57
2.3.2 Tiêu chuẩn kiểm nghiệm kết quả tính toán	57
2.4 Lý thuyết cơ bản về mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên”	59
2.4.1 Khái quát chung.....	59
2.4.2 Đánh giá dữ liệu của nước nhảy và sự phù hợp với thuật toán Học máy	59
2.4.3 Phân tích giải thuật “Học Máy” trong nghiên cứu đặc trưng nước nhảy	60
2.4.4 Mô hình học máy “Cây quyết định”	61
2.4.5 Mô hình học máy “Rừng ngẫu nhiên”	62
2.5 Ứng dụng quy hoạch thực nghiệm trong nghiên cứu nước nhảy	63
2.5.1 Các đặc điểm của mô hình thí nghiệm đảm bảo điều kiện tương đồng với công trình thực tế.....	63
2.5.2 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy.....	64
2.5.3 Chiều dài khu xoáy của nước nhảy	67
2.5.4 Cấu tạo mô hình thí nghiệm	69
2.5.4.1 Mục đích thí nghiệm.....	69
2.5.4.2 Các phép đo đặc được thực hiện	69
2.5.4.3 Cấu tạo thí nghiệm	70
2.5.4.4 Đánh giá sai số mô hình	72
2.6 Phương pháp thí nghiệm và xử lý số liệu	73
2.6.1 Các trường hợp nghiên cứu thí nghiệm mô hình.....	73
2.6.2 Phương pháp thí nghiệm và thu thập dữ liệu thí nghiệm	74
2.6.2.1 Phương pháp thí nghiệm	74

2.6.2.2 Dữ liệu thí nghiệm mô hình	76
2.7 Mối quan hệ thực nghiệm giữa các đặc trưng thủy động trong nước nhảy.....	76
2.7.1 Cơ sở dữ liệu phân tích đặc trưng hình học nước nhảy.....	76
2.7.2 Ảnh hưởng số Froude đến độ sâu dòng chảy sau khu xoáy	77
2.7.3 Các đặc trưng ảnh hưởng đến chiều dài khu xoáy	77
2.7.3.1 Ảnh hưởng tỷ lệ độ sâu trước và sau khu xoáy đến chiều dài nước nhảy	77
2.7.3.2 Quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và số Froude.....	79
2.7.3.3 Quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và số Reynolds	80
2.7.3.4 Mối quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy với năng lượng dòng chảy	81
2.8 Kết luận Chương II.....	82
CHƯƠNG III – XÂY DỰNG CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG HÌNH HỌC CỦA NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH LẮNG TRỤ MẶT CẮT NGANG HÌNH THANG	83
3.1 Xây dựng công thức xác định độ sâu phân giới	83
3.1.1 Xây dựng công thức xác định độ sâu phân giới	83
3.1.2 Đánh giá về công thức xác định độ sâu phân giới.....	85
3.2 Xây dựng công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy .	86
3.2.1 Thiết lập phương trình xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy trên kênh hình thang	86
3.2.1.1 Các đặc trưng của mặt cắt ngang hình thang cân.....	86
3.2.1.2 Xây dựng phương trình về độ sâu dòng chảy khu xoáy của nước nhảy	87
3.2.2 Xây dựng công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	90
3.2.3 Xác định hệ số tỷ lệ động lượng khu xoáy của nước nhảy	93
3.2.4 Xây dựng phương pháp xác định độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy ..	94

3.2.5 Phân tích thực nghiệm về độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy trên kênh mặt cắt ngang hình thang.....	96
3.2.5.1 Tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	96
3.2.5.2 Xác định công thức thực nghiệm về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy	97
3.2.5.3 Đánh giá các công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy .	100
3.3 Xây dựng công thức xác định chiều dài nước nhảy trong kênh lắng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình thang.....	101
3.3.1 Xây dựng công thức bán thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy ..	101
3.3.1.1 Phân tích và đánh giá công thức tính chiều nước nhảy	101
3.3.1.2 Thiết lập công thức bán thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy	103
3.3.1.3 Kiểm tra và đánh giá công thức.....	104
3.3.2 Xác định công thức thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy	105
3.4 Xác định đặc trưng hình học nước nhảy bằng mô hình “Rừng ngẫu nhiên” ...	108
3.4.1 Xây dựng mô hình Rừng ngẫu nhiên	108
3.4.2 Xác định độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy.....	109
3.4.2.1 Cơ sở dữ liệu trong phân tích độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy	109
3.4.2.2 Kết quả tính toán độ sâu liên hiệp của nước nhảy theo mô hình Học máy	110
3.4.3 Xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy.....	112
3.4.3.1 Cơ sở dữ liệu trong phân tích chiều dài khu xoáy.....	112
3.4.3.2 Xác định chiều khu xoáy của nước nhảy theo mô hình Học máy...	113
3.5 Quy trình tính toán xác định các đặc trưng nước nhảy trong thiết kế công trình tiêu năng	115
3.5.1 Cơ sở xác định các kích thước hình học của nước nhảy	115
3.5.2 Các bước tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	117
3.5.3 Các bước tính chiều dài khu xoáy của nước nhảy.....	117
3.5.4 Quy trình xác định các đặc trưng thủy lực cho công trình áp dụng nước nhảy	117

3.6 Ứng dụng các công thức đề xuất tính toán nước nhảy sau đập tràn của hồ chứa Nà Sản – Sơn La.....	118
3.6.1 Các thông số cơ bản của công trình.....	118
3.6.2 Xác định các thông số thiết kế công trình tiêu năng	119
3.6.3 Tính toán thông số hình học của nước nhảy trong công trình tiêu năng sau đập tràn Nà Sản	119
3.6.3.1 Tính độ sâu sau nước nhảy	119
3.6.3.2 Tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy	120
3.6.3.3 Tiêu năng của công trình	121
3.7 Kết luận Chương III.....	122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	124
1. Các kết quả đạt được của luận án	124
2. Kiến nghị về các đóng góp của luận án.....	125
3. Tồn tại và hạn chế.....	126
4. Định hướng nghiên cứu tiếp theo	126
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	127
TÀI LIỆU THAM KHẢO	128
PHỤ LỤC	136

DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 1.1 Mặt cắt nghiên cứu chuyển động của dòng chảy	7
Hình 1.2 Đường quá trình năng lượng đơn vị mặt cắt	7
Hình 1.3 Quá trình nước nhảy trong kênh.....	9
Hình 1.4 Cấu tạo các thành phần dòng chảy của nước nhảy trên lòng dẫn có mặt ngang hình thang [58].....	9
Hình 1.5 Sơ đồ phân bố vận tốc dòng chảy trên mặt cắt dọc của nước nhảy [58] .	10
Hình 1.6 Cấu trúc dòng chảy xoáy trong nước nhảy ở thành bên của kênh hình thang với 3 loại mái dốc theo mô hình Flow 3D [29]	10
Hình 1.7 Sơ đồ tính độ sâu phân giới khi kéo dài thành dạng tam giác.....	15
Hình 1.8 Biểu đồ các trường hợp tính toán độ sâu phân giới của kênh có mặt cắt ngang hình thang cân so với giá trị đúng	18
Hình 1.9 Biểu đồ về tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy và số Froude theo hệ số M..	25
Hình 1.10 Mặt bằng và mặt cắt của cấu trúc nước nhảy trên đoạn kênh nối tiếp lòng dẫn hình thang cân sang lòng dẫn hình chữ nhật của SIAD (2018)[71]	27
Hình 1.11 Phối cảnh công trình thủy điện Hồi Xuân (nguồn VNECO).....	37
Hình 1.12 Mặt cắt ngang bể tiêu năng.....	37
Hình 1.13 Mặt bằng bể tiêu năng.	37
Hình 1.14 Cắt ngang bể tiêu năng	38
Hình 1.15 Kết cấu công trình hoàn thiện.....	38
Hình 1.16 Mặt bằng tổng thể xây dựng mô hình.....	38
Hình 2.1 Sơ đồ dòng tia và phân bố vận tốc của nước nhảy	45
Hình 2.2 Mối quan hệ động lượng, năng lượng với quá trình nước nhảy [27]	45
Hình 2.3 Sơ đồ dòng tia và mặt cắt ướt của nước nhảy sau đập tràn	51
Hình 2.4 Sơ đồ phân tích phương trình năng lượng trong nước nhảy.....	51
Hình 2.5 Sơ đồ phân tích Học máy cho dữ liệu trong nước nhảy	61
Hình 2.6 Sơ đồ phân tích mô hình Cây quyết định nhị phân	62
Hình 2.7 Cấu trúc thuật toán của cây quyết định nhị phân	62
Hình 2.8 Cấu trúc mô hình “Rừng ngẫu nhiên”	62
Hình 2.9 Máy thủy bình, mia đo độ sâu dòng chảy.....	69

Hình 2.10 Máng lường và kim đo để xác định lưu lượng	69
Hình 2.11 Sơ đồ mặt cắt dọc mô hình thí nghiệm.....	70
Hình 2.12 Mặt bằng thiết kế đầu mối tràn có cửa	71
Hình 2.13 Các mặt cắt ngang lòng dẫn có hệ số mái dốc $m = 1$	71
Hình 2.14 Lắp đặt, cân chỉnh đáy kênh dẫn đảm bảo đáy phẳng.....	71
Hình 2.15 Lắp đặt đập đầu mối và hoàn thiện trên mô hình với $b = 55\text{cm}$	71
Hình 2.16 Hệ thống van điều khiển thay đổi mực nước hạ lưu đập.....	71
Hình 2.17 Đập đầu mối và kênh hình thang có $b = 33,5\text{cm}$	71
Hình 2.18 Các vị trí đo cao độ mặt nước.....	75
Hình 2.19 Kim đo mực nước thượng lưu lòng hồ	75
Hình 2.20 Đo mực nước bằng MIA với kênh có $b = 55\text{cm}$	75
Hình 2.21 Đo số liệu mực nước từ MIA trên mô hình có $b = 33,5\text{cm}$	75
Hình 2.22 Hệ thống điều khiển mực nước và kim đo mực nước hạ lưu	75
Hình 2.23 Xác định vị trí cuối khu xoáy trên mô hình.....	75
Hình 2.24 Đo chiều dài khu xoáy của nước nhảy	75
Hình 2.25 Quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy với số Froude trước nước nhảy	77
Hình 2.26 Mối quan hệ giữa L_r/y_1 với tỷ số y_r/y_1	78
Hình 2.27 Quan hệ (L_r) với (y_r)	78
Hình 2.28 Quan hệ L_r/y_r với tỷ lệ độ sâu sau khu xoáy (y_r/y_1)	78
Hình 2.29 Biểu đồ quan hệ giữa L_r/y_1 với Fr_1	79
Hình 2.30 Biểu đồ quan hệ giữa L_r/y_1 với Fr_{D1}	79
Hình 2.31 Quan hệ giữa L_r/y_1 với số Reynolds (Re_1) trước nước nhảy	80
Hình 2.32 Mối quan hệ giữa chiều dài nước nhảy với tiêu năng dòng chảy.....	81
 Hình 3.1 Quan hệ giữa M_c và $g(M_c)$ theo dữ liệu nghiên cứu.....	84
Hình 3.2 So sánh độ sâu phân giới giữa giá trị tính toán và mẫu thử	85
Hình 3.3 Mặt cắt hình thang cân	86
Hình 3.4 Quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (Y) theo M_1 và Fr_{D1} ..	92
Hình 3.5 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy với Fr_{D1} khi $k = 0,92$	95
Hình 3.6 Biểu đồ giá trị tính toán và thực đo của độ sâu sau khu xoáy (y_r)	96

Hình 3.7 Biểu đồ tỷ lệ độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy giữa giá trị thực đo và tính theo công thức thực nghiệm	99
Hình 3.8 Mối quan hệ giữa giá trị thực đo và tính toán của độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy	100
Hình 3.9 Mối quan hệ giữa $\ln(Mn)$ với chiều dài khu xoáy của nước nhảy (Lr/y_1)	103
Hình 3.10 Chiều dài khu xoáy giữa giá trị thực đo và tính toán theo (3.50).....	105
Hình 3.11 Biểu đồ chiều dài nước nhảy với dữ liệu thực đo và tính toán theo công thức thực nghiệm (3.52)	107
Hình 3.12 Sơ đồ khối xây dựng mô hình Học máy	108
Hình 3.13 Cấu trúc thuật toán Least-Squares Boost của Friedman (2001) [20]	108
Hình 3.14 Các mã lệnh thực hiện chương trình học máy theo mô hình LS_Boost trong phần mềm Matlab 2020b	109
Hình 3.15 Dữ liệu phân tích Học máy	110
Hình 3.16 Biến mục tiêu trong Học máy.....	110
Hình 3.17 Các tham số đào tạo trong mô hình Học máy	111
Hình 3.18 Dữ liệu kiểm định dự báo của mô hình	111
Hình 3.19 Sơ đồ “Cây quyết định” khi phân tích độ sâu sau khu xoáy	111
Hình 3.20 Kết quả tính toán theo mô hình “Cây quyết định”	111
Hình 3.21 Kết quả dự báo của mô hình học máy “Rừng ngẫu nhiên”	111
Hình 3.22 Dữ liệu phân tích mô hình Học máy cho chiều dài khu xoáy	114
Hình 3.23 Kết quả phân tích mô hình Học máy cho chiều dài khu xoáy.....	114
Hình 3.24 Quy trình xác định đặc trưng hình học của nước nhảy ổn định	118

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Bảng tổng hợp phân loại nước nhảy	12
Bảng 1.2 Trường dữ liệu phân tích độ sâu phân giới (y_c) theo các công thức	17
Bảng 1.3 Công thức kinh nghiệm về tính chiều dài nước nhảy kênh chữ nhật.....	21
Bảng 1.4 Công thức kinh nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy	23
Bảng 2.1 Các thứ nguyên cơ bản.....	53
Bảng 2.2 Thứ nguyên của các thông số thủy lực đầu vào.....	54
Bảng 2.3 Đánh giá mức độ tương quan giữa các biến.....	58
Bảng 2.4 Các thông số đo đặc trên mô hình thí nghiệm vật lý	73
Bảng 2.5 Tổng hợp số liệu đo đặc đặc trưng nước nhảy theo các cấp lưu lượng	76
Bảng 2.6 Các thông số về đặc trưng hình học của nước nhảy	76
Bảng 3.1 Khoảng biến đổi của các thông số khảo sát đánh giá	84
Bảng 3.2 Tính toán độ sâu phân giới của kênh hình thang theo công thức (3.7).....	85
Bảng 3.3 Tính toán độ sâu phân giới của kênh hình thang theo công thức (3.9).....	85
Bảng 3.4 Đánh giá kết quả tính toán theo chỉ tiêu thống kê.....	86
Bảng 3.5 Phân tích kết quả tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy ...	91
Bảng 3.6 Dữ liệu thực nghiệm nghiên cứu về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy.....	93
Bảng 3.7 Giá trị tính toán độ sâu sau khu xoáy theo công thức (3.35)	94
Bảng 3.8 Các chỉ tiêu phân tích thống kê trong nghiên cứu hệ số k	94
Bảng 3.9 Giá trị tỷ số độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước với $k = 0,92$	95
Bảng 3.10 Tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo phương pháp lý thuyết.....	96
Bảng 3.11 Dữ liệu nghiên cứu xây dựng công thức thực nghiệm.....	97
Bảng 3.12 Dữ liệu kiểm định kết quả nghiên cứu.....	98
Bảng 3.13 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy nước nhảy theo công thức thực nghiệm	98
Bảng 3.14 Tính toán với dữ liệu kiểm tra về độ sâu chảy sau khu xoáy theo công thức thực nghiệm	98

Bảng 3.15 Các chỉ tiêu thống kê theo các phương pháp tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	99
Bảng 3.16 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo A.N. Rakhmanov (1930).....	100
Bảng 3.17 Phân tích dữ liệu thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy..	103
Bảng 3.18 Chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo công thức bán thực nghiệm .	104
Bảng 3.19 Kiểm tra công thức bán thực nghiệm theo dữ liệu kiểm định.....	104
Bảng 3.20 Kết quả tính toán phân tích dữ liệu chiều dài khu xoáy của nước nhảy	106
Bảng 3.21 Tính toán theo dữ liệu kiểm định cho công thức thực nghiệm	107
Bảng 3.22 Phân tích các chỉ tiêu đánh giá hồi quy về chiều dài khu xoáy	107
Bảng 3.23 Dữ liệu độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy để phân tích học máy	109
Bảng 3.24 Kết quả phân tích độ sâu liên hiệp nước nhảy từ mô hình học máy.....	112
Bảng 3.25 Dữ liệu chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo mô hình học máy.....	113
Bảng 3.26 Bảng dữ liệu kiểm tra của kết quả chạy mô hình về chiều dài khu xoáy	114
Bảng 3.27 Phân tích các chỉ tiêu đánh giá hồi quy về độ sâu sau khu xoáy và chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo mô hình “Học máy”.....	115
Bảng 3.28 Công thức tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	116
Bảng 3.29 Các công thức tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy.....	116
Bảng 3.30 Thông số đập tràn hồ chứa Chiềng Dong	118
Bảng 3.31 Bảng các thông số cơ bản để tính tiêu năng sau đập tràn	119
Bảng 3.32 Các thông số thủy lực của dòng chảy trước nước nhảy	120
Bảng 3.33 Các giá trị độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy	120
Bảng 3.34 Tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy.....	120
Bảng 3.35 Các trường tính toán chiều dài khu xoáy của nước nhảy khác	121
Bảng 3.36 Bảng tính tiêu năng cho nước nhảy sau đập	122

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Ý nghĩa
MAE	Sai số tuyệt đối trung bình (Mean Absolute Error – MAE)
MSE	Sai số bình phương trung bình (Mean squared error - MSE)
RMSE	Sai số chuẩn (Root Mean Square Error RMSE - Standard error)
MAPE	Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (mean absolute percentage error) (%)
R^2	Hệ số tương quan
ANN	Mạng thần kinh nhân tạo (Artificial neural networks)
GEP	Thuật toán mô phỏng Gen
GP	Lập trình di truyền (Genetic programming)
NN	Mạng thần kinh đa lớp (Multi-layer neural network)
USBR	Cục khai hoang Hoa kỳ
ε	Sai số giữa kết quả tính toán và thực đo (%)
SI	Hệ đo lường quốc tế
MH	Mô hình
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
MLT	Hệ cơ sở gồm khối lượng, chiều dài và thời gian
MLT θ	Hệ cơ sở gồm khối lượng, chiều dài, thời gian và nhiệt độ
Max	Giá trị lớn nhất
Min	Giá trị nhỏ nhất
CT	Công thức

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU CƠ BẢN

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
y	m	Độ sâu dòng chảy
y_c	m	Độ sâu dòng chảy phân giới
y_1	m	Độ sâu trước nước nhảy
y_r	m	Độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy
y_2	m	Độ sâu liên hiệp của nước nhảy
Y		Tỷ lệ độ sâu sau và trước của nước nhảy
z_c	m	Độ sâu trọng tâm của mặt cắt
i		Độ dốc đáy kênh dẫn
i_c		Độ dốc phân giới
J		Độ dốc mặt nước
L_J	m	Chiều dài nước nhảy
L_r	m	Chiều dài khu xoáy nước nhảy
Fr		Số Froude ứng với độ sâu dòng chảy y
Fr_D		Số Froude ứng với độ sâu thủy lực D
Q	m^3/s	Lưu lượng của dòng chảy
V	m/s	Vận tốc trung bình mặt cắt của dòng chảy
A	m^2	Diện tích mặt cắt ướt tại độ sâu dòng chảy y
A_c	m^2	Diện tích mặt cắt ướt ở độ sâu phân giới y_c
T	m	Chiều rộng mặt thoáng của kênh
b	m	Độ rộng đáy kênh dẫn
D	m	Độ sâu thủy lực ($D = A/T$)
m		Hệ số mái dốc của kênh dẫn
e	m	Năng lượng đơn vị mặt cắt/ độ nhám tuyệt đối
E	m	Năng lượng đơn vị dòng chảy
z	m	Khoảng cách từ điểm tính toán đến mặt chuẩn
p	N/m^2	Áp suất trung bình tại 1 điểm
ρ	Kg/m^3	khối lượng riêng của chất lỏng
F_i	N	Thành phần lực khối

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
α_o		Hệ số sửa chữa động lượng
α_o^*		Hệ số sửa chữa động lượng có xét đến quá trình xoáy rời
ζ		Hệ số rời dòng chảy khu xoáy
k		Tỷ lệ hệ số sửa chữa động lượng
α		Hệ số sửa chữa động năng
λ_N		Chuẩn tương tự của đại lượng N
n		Hệ số nhám manning
y_{cCN}	m	Độ sâu phân giới kênh chữ nhật
y_{ctr}	m	Độ sâu phân giới của kênh hình tam giác
M		Hệ số mở rộng mặt cắt của kênh hình thang, $M = m.y/b$
h_c	m	Tổn thất cột nước cục bộ
h_d	m	Tổn thất cột nước dọc đường
Re		Số Reynolds, $Re = V.R/\nu$
R	m	Bán kính thủy lực
We		Số Weber
ν	m^2/s	Hệ số nhớt động học
μ	Ns/m	Hệ số nhớt động lực
τ_o	N/m^2	Ứng suất tiếp thành rắn

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Nước nhảy là một hiện tượng thủy lực của dòng chảy hở, hiện tượng này được áp dụng rất nhiều trong thực tế, như tiêu năng dòng chảy sau công trình, xáo trộn khí vào nước, thiết kế bể nén bùn ở hệ thống xử lý nước thải, áp dụng trong tính toán thiết kế cống, cầu...

Nghiên cứu về nước nhảy là một vấn đề kinh điển, có lịch sử từ hàng trăm năm trước, người phát hiện hiện tượng nước nhảy đầu tiên là Leonardo da Vinci (1452-1519), sau đó Bidone (năm 1818-1819) đã mô tả kỹ hơn hiện tượng này. Bélanger (năm 1828) đã xây dựng được công thức tính độ sâu liên hiệp nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang hình chữ nhật và đánh dấu bước khởi đầu về phân tích hiện tượng nước nhảy. Nghiên cứu nước nhảy trên thế giới rất đa dạng, từ nghiên cứu lý thuyết đến thực nghiệm và kết quả cho ra rất nhiều các công thức lý thuyết, công thức bán thực nghiệm và công thức thực nghiệm với các đặc trưng tính toán khác nhau.

Ở Việt Nam, cũng có rất nhiều đề tài nghiên cứu và ứng dụng về nước nhảy, như nghiên cứu của Hoàng Tư An (2005) về nước nhảy đáy, Nguyễn Văn Đăng (1998) về quá trình nước nhảy nối tiếp chảy đáy; Nguyễn Văn Cung về nước nhảy sóng; Lê Thị Việt Hà (luận án tiến sĩ, 2018) về nước nhảy trong kênh dốc mở rộng... các nghiên cứu đã khai thác các đặc trưng cơ bản của nước nhảy trong các điều kiện khác nhau, từ đó đã có những áp dụng thực tế mang lại hiệu quả và lợi ích thiết thực.

Phân tích cho thấy, nghiên cứu về nước nhảy trong lòng dẫn mặt cắt ngang hình thang cân vẫn còn tương đối ít, công thức còn hạn chế và nhiều công thức hiện có vẫn chưa phù hợp trong tính toán (do tính chất đa dạng về mái dốc kênh, độ dốc lòng dẫn và các đặc trưng xoáy rối phức tạp). Mặt khác, nước nhảy trên lòng dẫn hình thang cân chủ yếu được nghiên cứu theo phương pháp thực nghiệm, các yếu tố ảnh hưởng đến đặc trưng nước nhảy cũng chưa được xem xét đầy đủ bằng các phương trình lý thuyết, như các nghiên cứu thực nghiệm về nước nhảy của Samir Kateb (Luận án tiến sĩ, 2014) đối với kênh đáy dốc có mặt cắt ngang hình thang (mô hình thực nghiệm có đáy $b = 20\text{cm}$ và mái dốc kênh $76,2^\circ$), nghiên cứu nước nhảy nối tiếp kênh hình thang (trên kênh có chiều rộng đáy $b = 20\text{cm}$, mái dốc 73°) với kênh chữ nhật

của SIAD Rafik (luận án tiến sĩ, 2018), hay nghiên cứu phân bố trường vận tốc trong nước nhảy trên kênh hình thang (mặt cắt ngang có đáy rộng $b = 20\text{cm}$) của Nobarian B.F. (2019)... đều dựa trên phân tích thực nghiệm về mối tương quan giữa các đặc trưng thủy lực của nước nhảy, mà chưa xây dựng được các tổ hợp bao gồm các yếu tố nghiên cứu gắn liền với cơ sở lý thuyết.

Trong thực tế, tiêu năng sau công trình đối với lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang cũng đã được triển khai ở một số công trình thực tế, như công trình tiêu năng sau đập tràn của Thủy điện Hồi Xuân (Thanh Hoá, 2005), đập tràn Nà Sản (Sơn La, 2018)... , nhưng các phương án tính toán, thiết kế đều dựa trên các công thức tính cho mặt cắt ngang chữ nhật, sau đó sử dụng thí nghiệm mô hình để điều chỉnh thiết kế kỹ thuật, điều này dẫn đến giữa tính toán ban đầu và thiết kế sau thí nghiệm có những sai lệch nhất định.

Bên cạnh đó, các công thức áp dụng cho tính toán các đặc trưng thủy động của nước nhảy trong kênh có mặt cắt hình thang vẫn còn hạn chế và chưa đảm bảo sự phù hợp khi áp dụng thực tế, đặc biệt bất lợi khi thiết kế công trình mà không có thí nghiệm mô hình để điều chỉnh thiết kế kỹ thuật. Điều này cho thấy việc nghiên cứu lý thuyết và kết hợp với thực nghiệm về nước nhảy trên kênh hình thang cần là một bài toán thiết thực.

Do vậy “**Nghiên cứu đặc trưng hình học của nước nhảy đáy trong kênh lăng trụ mặt cắt ngang hình thang**” mang nhiều ý nghĩa khoa học và là cơ sở cho áp dụng các đặc trưng nước nhảy trong tính toán thiết kế các công trình thủy lợi, công trình xử lý nước và thiết kế các công trình dân sinh khác.

2. Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu được định hướng theo các tiêu chí sau:

- + Xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy, như độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy, chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy trong kênh hình thang.
- + Đưa ra chỉ dẫn về tính toán các kích thước hình học của hiện tượng nước nhảy để thiết kế công trình tiêu năng có áp dụng nước nhảy hoàn chỉnh trong lòng dẫn mặt cắt ngang hình thang.

Nhiệm vụ nghiên cứu:

+ Giải hệ phương trình vi phân cơ bản Navier-Stokes, áp dụng kết quả nghiên cứu để phân tích nước nhảy trong kênh hình thang cân, từ đó xác định công thức lý thuyết tính độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy của nước nhảy.

+ Áp dụng phương trình năng lượng để xây dựng công thức bán thực nghiệm về chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy.

+ Thí nghiệm trên mô hình vật lý để xác định cơ sở dữ liệu, từ đó kiểm nghiệm các công thức lý thuyết và xác định các hệ số thực nghiệm trong các công thức lý thuyết, công thức bán thực nghiệm và xây dựng các công thức thực nghiệm về tính các đặc trưng hình học khu xoáy của nước nhảy.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: Nghiên cứu hiện tượng nước nhảy trong kênh lăng trụ, đáy bằng, không có mở rộng trên mặt bằng.

Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu nước nhảy sau đập tràn mặt cắt thực dụng trong kênh lăng trụ hình thang cân có hệ số mái dốc $m = 1$, đáy bằng, không có mở rộng trên mặt bằng trong điều kiện nước nhảy ổn định (số $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$).

4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

4.1 Cách tiếp cận của luận án

Tiếp cận mục tiêu nghiên cứu theo phương pháp lý thuyết và thực nghiệm. Trong đó, xây dựng các công thức theo hướng phân tích lý thuyết, với tất cả các nguyên nhân và đặc thù tác động lên quá trình nước nhảy. Sau đó sử dụng số liệu thực nghiệm để điều chỉnh các thông số trong công thức hoặc xây dựng công thức thực nghiệm phù hợp dựa trên cơ sở lý thuyết đã nghiên cứu.

4.2 Các phương pháp nghiên cứu

Phương pháp kế thừa: Tổng hợp tài liệu, đánh giá tổng quan các nghiên cứu liên quan ở trong nước và trên thế giới, kế thừa và sử dụng các dữ liệu có sẵn, đặc biệt là bộ dữ liệu của Wanoscheck R. và Hager W. (1989).

Phương pháp phân tích và tổng hợp lý thuyết:

Phân tích là nghiên cứu các tài liệu, lý luận khác nhau bằng cách phân tích chúng thành từng bộ phận để tìm hiểu sâu sắc về đối tượng.

Tổng hợp là liên kết từng mặt, từng bộ phận thông tin đã được phân tích tạo ra hệ thống lý thuyết đầy đủ và sâu sắc về đối tượng nghiên cứu. Điều này thể hiện trong việc áp dụng hệ phương trình Navier-Stokes và phương trình cân bằng năng lượng của dòng chảy để phân tích các đặc trưng thủy động của nước nhảy.

Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm: Nghiên cứu mô hình thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về động lực học sông biển - Viện Khoa học thủy lợi Việt Nam, sử dụng các dữ liệu thực nghiệm để kiểm chứng và hiệu chỉnh các công thức đã xây dựng.

Phương pháp phân tích thống kê: Sử dụng phần mềm của MS Excel 2019 và phần mềm IBM SPSS 26 để phân tích xử lý các thông tin số liệu thực nghiệm. Sử dụng các tiêu chuẩn trong phân tích dữ liệu thống kê (như MAPE, MSE, RMSE, R^2 ...) để đánh giá kết quả tính toán với số liệu thực đo.

Phương pháp chuyên gia: Để đảm bảo độ tin cậy của các phương pháp nghiên cứu và công thức đề xuất về các đặc trưng của nước nhảy, tác giả tiếp thu ý kiến từ các cuộc hội thảo, các buổi góp ý của chuyên gia để hoàn thiện nội dung nghiên cứu.

Phương pháp phân tích thứ nguyên: Sử dụng lý thuyết Pi (II) của Buckingham để phân tích xác định các mối quan hệ của các đặc trưng hình học của nước nhảy và các yếu tố ảnh hưởng, để xác định được các dữ liệu cần thu thập.

Phương pháp mô hình toán: Áp dụng mô hình toán dự báo các đặc trưng hình học của nước nhảy, nghiên cứu lần đầu tiên đã áp dụng mô hình Học máy “Cây quyết định” và “Rừng ngẫu nhiên” để dự báo độ sâu sau khu xoáy và chiều dài khu xoáy của nước nhảy trong kênh hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn

5.1 Ý nghĩa khoa học

- Luận án đã giải hệ phương trình Navier-stokes để xác định công thức tính độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy (y_1 , y_r) của nước nhảy trong kênh hình thang, đồng thời phân tích được ý nghĩa và giá trị tỷ lệ hệ số động lượng khu xoáy (k).

- Luận án đã xây dựng cơ sở khoa học về xác định chiều dài khu xoáy (L_r) của nước nhảy.

- Luận án đã áp dụng các công cụ hiện đại của công nghệ “Học máy” vào nghiên cứu xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy và đã đáp ứng được mục đích nghiên cứu về đặc trưng hình học của nước nhảy.

5.2 Ý nghĩa thực tiễn

- Kết quả nghiên cứu của luận án có độ chính xác và sự tin cậy cao, đồng thời góp phần làm rõ thêm về quy luật, đặc điểm và tính chất của nước nhảy ổn định trong kênh hình thang cân. Việc xác định được các công thức lý thuyết, công thức bán thực nghiệm và công thức thực nghiệm cho các đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình thang cân đã cho phép mở rộng hơn về việc áp dụng nước nhảy. Bên cạnh đó mở ra được nhiều định hướng phát triển kế tiếp.

- Luận án đã đề xuất quy trình tính các kích thước hình học của nước nhảy trong việc xác định thông số trong thiết kế công trình, phương pháp tính đảm bảo được các cơ sở khoa học và tính chính xác khi áp dụng.

6. Những điểm mới của luận án

+ Giải hệ phương trình Navier-Stokes với điều kiện nước nhảy ổn định ($Fr_1 = 4,0 \div 9,0$), từ đó xây dựng được công thức lý thuyết (3.36) và giá trị tỷ lệ hệ số động lượng (k) theo (3.27) về xác định độ sâu dòng chảy khu xoáy của nước nhảy trong kênh mặt cắt ngang hình thang cân, đáy bằng.

+ Xác định công thức về quy luật biến đổi chiều dài dòng chảy (3.40) theo phương trình năng lượng.

+ Nghiên cứu với nước nhảy ổn định ($Fr_1 = 4,0 \div 9,0$) trong kênh hình thang cân đáy bằng có mái dốc $m = 1$, đã đề xuất được các kết quả sau:

- Công thức lý thuyết (3.36) phù hợp khi có $M_1 \geq 0,2$ và giá trị tỷ lệ về hệ số động lượng dòng chảy khu xoáy $k = 0,92$ là tốt nhất cho công thức (3.36). Xây dựng được Bảng 3.9, Hình 3.5 và công thức thực nghiệm (3.39) để xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (y_r) của nước nhảy ổn định với mọi giá trị $M_1 = [0, 1]$.
- Thiết lập được công thức bán thực nghiệm (3.50), công thức thực nghiệm (3.53) có phạm vi áp dụng (3.54) về xác định chiều dài khu xoáy (L_r) của nước nhảy ổn định.

7. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và kiến nghị, Tài liệu tham khảo, Phụ lục thì Luận án gồm có 03 chương:

Chương I - Tổng quan về nước nhảy đáy

Các khái niệm cơ bản về nước nhảy đáy trong kênh hở, các nghiên cứu trong và ngoài nước về nước nhảy trên kênh lắng trụ (mặt cắt ngang hình chữ nhật và hình thang), từ đó phân tích ảnh hưởng của các yếu tố thủy động đến đặc trưng hình học của nước nhảy, làm cơ sở cho việc nghiên cứu và đề xuất các công thức mới.

Chương II – Cơ sở khoa học nghiên cứu các đặc trưng nước nhảy trên kênh mặt cắt hình thang

Trình bày các phương trình cơ bản để làm cơ sở cho nghiên cứu xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy, các lý thuyết về tương tự và mô hình hóa trong nghiên cứu thực nghiệm, các thuật toán hồi quy và đánh giá kiểm nghiệm kết quả phân tích dự báo. Nghiên cứu lý thuyết của mô hình “Học Máy” và phân tích sự phù hợp khi áp dụng vào nghiên cứu đặc trưng hình học của nước nhảy.

Bên cạnh đó, còn trình bày về áp dụng lý thuyết Pi để phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến các đặc trưng hình học của nước nhảy, xây dựng các mô hình vật lý thí nghiệm nước nhảy, từ đó xác định số liệu thí nghiệm cần thu thập và đánh mối quan hệ giữa các yếu tố thủy động có ảnh hưởng lẫn nhau trong nghiên cứu nước nhảy.

Chương III - Xây dựng công thức xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh lắng trụ mặt cắt ngang hình thang

Kết hợp với phân tích lý thuyết ở Chương II, đã giải bài toán xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy, xây dựng các công thức bán thực và thực nghiệm về các đặc trưng hình học của nước nhảy.

Sử dụng dữ liệu thực nghiệm kiểm nghiệm công thức lý thuyết, xác định các hệ số thực nghiệm trong công thức bán thực nghiệm và các công thức thực nghiệm, đồng thời áp dụng công nghệ Học máy “Rừng ngẫu nhiên” trong nghiên cứu các đặc trưng hình học của nước nhảy.

Ngoài ra, ứng dụng các công thức đã xây dựng vào tính toán các đặc trưng của nước nhảy trong việc xác định các thông số cơ bản cho một công trình thực tế.

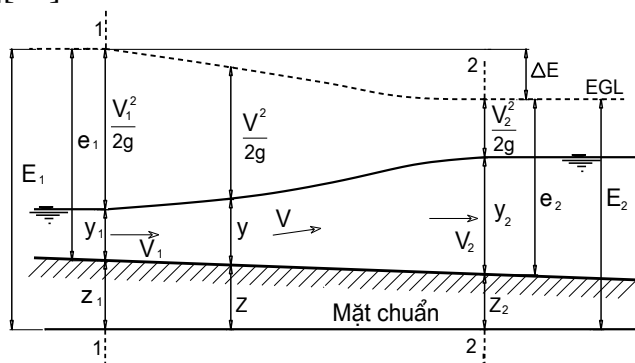
CHƯƠNG I - TỔNG QUAN VỀ NƯỚC NHẢY ĐÁY

1.1 Các khái niệm cơ bản

1.1.1 Dòng chảy ổn định không đều

Đó là dòng chảy mà các yếu tố thủy lực không phụ thuộc vào thời gian, nhưng biến đổi dọc theo chiều dòng chảy [16][82].

Trong thiết kế công trình, dòng chảy ổn định không đều được áp dụng cho phân tích và tính toán đối với dòng chảy hở, như dòng chảy trong kênh hở, dòng chảy qua đập tràn đập tràn, dòng chảy qua cống ...



Hình 1.1 Mặt cắt nghiên cứu chuyển động của dòng chảy

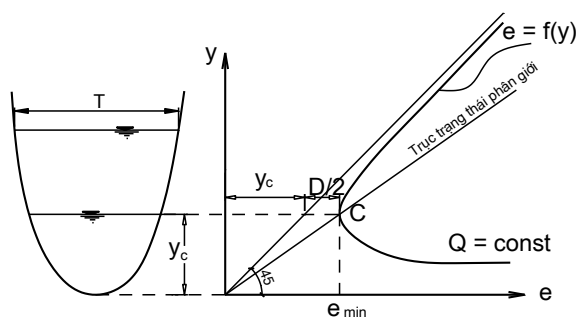
1.1.2 Năng lượng đơn vị dòng chảy

Trong dòng chảy, tổng năng lượng của một đơn vị trọng lượng chất lỏng được xác định bằng tổng các cột nước của mặt cắt so với mặt chuẩn (Hình 1.1) [27]. Năng lượng đơn vị dòng chảy (E) được xác định tại 1 mặt cắt thể hiện như sau[22][27]:

$$E = Z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1.1)$$

1.1.3 Năng lượng đơn vị của mặt cắt

Đó là năng lượng của một đơn vị trọng lượng chất lỏng của dòng chảy tại một mặt cắt nhất định tính đối với mặt chuẩn nằm ngang đi qua điểm thấp nhất của mặt cắt đó [27][82]. Năng lượng đơn vị mặt cắt (e) tại một vị trí được thể hiện như sau (Hình 1.1):



Hình 1.2 Đường quá trình năng lượng đơn vị mặt cắt

$$e = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (1.2)$$

1.1.4 Độ sâu phân giới

Với một lưu lượng đã cho và tại một mặt cắt xác định, độ sâu làm cho năng lượng đơn vị của mặt cắt có trị số nhỏ nhất được gọi là độ sâu phân giới (y_c) [82].

Tại độ sâu phân giới y_c có (Hình 1.2):

$$e_{\min} = y_c + \frac{\alpha Q^2}{2gA_c^3} \quad (1.3)$$

Từ (1.3) thấy y_c chỉ phụ thuộc lưu lượng dòng chảy (Q) và diện tích mặt cắt ướt (A). Độ sâu phân giới được sử dụng để đánh giá trạng thái dòng chảy (chảy xiết, chảy êm), xác định sự xuất hiện của nước nhảy và là một yếu tố trong tính toán các đặc trưng hình học khác của nước nhảy.

Công thức tổng quát xác định độ sâu phân giới [82]:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} \quad (1.4)$$

1.1.5 Số Froude

Số Froude được đề xuất bởi William Froude (năm 1870). Số Froude là đại lượng không thứ nguyên và được xác định như sau [45][82]:

$$Fr_D = \frac{\alpha V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (1.5)$$

Đối với kênh có mặt cắt ngang hình chữ nhật, thì độ sâu thủy lực (D) và độ sâu dòng chảy (y) như nhau ($D = y$), với kênh chữ nhật thì số Froude được thể hiện:

$$Fr = \frac{\alpha V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (1.6)$$

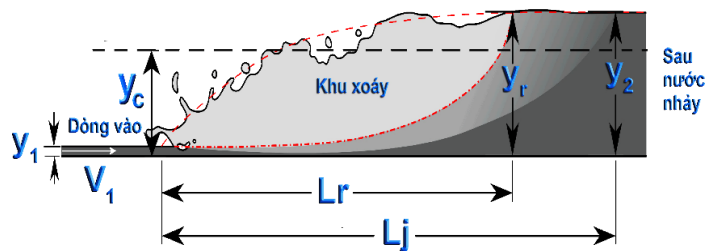
Lưu ý: Trong một số tài liệu ở Việt Nam, số Froude được tính theo V^2 , do đó cần chú ý về sự phù hợp của số Froude trong công thức và điều kiện áp dụng.

1.2 Hiện tượng nước nhảy

1.2.1 Khái quát về nước nhảy

Khi dòng chảy thay đổi từ trạng thái chảy xiết ($y < y_c$) sang trạng thái chảy êm ($y > y_c$), hay mực nước nhanh chóng thay đổi từ mực nước thấp sang mực nước cao trong một khoảng cách ngắn, khi đó sẽ dẫn đến sự thay đổi đột ngột của đường mặt nước với sự chuyển động rối có mạch động lớn và năng lượng dòng chảy bị tiêu hao

mạnh, hiện tượng này gọi là “Nước nhảy”. Hiện tượng nước nhảy được quan sát thấy ở sau cánh cửa cống điều tiết nước, chân đập tràn hoặc nơi độ dốc kênh ($i > i_c$) đột ngột chuyển sang dạng phẳng hơn ($i < i_c$) [37][82].



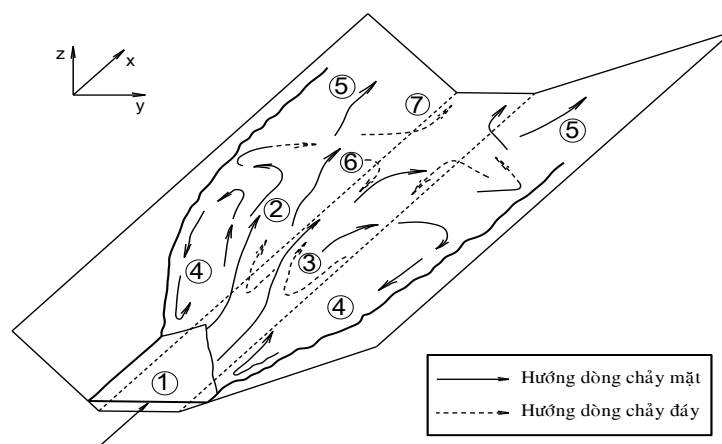
Hình 1.3 Quá trình nước nhảy trong kênh

Như vậy: “Nước nhảy là sự mở rộng đột ngột của dòng chảy từ độ sâu nhỏ hơn độ sâu phân giới sang độ sâu lớn hơn độ sâu phân giới” [1][82].

Đặc điểm phân biệt của nước nhảy với dòng chảy ổn định không đều, là do sự tồn tại của “Khu xoáy”, đây là khu vực có dòng chảy ngược chiều so với hướng vận tốc dòng chính và tạo thành khu vực “xoáy” [1]. Khả năng tiêu năng của nước nhảy phụ thuộc vào đặc điểm và cấu tạo của khu xoáy.

1.2.2 Cấu trúc nước nhảy đáy trong kênh hình thang

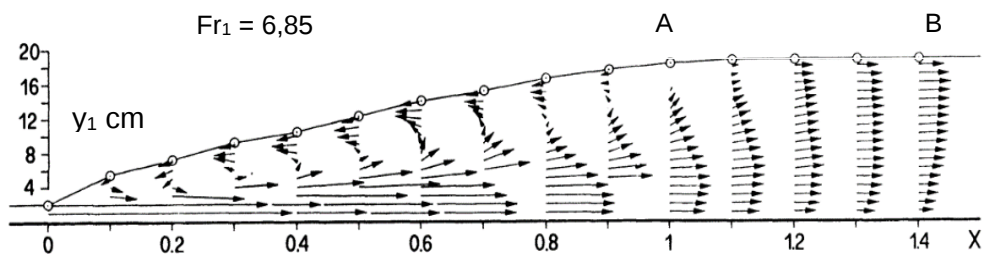
Nước nhảy có thể được phân thành nhiều dạng, như nước nhảy phẳng (nước nhảy trên kênh chữ nhật) hoặc nước nhảy không gian (khi mặt cắt dòng chảy biến đổi hoặc độ dốc đáy khác không). Còn nước nhảy trên kênh hình thang đáy bằng là loại nước nhảy “bán không gian”, vì cấu trúc nước nhảy ngoài biến đổi dọc theo chiều dòng chảy, còn biến đổi theo phương ngang trên bề mặt mái dốc, tức là các phần tử chất lỏng chuyển động trên mái dốc trong khu vực nước nhảy theo 3 phương của hệ trục Oxyz (Hình 1.4), còn theo chiều lòng dẫn chỉ phụ thuộc theo phương x [58].



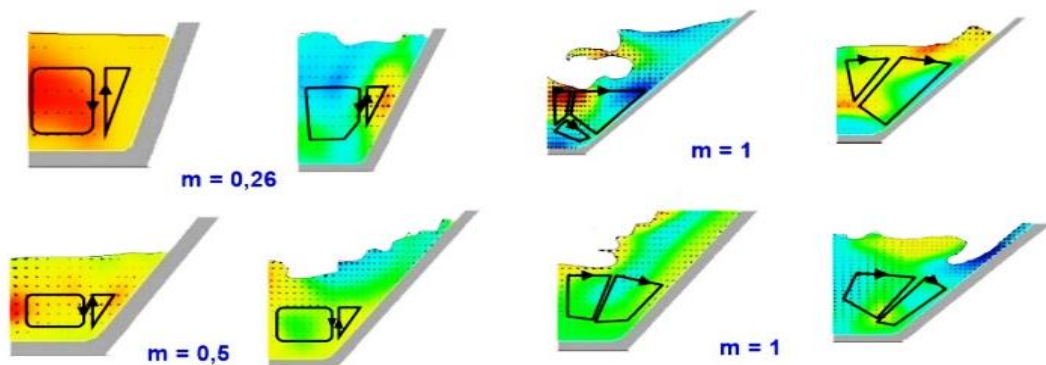
Hình 1.4 Cấu tạo các thành phần dòng chảy của nước nhảy trên lòng dẫn có mặt ngang hình thang [58]

Từ sơ đồ Hình 1.4, cho thấy cấu trúc dòng chảy của hiện tượng nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang được mô tả như sau [30][58]:

- + Khu vực ① có vận tốc lớn, đây là khu vực dòng chảy trước nước nhảy.
- + Khu vực ②, có các dòng chảy chuyển động từ dưới lên và tạo ra khu vực dòng chảy phân tán mạnh.
- + Khu vực ③, các dòng tia ở đáy do tác dụng quán tính nên tạo thành hệ thống đường dòng tách đáy và tạo thành một khu “xoáy” ở đáy.
- + Khu vực ④, phần dòng chảy ở trên bề mặt chuyển động ngược về phía thượng lưu và tạo thành khu “xoáy” cả ở dòng chảy chính và khu vực hình nêm ở mái dốc tạo thành khu vực nước nhảy.
- + Khu vực ⑤, phần dòng chính của dòng chảy vẫn tiếp tục chuyển động về phía hạ lưu.
- + Khu vực ⑥, phần đáy dòng chảy chuyển động dọc theo các mái dốc và khu vực dòng cuộn ở đáy tạo thành khu chuyển động từ dưới lên.
- + Khu vực hạ lưu ⑦, dòng chảy không tham gia vào khu xoáy cuộn nhưng lại có ảnh hưởng trực tiếp đến đuôi nước nhảy.



Hình 1.5 Sơ đồ phân bố vận tốc dòng chảy trên mặt cắt dọc của nước nhảy [58] .



Hình 1.6 Cấu trúc dòng chảy xoáy trong nước nhảy ở thành bên của kênh hình thang với 3 loại mái dốc theo mô hình Flow 3D [29]

Như vậy, nước nhảy trên kênh hình thang cân, ngoài dòng xoáy cuộn trên bề mặt dòng chảy chính (tương tự nước nhảy phẳng), còn có các dòng xoáy cuộn trên bề mặt các mái dốc kênh, các dòng chảy đáy và mặt đan xen lẫn nhau, tạo nên quá trình xáo trộn phức tạp ở khu vực “xoáy cuộn” của nước nhảy. Các nghiên cứu của Wanoscheck R. và Hager W. (1989)[58], Hager W. (1992)[30], Bahador Fatehi Nobarian và cộng sự (2019)[29] đã biểu thị đầy đủ về đặc trưng nội bộ dòng chảy và mô phỏng quá trình biến đổi trường vận tốc trong khu xoáy, nhưng các nghiên cứu về xác định đặc trưng hình học nước nhảy vẫn còn nhiều vấn đề cần mở rộng với các phân tích lý thuyết và thực nghiệm.

Đối với cấu trúc nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang chữ nhật, sẽ không xuất hiện dòng chảy xoáy trên bề mặt mái dốc, các đặc tính dòng xoáy cuộn và dòng chảy 2 pha (khí và lỏng) trên bề mặt dòng chính tương tự như trên kênh hình thang. Như vậy, khả năng rơi của nước nhảy trên kênh chữ nhật sẽ nhỏ hơn kênh hình thang, dẫn tới khả năng tiêu năng sẽ thấp hơn so với kênh hình thang.

Các đặc trưng hình học cơ bản của nước nhảy (Hình 1.3) bao gồm:

- + Độ sâu phân giới (y_c);
- + Độ sâu trước nước nhảy (y_1): Độ sâu dòng chảy ở vị trí bắt đầu nước nhảy, vị trí này đã được thống nhất trong nhiều nghiên cứu khác nhau [1];
- + Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (y_r): Độ sâu tại vị trí kết thúc của khu xoáy, độ sâu này được xác định dựa vào quan sát thực nghiệm và đặc trưng phân bố lưu tốc trên mặt cắt ngang (ví dụ như điểm A ở Hình 1.5).
- + Độ sâu liên hiệp của nước nhảy (y_2): Độ sâu tại vị trí kết thúc khu xoáy, mà ở đó đặc trưng về lưu tốc trở nên ổn định (ví dụ như điểm B ở Hình 1.5). Vị trí này rất khó xác định, thường dựa vào đặc trưng của đường mặt nước và sự ổn định của dòng chảy.
- + Chiều dài khu xoáy của nước nhảy (L_r): Khoảng cách từ chân nước nhảy đến vị trí kết thúc khu xoáy ở độ sâu y_r .
- + Chiều dài nước nhảy (hay chiều dài tuyệt đối của nước nhảy, L_j): Khoảng cách từ chân nước nhảy đến vị trí độ sâu liên hiệp (y_2) của nước nhảy.

1.3 Phân loại nước nhảy

Có nhiều phương pháp phân loại nước nhảy khác nhau, mỗi phương pháp đều có đặc điểm riêng về nghiên cứu và đánh giá nước nhảy. Một số phương pháp phân loại nước nhảy được thể hiện như sau:

- + Phân loại theo hình dạng của nước nhảy;
- + Phân loại theo tỷ số sau và trước nước nhảy (y_2/y_1);
- + Phân loại dựa vào số Froude trước nước nhảy.

Trong nghiên cứu ở đây, sử dụng phương pháp phân loại nước nhảy thường dùng theo số Froude trước nước nhảy. Các loại nước nhảy được mô tả như sau [82]:

- + *Nước nhảy sóng*: Mặt nước có dạng hình sóng.
- + *Nước nhảy yếu*: Mặt nước phát triển các xoáy cuộn nhỏ, mặt nước hạ lưu tương đối phẳng, vận tốc dòng chảy gần ổn định, tổn thất năng lượng nhỏ.
- + *Nước nhảy dao động*: Tia nước đi từ đáy lên bề mặt và dao động trở đi trở lại không có chu kỳ cố định, tạo sóng lớn và gây phá hoại lên bờ kênh.
- + *Nước nhảy ổn định*: Ở hạ lưu, điểm đầu xoáy cuộn nơi có vận tốc cao, tia nước có xu hướng thẳng hàng tại cùng một mặt cắt. Nước nhảy có sự cân bằng năng lượng và hiệu suất tốt nhất.
- + *Nước nhảy mạnh*: Vận tốc tia nước lớn, liên tục tạo ra xoáy trên bề mặt nước nhảy, tạo ra sóng ở hạ lưu, có hiệu quả tiêu hao năng lượng lớn.

Nước nhảy được tổng hợp và phân loại theo số Froude tại Bảng 1.1 như sau:

Bảng 1.1 Bảng tổng hợp phân loại nước nhảy

Bradley, Peterka (1957) [19], Hager (1992) [30]		Montes (1998) [74]		Chanson (2004) [23], V.T Chow (2009)[82]		Hiệu quả tiêu năng (%)
Fr ₁	Nước nhảy	Fr ₁	Nước nhảy	Fr ₁	Nước nhảy	
1.0 ÷ 1.7	Không có xoáy	1.2 ÷ 2.0	Sóng	1 ÷ 1.7	sóng	< 5
1.7 ÷ 2.5	Chuẩn bị	2.0 ÷ 4.0	Dao động	1.7 ÷ 2.5	yếu	5 ÷ 15
2.5 ÷ 4.5	Chuyển tiếp	4.0 ÷ 9.0	ổn định	2.5 ÷ 4.5	dao động	15 ÷ 45

Bradley, Peterka (1957) [19], Hager (1992) [30]		Montes (1998) [74]		Chanson (2004) [23], V.T Chow (2009)[82]		Hiệu quả tiêu năng (%)
Fr ₁	Nước nhảy	Fr ₁	Nước nhảy	Fr ₁	Nước nhảy	
4.5 ÷ 9.0	Ổn định			4.5 ÷ 9.0	ổn định	45 ÷ 70
> 9.0	Không ổn định	> 9.0	Tiêu năng lớn	> 9.0	mạnh	70 ÷ 85

Phạm vi nghiên cứu nước nhảy được sử dụng là trường hợp “nước nhảy ổn định” có số Froude trước nước nhảy được đề xuất từ 4,0 đến 9,0.

1.4 Các nghiên cứu về nước nhảy trên thế giới và ở Việt Nam

1.4.1 Nghiên cứu nước nhảy trên thế giới

1.4.1.1 Nhận diện về nước nhảy

Nước nhảy lần đầu tiên được Leonardo da Vinci (1452-1519) đề xuất vào thế kỷ 16, khi đó ông chỉ mô tả lại hiện tượng dòng chảy trong thực tế [74].

Năm 1818-1819, Giorgio Bidone mô tả bằng hiện tượng dòng chảy có sự nhảy vọt về độ sâu, mà chưa có các lý luận, nghiên cứu đánh giá khoa học cụ thể [23].

Năm 1828, Bélanger đã xây dựng công thức xác định độ sâu liên hiệp của nước nhảy, đồng thời đánh dấu sự ra đời cho nghiên cứu và ứng dụng của nước nhảy [82].

Nước nhảy được nhận diện bao gồm các đặc trưng hình học cơ bản, như độ sâu phân giới (y_c), độ sâu liên hiệp (y_1, y_2) và chiều dài nước nhảy (L_j).

1.4.1.2. Độ sâu phân giới dòng chảy ổn định không đều trong kênh hình thang

Xuất phát từ công thức tổng quát (1.4), phân tích cho kênh có mặt cắt ngang chữ nhật, công thức lý thuyết về độ sâu phân giới như sau [45][82]:

$$y_{cCN} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (1.7)$$

Đối với kênh mặt ngang hình tam giác cân [45][82]:

$$y_{ctr} = \left(\frac{2\alpha Q^2}{gm^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (1.8)$$

Đối với kênh hình thang cân, độ sâu phân giới xác định theo phương trình cơ bản (1.4) sẽ gặp một phương trình bậc 6, tương đối phức tạp và không xác định được công thức tổng quát.

Nghiên cứu về độ sâu phân giới của kênh hình thang được thể hiện như sau:

a. Phương pháp thử dần và đồ thị hàm số

Từ phương trình cơ bản (1.4), vẽ đồ thị hàm số $e = f(y)$, từ đó xác định giá trị độ sâu phân giới y_c tại nơi có giá e nhỏ nhất ($e_{\min}$).

Từ phương trình cơ bản (1.4), giải bằng cách tìm nghiệm gần đúng theo phương pháp thử dần hoặc sử dụng công cụ phần mềm tin học.

b. Phương pháp số

Sử dụng phương pháp Newton – Raphson, hoặc phương pháp mạng thần kinh (ANN) để tìm công thức tính độ sâu phân giới. Các nghiên cứu như sau:

+ Công thức theo Zhengzhong Wang (1998) [86]

Áp dụng phương pháp Newton-Raphson, công thức tính độ sâu phân giới được đề xuất như sau.

$$y_c = \frac{b}{2m} \left(\sqrt{1 + 4K \left\{ 1 + 4K \left[1 + 4K(1 + 4K)^{1/5} \right]^{1/6} \right\}^{1/6}} - 1 \right) \quad (1.9)$$

với $K = \alpha m^3 Q^2 / (gb^5)$

+ Công thức Vatankhah và Easa (2011) [83]

$$y_c = 0,25 \frac{b}{m} \varepsilon_c (1 + 0,2722 \varepsilon_c^{1,041})^{-0,339} \quad (1.10)$$

với $\varepsilon_c = 4.K^{1/3}$ có điều kiện $0 \leq \varepsilon_c \leq 0,25$

+ Công thức Vatankhah (2013) [84]

$$\frac{m.y_c}{b} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{5t_{c0}^{0,864} + 1}{6t_{c0}^{0,720}} \right)^3 \quad (1.11)$$

với $t_{c0} = 1 + 1,161 \varepsilon_c (1 + 0,666 \varepsilon_c^{1,041})^{0,734}$

+ Công thức H. Arvanaghi, Gh. Mahtabi, M. Rashidi (2015) [34]

$$\frac{m.y_c}{b} = -1,55K^{0,06} + 1,68K^{0,18} + 0,644 \quad (1.12)$$

+ Công thức Tiejie Cheng, Jun Wang, Jueyi Sui (2018) [62]

Áp dụng phương pháp chia đôi (phương pháp dây cung của Newton), các tác giả xây dựng được công thức tính độ sâu phân giới cho kênh hình thang bất kỳ:

$$y_{c,s+1} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2 [(m_1 + m_2) y_{c,s} + b]}{g \cdot \cos \theta}} / \left[\frac{(m_1 + m_2) y_{c,s} + b}{2} \right] \quad (1.13)$$

Đây là công thức tính đúng dần và đưa thêm thành phần độ dốc đáy lòng dẫn ($\cos \theta$) để phân tích tính toán, do đó không tính trực tiếp mà phải tính nhiều lần cho đến khi $y_{c,s+1} \approx y_{c,s}$, nhưng lại áp dụng cho kênh hình thang có mái dốc bất kỳ.

+ Công thức của Farzin Salmasi (2020) [28]

Ứng dụng công nghệ mạng thần kinh (ANN) phân tích chuỗi số liệu thu được công thức tính độ sâu phân giới với hệ số tương quan sai số R^2 lần lượt của công thức (1.14) và (1.15) lần lượt là 0,998 và 0,996 [28].

Các công thức như sau:

$$y_c = 0,856 \left(\frac{Q}{b} \right)^{0,473} \left(\frac{1}{g^{1/3} m^{0,291}} \right)^{0,242} - 0,083 \left(\frac{b}{m} \right) \quad (1.14)$$

Hoặc

$$y_c = -0,048 \left(\frac{m \cdot Q^{4/3}}{b^{7/3} g^{2/3}} \right) + 0,796 \left(\frac{m \cdot Q^{2/3}}{b^{5/3} g^{1/3}} \right) \quad (1.15)$$

c. Phương pháp bán thực nghiệm

Sử dụng phương pháp phân tích lý thuyết, kết hợp cơ sở dữ liệu kết quả độ sâu phân giới chính xác để xác định công thức tính độ sâu phân giới.

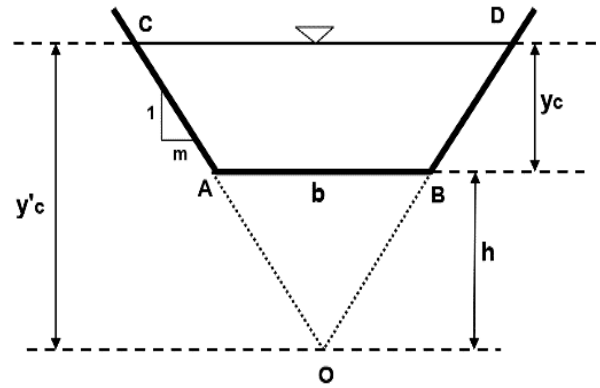
+ Công thức H. Arvanaghi, G. Mahtabi, M. Rashidi (2015) [34]

Tác giả kéo dài hai mái kênh hình thang cân chuyển thành kênh có mặt cắt tam giác cân, sau đó tính tỷ lệ

giữa các mặt cắt để xây dựng công thức độ sâu phân giới, hệ số của công thức được xác định tương quan giữa giá trị phân tích theo công thức và giá trị thực:

$$\frac{y_c}{y_c''} = \frac{2,57 \times (Q''/Q)}{1,53 + (Q''/Q)} \quad (1.16)$$

trong đó: $Q'' = Q + Q'$



Hình 1.7 Sơ đồ tính độ sâu phân giới khi kéo dài thành dạng tam giác

Q: Lưu lượng dòng chảy kênh hình thang để tính độ sâu phân giới (m^3/s)

Q': Lưu lượng dòng chảy của kênh tam giác phía dưới (m^3/s)

$$y_c'' = y_{CTr}' - h = y_{CTr}' - b/(2m)$$

$$y_{CTr}' \text{ được tính như sau: } y_{CTr}' = \left(\frac{2\alpha Q'^2}{gm^2} \right)^{1/5}$$

Sai số tính toán được tác giả xác định vào khoảng 1,34% [34].

d. Phương pháp thực nghiệm

Kể đến các công thức của:

+ Công thức Agorôtskin (liên xô cũ) [1]:

$$y_c = \left(1 - \frac{\sigma_N}{3} + 0,105\sigma_N^2 \right) y_{cCN} \quad (1.17)$$

$$\text{với: } \sigma_N = \frac{my_{cCN}}{b}$$

Công thức của Agorôtskin cho thấy nếu kênh hình thang cân mà $m = 0$ thì công thức trở về công thức tính kênh chữ nhật. Tuy nhiên công thức này sau khi phân tích với các thông số bất kỳ thì có sai số tính toán tương đối lớn.

+ Công thức Straub (1982) [16]:

$$y_c = 0,81 \left(\frac{\Psi}{m^{0,75} b^{1,25}} \right)^{0,27} - \frac{b}{30m} \quad (1.18)$$

$$\text{Với: } \Psi = \frac{\alpha Q^2}{g}$$

Công thức thực nghiệm (1.18) có kết quả tính tương đối chính xác với điều kiện $0,1 < Q/b^{2,5} < 4,0$, nếu $Q/b^{2,5} < 0,1$ được tính theo kênh chữ nhật.

+ Công thức Swamee P.K. (1993) [66]

$$y_c = \left[\left(\frac{gb^2}{Q^2} \right)^{0,7} + \left(\frac{gm^2}{2Q^2} \right)^{0,42} \right]^{-0,476} \quad (1.19)$$

Công thức của Swamee nếu tính cho kênh chữ nhật ($m = 0$) thì y_c cho số mũ $0,224 < 1/3$, công thức này không áp dụng cho trường hợp kênh chữ nhật.

Bảng 1.2 Trường dữ liệu phân tích độ sâu phân giới (y_c) theo các công thức

TT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Max	Min
1	Lưu lượng	Q	m ³ /s	100	1
2	Chiều rộng đáy	b	m	10	1
3	Mái dốc kênh	m	-	2,0	0,5
4	Độ sâu phân giới	y_c	m	3,7	0,28

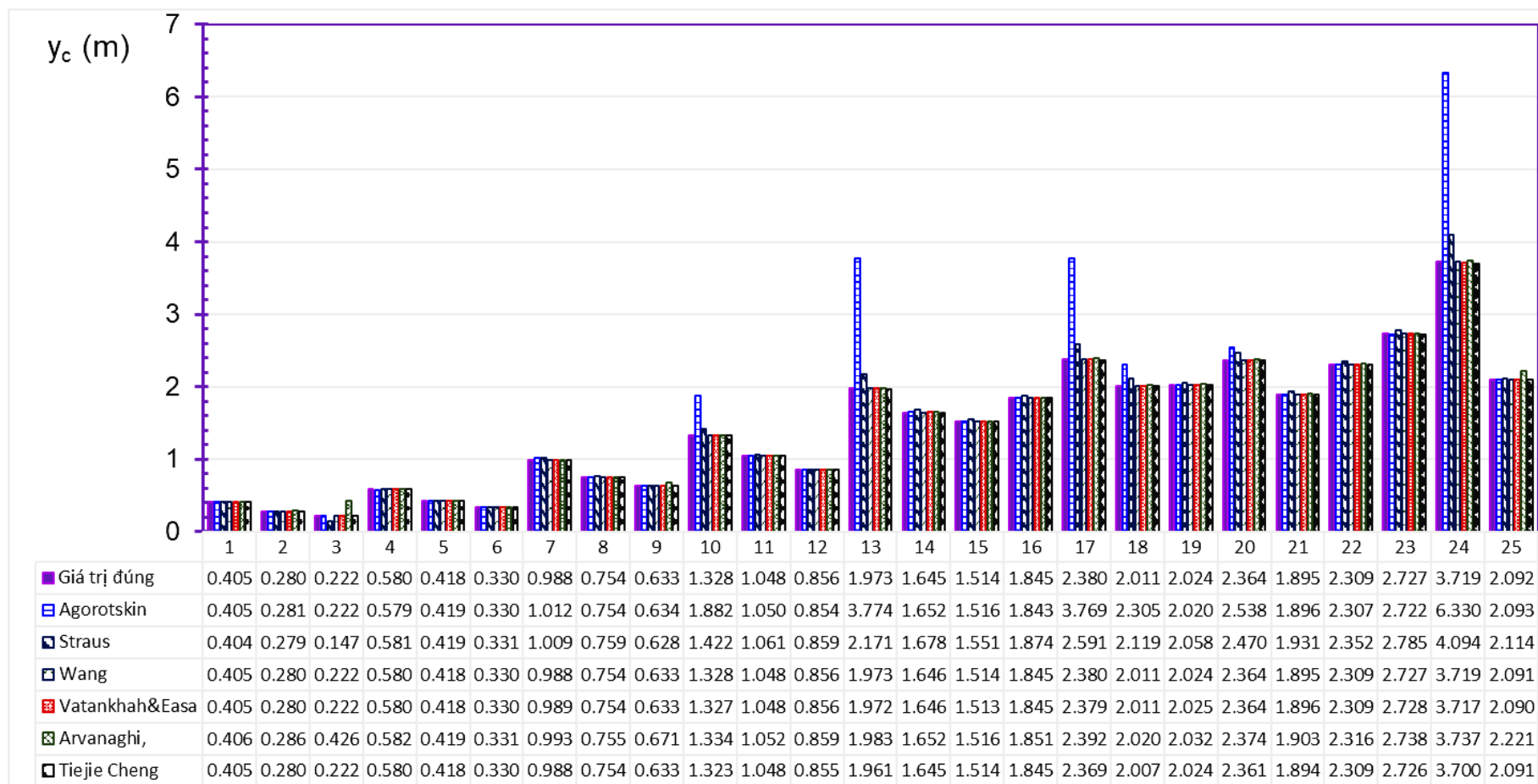
(Chi tiết tại phụ lục 6.1)

Độ sâu phân giới y_c được xác định bằng phương pháp thử dần theo công thức (1.4), gọi đây là “Giá trị đúng”, các công thức xác định độ sâu phân giới tốt sẽ cho kết quả càng gần với “Giá trị đúng” và sai số ổn định (không có các sai số đột ngột tăng cao).

Theo phân tích đánh giá tại Hình 1.8 với 25 điểm kiểm nghiệm (các giá trị thể hiện tại Phụ lục 6.1) cho thấy, công thức Tiejie Cheng và cs (2018) có kết quả tốt, nhưng cần phải lặp lại thử dần ít nhất 4 lần. Công thức của Wang (1998), Vatankhah and Easa (2011) và Vatankhah (2013) có sai số tối đa nhỏ nhất, lần lượt 0,06% ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 2\text{m}$, $m = 1$), 0,1% và 0,05 ($Q = 110 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 10\text{m}$ và $m = 0,5$). Công thức F. Salmasi (2020) còn có giá trị âm và sai số lớn nhất lên tới 124% ($Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 3\text{m}$ và $m = 0,5$), các kết quả tính toán không ổn định, sai số biến động lớn.

Nghiên cứu cho một số công thức khác cho thấy có những sai số đột biến lớn, như công thức của Agorotskill (1930) cho sai số lớn nhất đến 91,28% ($Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 1\text{m}$ và $m = 1$) và nhiều giá trị tính toán có sai số đột biến lớn khác so với giá trị chính xác, công thức Straub (1982) có sai số lớn nhất là 33,87% ($Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 3\text{m}$, $m = 0,5$) và H. Arvanaghi và cộng sự (2015) có xuất hiện kết quả tính toán với sai số lớn nhất tới 6% ($Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 3\text{m}$, $m = 0,5$ và $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 10\text{m}$, $m = 0,5$).

Các công thức tính độ sâu phân giới ở trên rất đa dạng, mỗi công thức có đặc trưng riêng và điều kiện sử dụng. Cần có các công thức đơn giản và đảm bảo sai số cho phép để thuận lợi hơn trong nghiên cứu nước nhảy.



Hình 1.8 Biểu đồ các trường hợp tính toán độ sâu phân giới của kênh có mặt cắt ngang hình thang cân so với giá trị đúng

1.4.1.3. Nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang hình chữ nhật

a. Độ sâu liên hiệp nước nhảy

Nghiên cứu đối với kênh nhân, mặt cắt ngang hình chữ nhật, độ sâu liên hiệp của nước nhảy được xác định như sau:

① Phương pháp giải tích

Belanger (1828) đã phân tích định luật bảo toàn động lượng đối với nước nhảy trên kênh chữ nhật [1][82], xác định được công thức tính độ sâu liên hiệp nước nhảy:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{y_{cCN}}{y_1} \right)^3} - 1 \right) \quad (1.20)$$

Xét tương tự theo Fr_2 có:

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{y_{cCN}}{y_2} \right)^3} - 1 \right) \quad (1.21)$$

Công thức (1.20) và (1.21) dùng để tính độ sâu liên hiệp nước nhảy trong kênh chữ nhật.

② Phương pháp bán thực nghiệm

+ Theo Rajaratnam (1965) [16] đề xuất công thức như sau:

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^3 - (1 - \varepsilon + 2Fr_1^2) \left(\frac{y_2}{y_1} \right) + 2Fr_1^2 = 0 \quad (1.22)$$

trong đó: ε là hệ số lực cắt đáy không thứ nguyên

Phương trình sẽ được ảnh hưởng điều kiện dòng rối đến độ sâu liên hiệp nước nhảy, tuy nhiên việc xác định ε dựa vào thực nghiệm.

+ Nghiên cứu của Hager (1992) [30]

Dựa trên công thức của Benglanger (1828), Hager W.(1992) đã phân tích dữ liệu thực nghiệm cho nước nhảy trên kênh chữ nhật và rút gọn công thức tính độ sâu liên hiệp nước nhảy như sau:

$$Y = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \approx \sqrt{2}Fr_1 - \frac{1}{2} \quad (1.23)$$

với các giá trị $Fr_1 > 3$

+ Theo Ead và Rajaratnam (2002) [26]

Căn cứ vào phân tích phương trình động lượng và đề xuất:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - (2 + Fr_1^2 - 2\mu Fr_1^2) \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + 2Fr_1^2 = 0 \quad (1.24)$$

Xem xét giá trị μ cho cả kênh đáy nhẵn và đáy nhám theo công thức:

$$\mu = 0,16Fr_1^2 - 0,80Fr_1 + 1$$

+ Theo Sarma và Newnham (1975) [16], đã sử dụng giá trị hệ số sửa chữa động năng $\alpha = 1,045$ để tính toán và đề xuất:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 10,4Fr_1^2} - 1 \right) \quad (1.25)$$

+ Nghiên cứu thực nghiệm của Harry Edmar Schulz và cộng sự (2015) [33] qua các dữ liệu của các tác giả: Hager W.H. (1992)[30], Peterka A.J. (1984)[54] và Marques M.G. (1997)[43] đã cho công thức tính độ sâu liên hiệp nước nhảy:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1,29Fr_1 - 0,116 \quad (1.26)$$

Như vậy, độ sâu liên hiệp nước nhảy đối với kênh lắng trụ có mặt cắt ngang hình chữ nhật khi xét trường hợp không có ảnh hưởng lực cản được tính theo Bélanger (1828), nhưng khi xem xét cụ thể các ảnh hưởng tới quá trình nước nhảy thì còn nhiều vấn đề cần được xem xét, điều này cho thấy vấn đề ảnh hưởng dòng chảy rối đến độ sâu liên hiệp nước nhảy cần được nghiên cứu và đánh giá sâu hơn.

b. Chiều dài nước nhảy

Chiều dài nước nhảy là một thông số quan trọng trong thiết kế tiêu năng cho công trình, nó được xác định từ vị trí bắt đầu nước nhảy đến điểm kết thúc nước nhảy. Trong thực tế có thể quan sát được rõ ràng khu xoáy của nước nhảy, điều này thể hiện qua đặc trưng đường mặt nước, sự xuất hiện bọt khí ngược dòng... Còn điểm mà dòng chảy ổn định sau nước nhảy, khó xác định, cần đo đạc dữ liệu thực nghiệm rất chi tiết và còn phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm quan sát thực nghiệm.

Các nhà khoa học nghiên cứu về vấn đề này có thể kể đến: Riegel Beebe (1917), Ludin (1927), Woycicki (1931), Knapp (1932), Safranez (1933-39), Aravin (1935), Kinney (1935), Bakhmeteff và Matzke (1936), Douma (1934), Posey (1941), Moore

(1943), Wu (1949), and Bradley - Peterka (1955-57), Bambang S. và Lalu M. (2017), Martín Mundo-Molina, José Luis Díaz Pérez (2019)...

Nghiên cứu chiều dài nước nhảy chủ yếu là nghiên cứu thực nghiệm và đề xuất các công thức kinh nghiệm, trong nghiên cứu đã phân biệt về chiều dài nước nhảy như sau:

- + Chiều dài nước nhảy tuyệt đối (L_j), các nghiên cứu tại Bảng 1.3.
- + Chiều dài khu xoáy của nước nhảy (L_r), các nghiên cứu tại Bảng 1.4.

Bảng 1.3 Công thức kinh nghiệm về tính chiều dài nước nhảy kênh chữ nhật

STT	Tác giả	Công thức
1.	Ludin (1927) [16]	$L_j = y_1 (4,5 - V_1/V_c)$ Với v_c : vận tốc tại mặt cắt co hẹp
2.	N.N. Pavlovsky [1] [14]	$L_j = 2,5(1,9y_2 - y_1)$ với $(Fr_1 > 3)$
3.	Safrenech [14]	$L_j = 4,5y_2$ với $(Fr_1 > 3)$
4.	Pikalov [1]	$L_j = 4y_1 \sqrt{1 + 2Fr_1^2}$ với $(Fr_1 > 3)$
5.	Safranez (1927) [14][16]	$L_j \approx 5,2.y_2$
6.	Bakhmetov và Matchick (1936)[14] [16]	$L_j \approx 5(y_2 - y_1)$
7.	Knapp (1932) [16]	$L_j = (62,5y_1/E_1) \left[(V_1 - V_2)^2 / (2g) - (E_1 - E_2) \right]$ Với: $E = y + V^2 / (2g)$
8.	Smetana (1935) [16]	$L_j \approx 6(y_2 - y_1)$
9.	Kinney (1935) [16]	$L_j \approx 6,02(y_2 - y_1)$
10.	Douma (1934) [16]	$L_j = 3.y_2$
11.	Posey (1941) [16]	$L_j \approx (4,5 \div 7)(y_2 - y_1)$
12.	Wu (1949) [16]	$L_j \approx 10(y_2 - y_1)Fr_1^{-0,16}$
13.	Woycicki (1934) [16]	$L_j = (y_2 - y_1)(8 - 0,5y_2/y_1)$
14.	Ivanchenko (1935) [16]	$L_j \approx 10,6(y_2 - y_1)(Fr_1^2)^{-0,185}$

STT	Tác giả	Công thức
15.	Einwachter (1933)[16]	$L_j = \left(15,2 - 0,241 \frac{y_2}{y_1}\right) \left(\frac{y_2}{y_1} - 1\right) \left[1 - \frac{V_1^2}{g \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2}\right]$
16.	M.O. Chertausov (1935) [1] [14][16]	$L_j = 10,3y_1(Fr_1 - 1)^{0,81} \text{ với } Fr_1 > 3$
17.	Page (1935) [16]	$L_j \approx 5,6.y_2$
18.	Riegel, Beeba (1917) [16]	$L_j \approx 5(y_2 - y_1)$
19.	Aravin (1935) [16]	$L_j \approx 5,4(y_2 - y_1)$
20.	Silvester (1964)[63]	$L_j = 9,75y_1(Fr_1 - 1)^{1,01}$
21.	Hager (1992) [30]	$L_j = 220.y_1 \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$
22.	Triatmojo (1993) [16]	$L_j \approx (5 \div 7)(y_2 - y_1)$
23.	Marques và cộng sự (1997) [33][43]	$L_j = 8,5(y_2 - y_1)$
24.	Simões (2008) [33][73]	$\frac{L_j}{y_2} = \frac{Fr_1^2 - 81,85Fr_1 + 61,13}{-0,62 - 10,71Fr_1}$
25.	Simões và cộng sự (2012) [33]	$L_j = 9,52(y_2 - y_1)$
26.	Abolfazl N.G và cộng sự (2013) [13]	$L_j = k.y_c$ Với hệ số thực nghiệm $k = 11$
27.	Sanjeev K.G và cộng sự (2013) [75]	$\frac{L_j}{y_1} = 4769,1 \frac{Fr_1^{2,1}}{Re_1} + 25,064$ Với Re_1 là số Reynolds trước nước nhảy
28.	Harry E.S và cộng sự (2015) [33]	$\frac{L_j}{y_1} = 3,62 \frac{Fr_1}{\sqrt{h^*}} - 0,157Fr_1^3 \sqrt{h^*}$ Với $h^* = y_1/(y_2 - y_1)$
29.	Bambang S. và Lalu M. (2017) [17]	$L_j \approx C_j(y_2 - y_1)$ Với: $C_j = 3,8274 + 3,0883(y_1/y_2)^{0,1}$
30.	Martín Mundo-Molina, José Luis Díaz Pérez (2019) [48]	$L_j = 4,5456(y_2 - y_1)^{1,0657}$ Với $1,2 < Fr_1 < 5$ và $0,11 \leq y_1/b \leq 0,28$

Bảng 1.4 Công thức kinh nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

TT	Tác giả	Độ rộng kênh thí nghiệm (cm)	Công thức
1.	Sarma và Newnham (1973) [31]	30,5	$\frac{L_r}{y_1} = 6,73(Fr_1 - 1)$ khi $Fr_1 \leq 4$
2.	Hager W.H et. al (1990) [31]	0,99 ÷ 50	$\frac{L_r}{y_1} = 8\left(Fr_1 - \frac{3}{2}\right)$ khi $2,5 \leq Fr_1 \leq 8$
3.	Busch F.(1981)[21]	20	khi $\omega < 0,1$ $\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh(Fr_1 / 20)$ khi $0,1 < \omega < 0,7$ $\frac{L_r}{y_1} = -12 + 100 \tanh(Fr_1 / 12,5)$ trong đó $\omega = \frac{y_1}{b}$
4.	N. Afzal (2002)[50]	20	$\frac{L_r}{y_2} = 5,2(1 - \alpha)$ với $Fr_1 > 4$; $\alpha = \frac{y_1}{y_2}$
5.	Safranez (1929) [31][64]	49,9	$\frac{L_r}{y_1} = 6Fr_1$
6.	Pietrkowski (1932) [31][53]	10	$\frac{L_r}{y_1} = 5,9Fr_1$
7.	Schroder (1963) [31][50]	59,8	$\frac{L_r}{y_1} = 40 \left[\frac{1}{16} (1 + 8Fr_1^2)^{1/2} - 3 \right]$
8.	Malik (1972) [31][50]	16,7; 33,3 và 50.	$\frac{L_r}{y_1} = 6,2Fr_1 - 10,4$ $+ [5Fr_1 - 7,5 + 0,17(Fr_1 - 3)^4] \omega$ Với: $3 < Fr_1 \leq 6$

Mối quan hệ của L_j và L_r được N. Afzal (2002) [50] đưa ra đánh giá sơ bộ và chỉ ra mối quan hệ như sau [50]:

$$L_r = a.L_j \quad (1.27)$$

trong đó: a là hệ số nghiên cứu thực nghiệm

Theo nghiên cứu của Sarma và Newnham (1973) [50], cho thấy quan hệ giữa $L_j/L_r \approx 1,3$. Còn các nghiên cứu khác cũng chưa đi sâu vào phân tích vấn đề này.

Xem xét các công thức về chiều dài nước nhảy (L_j) và chiều dài khu xoáy (L_r), đã cho thấy các kết quả không đồng nhất, điều này là do mỗi công thức đều xây dựng dựa trên kết quả thực nghiệm và điều kiện thí nghiệm khác nhau. Song mỗi công thức lại có ý nghĩa riêng về xác định các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy.

1.4.1.4. Nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang

a. Độ sâu liên hiệp của nước nhảy

+ *Nghiên cứu của A.N. Rakhmanov (1930)*

Với kênh bất kỳ, A.N. Rakhmanov (1930) đã đề xuất công thức xác định độ sâu liên hiệp nước nhảy phụ thuộc vào độ sâu phân giới, thể hiện như sau:

$$y_1 = 1,2 \frac{y_c^2}{y_2} - 0,2y_c \quad (1.28)$$

$$y_2 = \frac{1,2y_c^2}{y_1 + 0,2.y_c} \quad (1.29)$$

Nghiên cứu thực nghiệm A.N. Rakhmanov (1930) cho kênh bất kỳ, phụ thuộc vào độ sâu phân giới (y_c), thực tế là phụ thuộc vào số Froude. Tuy nhiên nghiên cứu chưa chỉ ra các yếu tố phụ thuộc khác, như ảnh hưởng của hệ số M_1 và mái dốc m .

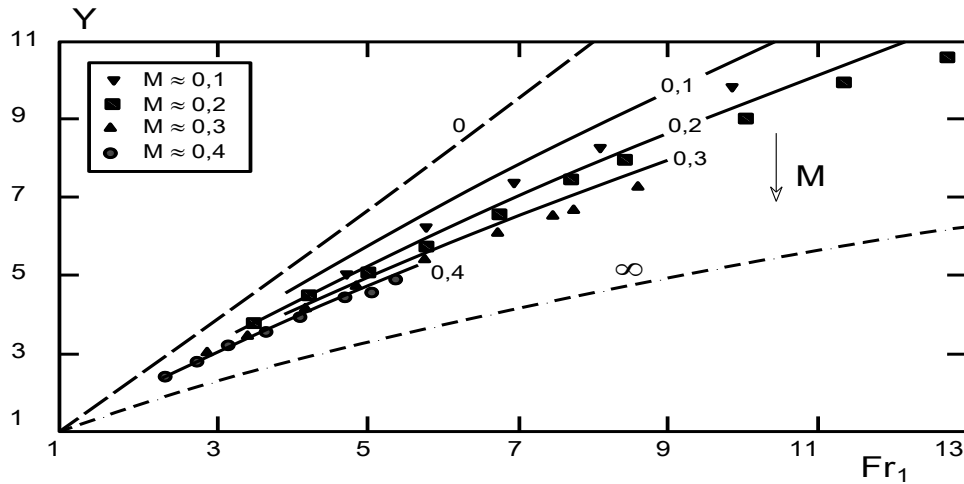
+ *Nghiên cứu của Wanoschek R. và Hager W.(1989) [58]*

Wanoschek R. và Hager W.(1989) đã sử dụng phương trình bảo toàn động cho mặt cắt trước và sau nước nhảy, từ đó xây phương trình đại số xác định độ sâu liên hiệp cho kênh hình thang, đáy bằng như sau:

$$Fr_1^2 \left[1 - \frac{1+M}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2YM}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.30)$$

$$\text{Với } M = \frac{m.y_1}{b}$$

Từ công thức (1.30), các tác giả đã xây dựng được biểu đồ Hình 1.9 với các giá trị $M = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ và ∞ , đồng thời kiểm định bằng thực nghiệm với kênh dẫn hình thang có hệ số mái dốc $m = 1$.



Hình 1.9 Biểu đồ về tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy và số Froude theo hệ số M

Từ biểu đồ Hình 1.9, quan hệ giữa đường cong lý thuyết và thực nghiệm vẫn còn chưa hội tụ hoàn toàn, đặc biệt là các trường hợp $M_1 < 0,2$, nên cần nghiên cứu sâu để xác định chính xác sự biến đổi của độ sâu liên hiệp nước nhảy theo số Froude.

+ Nghiên cứu của Sadiq S.M (2012) [67]

Áp dụng định luật cân bằng động lượng cho mặt cắt trước và sau của nước nhảy, Sadiq S.M (2012) [67] đã xây dựng phương trình tính độ sâu liên hiệp nước nhảy cho kênh nhẵn và đáy bằng (bỏ qua ma sát), nghiên cứu đã giải tìm độ sâu liên hiệp của nước nhảy bằng các sơ đồ hoặc bảng biểu.

Công thức tổng quát của Sadiq S.M (2012) có dạng như sau:

$$aY^5 + bY^4 + cY^3 + dY^2 + eY + f = 0 \quad (1.31)$$

Trong đó a, b, c, d, e, f là các thông số phụ thuộc vào Fr_D, y_2, y_1 và m .

Nghiên cứu của Sadiq S.M (2012) [67] mới chỉ dừng lại ở lý thuyết, đồng thời là phương pháp tính toán có ý nghĩa trong phân tích lý thuyết. Nhưng nghiên cứu chưa khảo sát cụ thể và đánh giá cho lòng dẫn rộng và độ sâu nhỏ (trường hợp trong thực tế hay gặp có M_1 nhỏ).

+ Nghiên cứu của Samir Kateb (2014) [70]

Samir Kateb (2014) [70] nghiên cứu thực nghiệm (luận án tiến sĩ), về mối quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy (y_2/y_1) với số Fr_{D1} cho kênh hình thang cân

(mái dốc có góc nghiêng $76,2^\circ$ hay $m = 0,245$), đáy lòng dẫn có góc nghiêng (α) và thay đổi từ $-0,005 < \tan\alpha < 0,02$, kết quả cho thấy:

$$Y = (9,180 \tan\alpha + 1,19)Fr_{D1} \quad (1.32)$$

$$\text{Với } 3,46 \leq Fr_{D1} \leq 13,17 \text{ và } 0,031 \leq M = \frac{m.y_1}{b} \leq 0,093$$

Samir Kateb (2014) với nghiên cứu thực nghiệm, chỉ ra quan hệ giữa độ sâu liên hiệp với số Froude, còn các yếu tố ảnh hưởng khác chưa được xét đến, giới hạn của giá trị M_1 rất nhỏ.

+ *Nghiên cứu của Samir Kateb và cộng sự (2015) [68]*

Nghiên cứu của Samir Kateb và cộng sự (2015) [68] là phân tích thực nghiệm về độ sâu liên hiệp nước nhảy trên kênh hình thang cân, có mái dốc với góc nghiêng là 73° ($m = 0,31$), độ dốc đáy thay đổi. Nghiên cứu đã xác định được mối quan hệ của tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy với số Froude và độ dốc đáy kênh (α).

$$Y = (10,22i + 1,18)Fr_{D1} \quad (1.33)$$

$$\text{Với } i \geq 0, i = \tan\alpha \leq 0,02 \text{ và } 1,5 < Fr_{D1} < 12$$

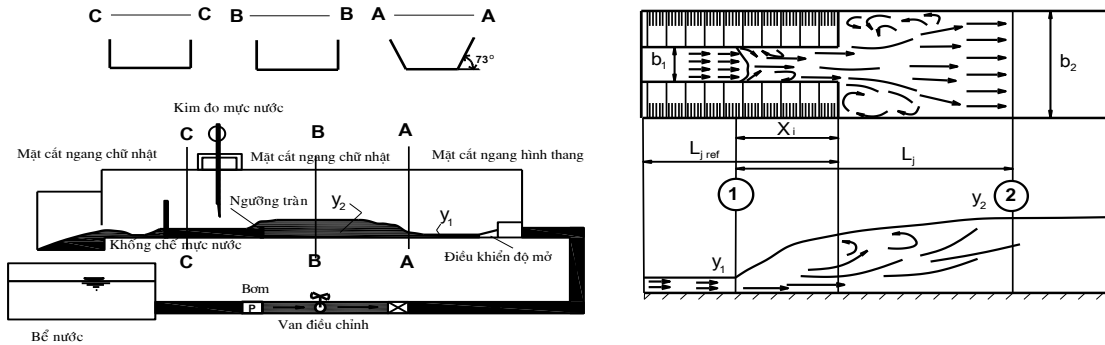
Các nghiên cứu của Samir Kateb (2014), Samir Kateb và cộng sự (2015) đã tích hợp kênh đáy bằng vào kênh dốc, nhưng chỉ mới nghiên cứu cho một loại kênh hình thang có mái dốc cố định. Công thức (1.32) và (1.33) có sự tương đồng và sự sai lệch trong hệ số thực nghiệm rất nhỏ. Các nghiên cứu này chưa có sự tổng quát hóa liên quan tới sự thay đổi về mái dốc của kênh.

+ *Nghiên cứu của Sonia Cherhabil và Mahmoud Debabeche (2016) [76]*

Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện trên một kênh hình thang cân có chiều dài 6 m, chiều rộng đáy 20 cm và góc nghiêng mái dốc $72,68^\circ$ ($m = 0,31$). Độ sâu dòng chảy trước nước nhảy mở tương ứng với: $y_1 = 20, 30, 40, 50$ và 60 (mm). Độ dốc đáy kênh có giá trị i (%) = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,00; -0,005; -0,01. Sử dụng 22 tấm ngưỡng tràn thành mỏng để thực hiện dâng cao mực nước hạ lưu và khống chế quá trình nước nhảy. Đã xác định được các công thức thực nghiệm cho từng trường hợp nghiên cứu theo y_1 , nhưng chưa có sự phân tích tổng quát chung. Các trường hợp nghiên cứu có lưu lượng nhỏ, các công thức phân tích theo từng giá trị y_1 , điều này dẫn đến là sẽ có vô số công thức khác nhau, bất lợi trong ứng dụng.

+ Nghiên cứu của SIAD, Rafik (2018) [71]

SIAD, Rafik (2018) [71] thực hiện đề tài tiến sĩ chuyên ngành thủy lực về nước nhảy. Nghiên cứu nước nhảy trong đoạn nối tiếp từ kênh hình thang (mái dốc kênh $m = 0,31$, chiều rộng $b = 0,2\text{m}$, dài $L_{j\text{ ref}} = 4\text{m}$) sang kênh chữ nhật (chiều rộng $b = 0,6\text{m}$), đã cho thấy độ sâu liên hiệp nước nhảy sẽ phụ thuộc vào vị trí chân nước nhảy xuất hiện ở trên kênh hình thang ($X_i > 0$) hoặc trên kênh chữ nhật ($X_i = 0$).



Hình 1.10 Mặt bằng và mặt cắt của cấu trúc nước nhảy trên đoạn kênh nối tiếp lòng dẫn hình thang cân sang lòng dẫn hình chữ nhật của SIAD (2018)[71]

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm rút ra được các công thức sau:

- Với giá trị $0 \leq X_i \leq 0,4$ thì:

$$Y = (1,20.X_i + 0,57)Fr_{Dl}^{0,31X_i+1,13} \quad (1.34)$$

- Với giá trị $0,4 < X_i \leq 1,0$ thì:

$$Y = (-0,27.X_i + 1,17)Fr_{Dl}^{0,3X_i+0,86} \quad (1.35)$$

Trong đó $X_i = \frac{X_1}{L_{j\text{ ref}}}$

X_1 : Khoảng cách từ cuối kênh hình thang đến chân nước nhảy

$L_{j\text{ ref}}$: Chiều dài kênh hình thang cân, có góc mái dốc 73° ($m = 0,31$)

Kết quả nghiên cứu bị ảnh hưởng bởi mô hình thực nghiệm với chiều dài kênh hình thang. Khi kênh quá dài hoặc quá ngắn thì sẽ cho những ảnh hưởng khác nhau, vấn đề đặt ra là quy luật thay đổi chiều dài kênh hình thang sẽ ảnh hưởng thế nào đến đặc trưng thủy động của nước nhảy.

+ Nghiên cứu của Shahin S.A và cộng sự (2018) [72]

Shahin S.A và cộng sự (2018) [72] đã nghiên cứu đối với kênh mặt cắt ngang hình thang cân có hệ số mái dốc 1,0 và 1,5 và độ rộng đáy của mô hình 0,2m, đã chỉ

mối quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy (y_2/y_1) với số Froude trước nước nhảy (Fr_1), từ đó xây dựng được công thức thực nghiệm như sau:

- Theo quan hệ tuyến tính:

$$Fr_{D1}^2 = 79,17 + 0,73 \left(\frac{y_2}{y_1} \right) - 939,813 \frac{m \cdot y_1}{b} \quad (1.36)$$

- Theo quan hệ phi tuyến

$$Fr_{D1}^2 = 0,000187 \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^{0,538} \left(\frac{m \cdot y_1}{b} \right)^{-3,938} \quad (1.37)$$

Các hạn chế của công thức thực nghiệm (1.36) và (1.37) có hệ số tương quan (R^2) của mô hình lần lượt là 0,814 và 0,802, đồng thời các quan hệ chỉ ra không có xu thế hội tụ tuyệt đối. Điều này là do phân tích hỗn hợp dữ liệu của kênh có mái dốc bằng 1,5 và 1,0, bên cạnh đó lượng dữ liệu không đủ lớn (có 8 dữ liệu với mái dốc $m = 1,5$ và 9 dữ liệu cho mái dốc $m = 1$ [72]), bên cạnh đó số Fr_{D1} trong nghiên cứu biến đổi trong phạm vi rất nhỏ từ 2 đến 4,4, tính tổng quát hóa không cao.

+ *Nghiên cứu của Bahador F.N và cộng sự (2019) [18]*

Bahador F.N (2019) [18] nghiên cứu đối với nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang hình thang với mái dốc lần lượt 0,26, 0,58 và 1,0 trên mô hình có độ rộng đáy 0,2m với lưu lượng thí nghiệm từ 30 l/s đến 90 l/s, số $Fr_{D1} = 1,2 \div 8,67$. Đã chỉ ra mối hệ giữa số Fr_{D1} và tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy (y_2/y_1) có quan hệ chặt chẽ, tuy nhiên, nghiên cứu mới phân tích về vận tốc tức thời trước nước nhảy, mà không chỉ rõ quan hệ về độ sâu liên hiệp của nước nhảy, cho nên các đánh giá và phân tích vẫn chưa chỉ rõ ảnh hưởng tới đặc trưng hình học của nước nhảy.

Như vậy, nghiên cứu nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang hình thang cân theo từng loại nước nhảy ở Bảng 1.1 là rất quan trọng, đồng thời nhấn mạnh đối với trạng thái nước ổn định là rất cần thiết.

Các nghiên cứu chỉ ra rằng, độ sâu liên hiệp nước nhảy trên kênh hình thang cân chủ yếu được xác định dưới dạng công thức thực nghiệm, phụ thuộc vào số Froude trước nước nhảy, nhưng với các kênh có mái dốc khác nhau thì công thức tính có sự thay đổi đáng kể về các hệ số thực nghiệm. Đối với nghiên cứu lý thuyết vẫn chưa được thể hiện rõ ràng. Điều này cần phải có bài toán và công thức cụ thể để xác

định độ sâu liên hiệp của nước nhảy, trong đó các vấn đề ảnh hưởng sức cản dòng chảy xoáy cũng phải nghiên cứu bổ sung theo lý thuyết và thực nghiệm.

b. Chiều dài nước nhảy

Chiều dài nước nhảy trên kênh hình thang cân được nghiên cứu chủ yếu dựa vào thực nghiệm, các nghiên cứu cho thấy như sau:

+ *Nghiên cứu của Posey, C. J. và Hsing, P. S. (1938) [55]*

Nghiên cứu thực nghiệm Posey, C. J. và Hsing, P. S. (1938) [55] cho thấy có sự ảnh hưởng của mái dốc kênh hình thang, nên nghiên cứu nước nhảy có xem xét tới cả điều kiện mở rộng trên mái dốc, kết quả nghiên cứu cho thấy:

$$L_j = 5y_2 \left(1 + 4 \sqrt{\frac{B_2 - B_1}{B_1}} \right) \quad (1.38)$$

Với: $B = b + 2my$

Nếu với kênh chữ nhật thì công thức trên còn lại

$$L_j = 5.y_2 \quad (1.39)$$

Công thức (1.39) được sử dụng phổ biến trong tính toán chiều dài nước nhảy để thiết kế tiêu năng có mặt cắt ngang hình chữ nhật.

Nghiên cứu Posey, C. J. và Hsing, P. S. (1938) mới chỉ xét đến các yếu tố hình học, còn đặc trưng động học vẫn còn được xét đến, dẫn đến chưa đánh giá hết các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy.

+ *Nghiên cứu của Silvester, R (1964) [63]*

Silvester, R (1964) [65] sử dụng dữ liệu thực nghiệm của của Press (1961) [50][63], từ đó phân tích các mối quan hệ giữa chiều dài nước nhảy với độ sâu trước nước nhảy, cho thấy các quan hệ này hội tụ với số Froude, từ đó rút ra:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9,75 (Fr_{D1} - 1)^{1,01} \quad (1.40)$$

Nghiên cứu Silvester, R (1964) chủ yếu xem xét ảnh hưởng của các yếu tố trước nước nhảy, điều này đã không xét đến ảnh hưởng của biến đổi ở các khu xoáy.

+ *Nghiên cứu của Hager W.H. (1992) [30]*

Nghiên cứu của các tác giả dựa trên dữ liệu của Press (1961), đã phân tích rõ cấu trúc nước nhảy trong lòng dẫn hình thang cân, đồng thời tiến hành nghiên cứu

thực nghiệm về mối quan hệ giữa độ sâu liên hiệp, chiều dài nước nhảy với các yếu tố ảnh hưởng, rút ra được:

$$\frac{L_j}{y_2 - y_1} = 7,1(1 + 10M) \quad (1.41)$$

Với $M = m.y_1/b < 0,25$

Hager W.H. (1992) đã xem xét tới độ cao nước nhảy, nhưng đặc trưng thủy động (số Froude) chưa đề cập, trong khi đó đây là yếu tố quan trọng phân tích các đặc trưng hình học của nước nhảy.

+ *Nghiên cứu của Rajaratnam và Subramanya (1968) [57]*

Rajaratnam và Subramanya (1968) từ nghiên cứu thực nghiệm, rút ra:

$$\frac{L_j}{y_1} = 5,08Fr_{D1} - 7,82 \quad (1.42)$$

Với điều kiện $Fr_{D1} \geq 4,4$

Tương tự nghiên cứu của Silvester (1964), yếu tố đặc trưng sau nước nhảy vẫn chưa được xem xét cụ thể. Chiều dài nước nhảy là hàm tuyến tính theo số Froude, điều này không phù hợp với hầu hết các nghiên cứu về kênh lắng trụ, vì các ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy rất đa dạng và khó xuất hiện các quan hệ tuyến tính.

+ *Nghiên cứu của Ohtsu (1976) [59]*

Phân tích các mối quan hệ dựa trên các nghiên cứu thực nghiệm về nước nhảy trên kênh hình thang cân, Ohtsu (1976) đã xây dựng công thức tính như sau:

$$\log_{10} \left(\frac{L_j}{\Delta H} \right) = 1,71\eta + 0,315m + 1,58 \quad (1.43)$$

Với L_0 : Chiều dài nước nhảy theo Ohtsu (m)

$$\Delta H = E_1 - E_2 \quad \eta = \Delta H/E_1$$

E_1, E_2 : Năng lượng dòng chảy mặt cắt trước và sau nước nhảy

Nghiên cứu Ohtsu (1976) đã phân tích cơ bản cho các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy.

+ *Nghiên cứu Robert W. và Hager W.H. (1989) [58]*

Nghiên cứu đã phân tích quan hệ giữa số Froude và độ sâu liên hiệp nước nhảy, nhưng chưa chỉ rõ các mối quan hệ này trong các công thức tính toán. Với chiều

dài nước nhảy, nghiên cứu chỉ ra mối qua hệ giữa chiều dài nước nhảy và số Fr_1 , nghiên cứu chỉ khái quát về đặc điểm của nước nhảy, đánh giá biến đổi lưu tốc trên mặt cắt ngang, dọc theo dòng chảy, đồng thời phân tích chiều dài nước nhảy và mối tương quan của nó theo các công thức của Silvester (1964) và Ohstu (1976). Tác giả chưa xây dựng cụ thể về chiều dài nước nhảy, nhưng lại cung cấp bộ dữ liệu cơ bản cho các nhà nghiên cứu.

+ *Nghiên cứu của N. Afzal (2002) [50]*

Công thức tính chiều dài nước nhảy dựa trên thực nghiệm và tỷ số giữa độ sâu liên hiệp để tính toán, tuy nhiên nghiên cứu này chưa đồng bộ, không xét đến tất cả các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình dòng chảy.

$$\frac{L_j}{y_2} = 6,9(1 - \alpha) \quad (1.44)$$

Với $\alpha = y_1/y_2$

N. Afzal (2002) phân tích đặc tính đường mặt nước để xác định chiều dài nước nhảy, nhưng mới chỉ xem xét về yếu tố hình học, chưa xem xét đến đặc trưng động học khác. Nghiên cứu phân tích quan hệ hình về hình dạng nước nhảy, điều này rất khó đánh giá chính xác các yếu tố động học ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy.

+ *Nghiên cứu của Sadiq Salman Muhsun (2012) [67]*

Sadiq Salman Muhsun (2012) [67] sử dụng nghiên cứu của N. Afzal (2002) [50], dựa trên phân tích toán học triển khai tính toán bằng phương pháp lý thuyết về đặc trưng nước nhảy trên kênh hình thang cân, đã chỉ ra mối tương quan giữa số Froude với tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy với năng lượng mặt cắt (y_2/E_1).

Nghiên cứu mới chỉ phân tích theo lý thuyết và thể hiện dưới dạng biểu đồ quan hệ, mà chưa có kiểm nghiệm về thực nghiệm cụ thể.

+ *Nghiên cứu của Samir Kateb (2014) [70]*

Nghiên cứu trong luận án tiến sĩ của Samir Kateb (2014) [70] đã phân tích chiều dài nước nhảy trên kênh dốc đáy kênh $b = 0,2m$ và hệ số mái dốc kênh cố định nghiêng một góc $76,2^\circ$ ($m = 0,246$), cho thấy:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9,58Fr_{D1} - 24,59 \quad (1.45)$$

trong đó: $\{3,46 \leq Fr_{D1} \leq 13,17; -0,005 \leq i \leq 0,02; 0,031 \leq M \leq 0,093\}$

Nghiên cứu này khi xem quan hệ giữa (L_j/y_1) với Fr_{D1} có tương quan dạng tuyến tính và biến đổi từ độ dốc âm sang dương, tuy nhiên biên độ thay đổi độ dốc khá nhỏ, dẫn đến mô hình nghiên cứu thiên về kênh đáy bằng là chính, hệ số M_1 và mái dốc của kênh quá nhỏ ($m = 0,246$) nên mức độ tương đồng của nghiên cứu thiên về kênh chữ nhật, chưa làm sáng tỏ ý nghĩa thực tế của kênh hình thang cân.

+ *Nghiên cứu của SIAD, Rafik (2018) [71]*

Khi nghiên cứu luận án tiến sĩ về nước nhảy, SIAD R. (2018) phân tích nước nhảy trên mô hình lòng dẫn nối tiếp của kênh hình thang có độ rộng đáy 0,2m, mái dốc nghiêng góc 73° ($m = 0,31$), dài $L_{j\text{ ref}} = 4\text{m}$ với kênh chữ nhật có độ rộng đáy 0,6m, dài 7m, kết quả phân tích thực nghiệm đã cho thấy:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9,97Fr_{D1} - 0,307 \quad (1.46)$$

Với điều kiện: $\{2,09 \leq Fr_{D1} \leq 10,51; 0,0 \leq Xi \leq 1,0\}$

Công thức (1.46) nếu $Xi = 1$ thì nước nhảy trong kênh hình thang, và $Xi = 0$ thì nước nhảy xảy ra hoàn toàn trong kênh chữ nhật. Nghiên cứu này hạn chế ứng dụng thực tế rất nhiều, do điều kiện về chiều dài kênh hình thang cố định kích thước và không có sự thay đổi theo từng đặc điểm riêng nước nhảy.

+ *Nghiên cứu của Bahador Fatehi Nobarian và cộng sự (2019) [18]*

Bahador F.N. và cộng sự (2019) nghiên cứu về mối quan hệ giữa các đặc trưng hình học (L_j và y_2/y_1) và năng lượng nước nhảy trên kênh hình thang cân (với 3 loại mái dốc khác nhau: $m = 1; 0,58$ và $0,26$) với số Froude (Fr_1) trước nước nhảy đã cho thấy các quan hệ phù hợp, tuy nhiên nghiên cứu mới chỉ kết luận về các quan hệ này mà chưa chỉ rõ các tính toán cụ thể cho từng điều kiện khác nhau.

Hầu hết các công thức thực nghiệm về chiều dài nước nhảy trên kênh hình thang cân chủ yếu được thực hiện trên mô hình dòng chảy dưới cửa cống (cửa van), bên cạnh đó chiều rộng đáy kênh thí nghiệm nhỏ (thường ở mức 0,2m) chưa biểu thị hết các vấn đề ảnh hưởng kích thước mô hình thí nghiệm và dòng chảy rồi đến các đặc trưng nước nhảy.

Các công thức đã xem xét ở trên cho thấy, chưa có sự phân tách rõ ràng trong nghiên cứu đối với các loại nước nhảy khác nhau và loại hình nước nhảy sau công trình (đập tràn hay qua cống). Do vậy quá trình vận dụng các công thức sẽ gặp nhiều khó khăn trong ứng dụng cho bài toán thực tế.

Hiện tại ở Việt Nam, các công thức tính toán đặc trưng hình học nước nhảy cho lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang cân, đáy bằng vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Trong thực tế vẫn sử dụng công thức tính cho mặt cắt hình chữ nhật để thay thế và bổ sung sửa chữa thiết kế bằng thực nghiệm mô hình.

Nghiên cứu về nước nhảy trên kênh hình thang hiện tại tương đối ít, các nghiên cứu vẫn chưa được hoàn thiện, các đánh giá ứng dụng còn hạn chế, nhưng thực tế hiện tượng này lại xuất hiện khá nhiều và có ý nghĩa nhất định trong tính toán thiết kế công trình.

1.4.1.5 Ứng dụng công nghệ “Trí tuệ nhân tạo” trong nghiên cứu nước nhảy

Công nghệ Trí tuệ nhân tạo (AI) bao trùm nhiều nhánh nghiên cứu khác nhau, như Học Máy (Machine Learning), Học sâu (Deep Learning). Hiện nay, các nghiên cứu về ứng dụng Trí tuệ nhân tạo, Học máy đã triển khai sâu rộng nhiều lĩnh vực và ngành nghề, trong đó bao gồm cả các nghiên cứu về lĩnh vực thủy lực nói chung và nước nhảy nước riêng.

Nghiên cứu của Steven L. Brunton và cộng sự (2019) đã tổng quan về Học máy và ứng dụng cơ bản trong cơ học chất lỏng, đã phân tích và cho thấy ứng dụng học máy cho hiệu quả tốt trong nghiên cứu thủy lực, có thể hỗ trợ trong đánh giá các mô hình vật lý, có thể chia sẻ dữ liệu tốt hơn [80]. Melhem và cộng sự (1996) đã phân tích các giải pháp Học máy ứng dụng trong kỹ thuật với cơ sở dữ liệu phù hợp, Học máy cho kết quả nhanh chóng và độ chính xác cao [47].

Nghiên cứu của Mahdi Naseri và Faridah Othman (2012)[40] đã minh chứng khả năng ứng dụng tốt của thuật toán ANN trong xác định chiều dài nước nhảy, nghiên cứu của L. Houichi và cộng sự (2013) [38] về chiều dài nước nhảy trên lòng dẫn có mặt cắt ngang chữ U (đáy là nửa hình tròn đường kính 0,245m và phần trên là hình chữ nhật nối tiếp nửa hình tròn có độ cao 0,7m), xác định chiều dài nước nhảy trên kênh chữ nhật sau cửa cống với thiết kế nhiều cửa tháo ở Ai cập của Mohamed F. Sauda (2016) [41], nghiên cứu của Akram Abbaspour (2013) [15] về so sánh hiệu

quả ứng dụng giữa Mạng thần kinh nhân tạo (ANN) và Thuật toán di truyền (GP) về xác định chiều dài nước nhảy, độ sâu liên hiệp và năng lượng của nước nhảy. Masoud Karbasi and H. Md. Azamathulla (2016) [49] phân tích so sánh giữa Thuật toán mô phỏng Gen (GEP) và Kỹ thuật Trí tuệ nhân tạo (ANN and SVR) về các phân tích chiều dài nước nhảy trên kênh nhám với các yếu tố ảnh hưởng khác nhau. Nghiên cứu chiều dài nước nhảy trên lòng dẫn nhám thông qua các mô hình Trí tuệ nhân tạo khác nhau (như GEP, ANNs) của P. Khosravinaei và cộng sự [56]. Ứng dụng Phân loại Cây quyết định (J48) và Mạng thần kinh đa lớp (NN) để phân loại nước nhảy trên lòng dẫn nhám của Ghorban Mahtabi và cộng sự (2020) ...

Qua khảo sát trên cho thấy, các nghiên cứu áp dụng rất nhiều thuật toán ANN vào nghiên cứu xác định các đặc trưng của nước nhảy, trong khi đó mô hình ứng dụng Học máy (như Cây quyết định, Rừng ngẫu nhiên ...) gần như chưa được nghiên cứu.

1.4.2 Nghiên cứu nước nhảy ở Việt Nam

1.4.2.1 Các nghiên cứu về nước nhảy

+ *Nghiên cứu của Hoàng Tư An (2005) [1]*

Các công trình khoa học như tài liệu “Thủy lực công trình” của GS. TS Hoàng Tư An [1], đã nghiên cứu hiện tượng nước nhảy trong lòng dẫn lắng trụ đáy dốc và đáy bằng dựa trên cơ sở lý thuyết lớp biên của dòng tia chảy rối với dạng mặt cắt khác nhau, nghiên cứu đã giải quyết các bài toán nước nhảy trên lòng dẫn chữ nhật bằng phương pháp lý thuyết (tích phân hệ phương trình Reynolds, giải bài toán theo hệ thức năng lượng...). Nghiên cứu đã định hướng về phân tích lý thuyết đối với các dạng kênh có mặt cắt khác nhau, nhưng chưa phân tích rõ về kênh hình thang cân.

+ *Nghiên cứu Nguyễn Văn Đăng (1989) [4]*

Tác giả Nguyễn Văn Đăng (Luận Tiến sĩ, 1989) đã dựa theo lý thuyết lớp biên, nghiên cứu dòng chảy rối trong nước nhảy qua mô hình dòng chảy Reynolds – Bussinesque để đề nghị phương pháp “Hệ thức tích phân năng lượng”. Từ đó để xác định các đặc trưng trung bình thời gian trong nước nhảy phẳng.

Hệ thức tích phân năng lượng thể hiện:

$$A_{i1} \frac{d\eta_{\sigma}}{d\lambda} + A_{i2} \frac{d\phi}{d\lambda} + A_{i3} \frac{dn}{d\lambda} + A_{i4} \frac{dm}{d\lambda} + A_{i5} \frac{d\eta}{d\lambda} + A_{i6} \frac{d\eta_b}{d\lambda} = A_{i7} \quad (1.47)$$

Trong đó: A_{ij} là các ma trận hệ số; δ là chiều dày lớp biên sát thành rắn; h là độ sâu dòng chảy; h_1 là độ sâu trước nước nhảy; φ là cao độ dòng tia; u_n là lưu tốc của dòng chảy ngược chiều; u_m là lưu tốc lớn nhất trên trục tia; λ là hệ số sức cản ở lớp biên.

$$\eta_\delta = \frac{\delta}{h_1} \quad m = \frac{u_n}{u_m} \quad \eta = \frac{h}{h_1} \quad \eta_b = \frac{b}{h_1}$$

với $i = 1$ có phương trình năng lượng trong lớp biên sát thành rắn $[0; \delta]$

$i = 2$ có phương trình liên tục

$i = 3$ có phương trình động lượng trong lớp biên sát thành rắn $[0; \delta]$

$i = 4$ có phương trình động lượng trong dòng tia $(b + \delta, h)$

$i = 5$ có phương trình năng lượng trong dòng tia $(b + \delta, h)$

$i = 6$ có phương trình lỗi thể

Nghiên cứu đã phân tích rõ các đặc trưng hình học của nước nhảy về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (h_r) và chiều dài khu xoáy (L_r) của nước nhảy với độ sâu liên hiệp (h_2) và chiều dài (L_j) của nước nhảy. Tuy nhiên, đối với nước nhảy không gian và bán không gian (nước nhảy trên kênh hình thang cân) thì nghiên cứu chưa được xem xét đến. Trong nghiên cứu này, đã chỉ rõ các đặc trưng hình học cơ bản của nước nhảy, làm tiền đề cho các nghiên cứu bổ sung khác.

+ *Nghiên cứu Lưu Như Phú và Nguyễn Văn Toàn (2013)*: Dựa trên kết quả thí nghiệm về nước nhảy trong điều kiện dòng chảy ổn định, độ mở cửa van nhỏ để ra công thức tính chiều sâu liên hiệp sau nước nhảy [11]. Phương pháp nghiên cứu thực hiện để đánh giá dòng chảy qua cống và nước nhảy trong lòng dẫn có mặt cắt ngang hình chữ nhật.

+ *Nghiên cứu của Hồ Việt Hùng (2016)[10]* về đề xuất xác định kích thước và cao trình bề tiêu năng có mặt cắt chữ nhật của nước nhảy hoàn chỉnh như sau:

$$Z_b = Z_H - \frac{1,483q}{\sqrt{gd_1}} + 0,377d_1 \quad (1.48)$$

với Z_b là cao trình đáy bể (m); Z_H : Cao trình mực nước hạ lưu (m); q : Lưu lượng dòng chảy đơn vị ($m^3/s/m$); d_1 : Độ sâu trước nước nhảy (m).

+ *Nghiên cứu của Hồ Việt Hùng và Lê Xuân Hiền (2017) [9]* về chiều dài bể tiêu năng có mố nhám lớn loại B và C theo mô hình thí nghiệm của USBR, nghiên cứu chỉ ra khả năng ảnh hưởng của mố nhám đến chiều dài nước nhảy trên lòng dẫn mặt cắt ngang chữ nhật.

- Chiều dài bể tiêu năng loại 2 theo phân loại USBR

$$L_{II} = d_2 (-0,0133F_1^2 + 0,3129 F_1 + 2,4863) \quad (1.49)$$

- Chiều dài bể tiêu năng loại 3:

$$L_{III} = d_2 (-0,0092 F_1^2 + 0,2102 F_1 + 1,54863) \quad (1.50)$$

với d_2 độ sâu liên hiệp của nước nhảy (m); F_1 là số Froude trước nước nhảy.

Nghiên cứu giúp cho quá trình phân tích thực nghiệm và đánh giá nước nhảy phù hợp hơn. Tuy nhiên, các dạng mặt cắt khác thì chưa được xem xét và phân tích.

+ *Nghiên cứu của Lê Thị Việt Hà (Luận án tiến sĩ - 2018) [6]* về nước nhảy trong lòng dẫn mở rộng có độ dốc lớn đã xây dựng được công thức lý thuyết và có kết quả thực nghiệm để đánh giá. Nghiên cứu chỉ ra chiều sâu tương đối (η_x) và chiều dài tương đối cuối khu xoáy (l_x) theo hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} A(\eta^2 - 1) + B_2(\eta - 1) + C_2 \cdot \ln \frac{E^2 - \eta^2}{E^2 - 1} + E \cdot \ln \frac{(E + \eta)(E - 1)}{(E - \eta)(E + 1)} = 0,45 \frac{l_x}{h_1} \\ \eta^3 - (2\beta F + G)\eta + 3,12F = 0 \end{cases} \quad (1.51)$$

Trong đó: η_x là độ sâu tương đối của dòng chảy; l_x là chiều dài tương đối cuối khu xoáy; h_1 là độ sâu trước nước nhảy; β là Bề rộng tương đối tại vị trí x trong khu xoáy của nước nhảy; A, B, C, E, G, F là các hệ số phương trình;

Bên cạnh đó, mối quan hệ giữa L_r và L_j cũng được chỉ ra:

$$L_r = (0,82 \div 0,85) L_j \quad (1.52)$$

Nghiên cứu đã phân tích được các đặc trưng thủy động lực học của nước nhảy bằng các phương trình lý thuyết, nhưng kết quả chưa đề cập và áp dụng cho lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang cân, hình chữ nhật đáy bằng. Nghiên cứu này, đã giúp cho việc phân tích về dòng rối được sáng tỏ hơn.

Như vậy, hầu hết các nghiên cứu về nước nhảy ở Việt Nam chưa xem xét đến đặc trưng hình học nước nhảy trên kênh hình thang và các ứng dụng thực tế.

1.4.2.2 Một số công trình thực tế

a. Công trình thủy điện Hồi Xuân

* Tên công trình

Tên công trình: Dự án thủy điện Hồi Xuân

Địa điểm xây dựng: trên sông Mã, thuộc địa phận H. Quan Hoá, T. Thanh Hoá.

* Thông số công trình

Quy mô công trình bao gồm các hạng mục và các thông số cơ bản sau:

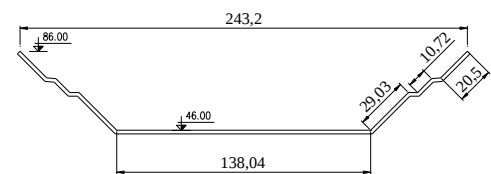
- Đập bê tông trọng lực có cao trình đỉnh đập 86.0m, chiều cao lớn nhất khoảng 43m, chiều dài đập theo đỉnh 243.2m.

- Đập tràn xả lũ được xây dựng chính giữa lòng sông Mã, gồm 05 khoang, chiều rộng mỗi khoang là 15.0m. Mặt đập tràn có dạng mặt cong không chân không Cơ-ri-gơ ô-phi-xe-rốp, chân đập tràn nối liền với bể tiêu năng ở cao trình $\nabla 46.0\text{m}$.

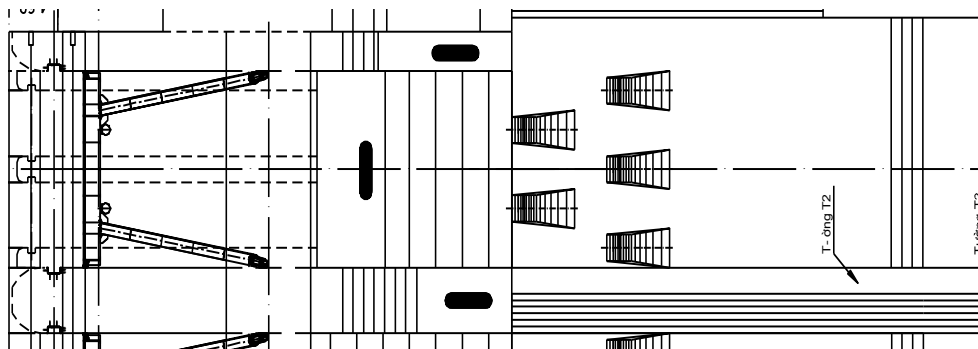
- Bể tiêu năng dài 30m, đáy ở cao trình $\nabla 46.0\text{m}$, cuối bể làm mái vát 45° nối lên đoạn lát sân bảo vệ hạ lưu ở cao trình $\nabla 49.0\text{m}$.



Hình 1.11 Phối cảnh công trình thủy điện Hồi Xuân (nguồn VNECO)



Hình 1.12 Mặt cắt ngang bể tiêu năng



Hình 1.13 Mặt bằng bể tiêu năng.

* Đánh giá

Công trình Thủy điện Hồi Xuân, với thiết kế đập tràn và tiêu năng trên bê có mặt cắt ngang hình thang với kết cấu tiêu năng kết hợp, cho thấy hiệu quả công trình

về mặt kết cấu có thể rút ngắn bề tiêu năng (từ chiều dài bể 39m rút ngắn lại còn 30m), tăng hiệu quả tiêu năng sau công trình (tăng 5%) .

Như vậy, khi sử dụng bể tiêu có mặt cắt ngang hình thang cho thấy lợi ích về kết cấu công trình, khả năng tiêu năng dòng chảy sau đập.

b. Công trình thủy điện Nà Sản

* Tên công trình

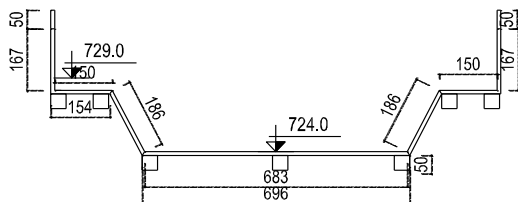
Hệ thống thủy lợi Nà Sản, huyện Mai Sơn, tỉnh Sơn La [5].

Hồ Chiềng Dong của hệ thống thủy lợi Nà Sản có: Dung tích hữu ích yêu cầu $V_h = 3,51$ triệu m^3 , dung tích toàn bộ hồ chứa tính toán $V = 3,99$ triệu m^3 , cao trình mực nước dâng bình thường tính toán 760,0m.

* Thông số công trình

Tràn xả lũ được điều tiết bằng cửa van gồm 2 khoang tràn, khẩu diện mỗi khoang tràn 7x6m, cao trình ngưỡng tràn cửa van 754m và ngưỡng tràn tự do 760,0m.

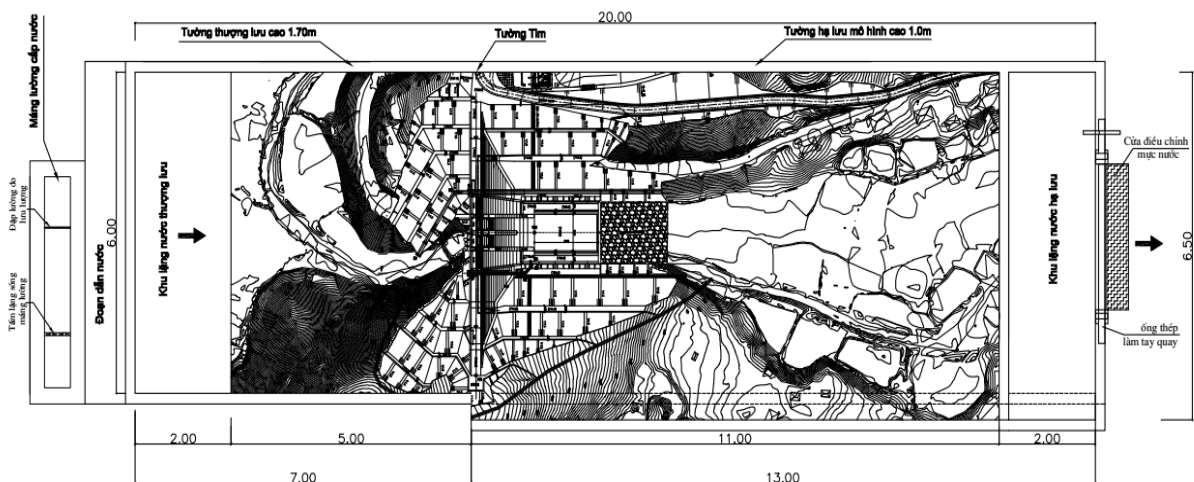
Đập Chiềng Dong là bê tông trọng lực Cao trình đỉnh đập là 762m, chiều dài đỉnh đập dâng bờ phải là 58,8m, bờ trái là 52,0m, chiều rộng 6m.



Hình 1.14 Cắt ngang bể tiêu năng



Hình 1.15 Kết cấu công trình hoàn thiện



Hình 1.16 Mặt bằng tổng thể xây dựng mô hình

** Đánh giá*

Công trình tiêu năng của Hệ thống thủy lợi Nà Sản – Sơn La bố trí theo dạng mặt cắt ngang kết hợp hình thang và hình chữ nhật, tuy vậy nước nhảy chân công trình xuất hiện trong khu mặt cắt ngang hình thang.

Thí nghiệm nghiên cứu mô hình cho thấy ở cấp lưu lượng thiết kế $Q = 426,3 \text{ m}^3/\text{s}$, chiều dài nước nhảy 39m.

Hiệu quả tiêu năng của công trình khi sử dụng nước nhảy ngập có các mô nhám tiêu năng dạng răng lược đạt từ 72,74% ÷ 76,99% [5], cho thấy tính khả thi và tối ưu của công trình tiêu năng có mặt cắt ngang hình thang.

1.5 Các yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến đặc trưng hình học nước nhảy

1.5.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến độ sâu liên hiệp nước nhảy

Nghiên cứu Hiện tượng nước nhảy là việc xác định cấu tạo nước nhảy, bao gồm độ sâu dòng chảy phân giới, độ sâu liên hiệp và chiều dài nước nhảy. Từ các nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết, cho thấy các yếu tố ảnh hưởng tới độ sâu của nước nhảy được thể hiện như sau:

- Số Froude trước nước nhảy, giá trị số Froude càng lớn, thì tỷ lệ độ sâu liên hiệp sau và trước nước nhảy, tiêu hao năng lượng trong nước nhảy càng lớn, điều này thể hiện trong phân loại nước nhảy (Bảng 1.1) [45][82], yếu tố này được thể hiện trong nhiều nghiên cứu phân tích độ sâu dòng chảy của nước nhảy, có thể thấy trong nghiên cứu của Roushangar, K. và Homayounfar, F. (2013) [36].

- Độ nhám của lòng dẫn, trong các nghiên cứu cơ bản, thường bỏ qua ma sát lòng dẫn, dẫn đến các tính toán lý thuyết thường cho các giá trị không phù hợp với thực tế, một số khảo sát đối với nước nhảy trên kênh chữ nhật đã phân tích và đưa vào ảnh hưởng của ma sát đáy, như Rajaratnam (1966) [16] đưa vào hệ số lực cắt đáy, Pagliara và Palermo (2015) [52] khi xem độ nhám đáy lòng dẫn đều có xét đường kính hạt ở tỷ lệ 50% hoặc các trường hợp mô nhám lớn đáy bằng hoặc đáy dốc đều cho tỷ lệ độ sâu liên hiệp trong nước nhảy khác nhau.

- Ảnh hưởng của phân bố lưu tốc, như Sarma và Newnham (1975)[16] sử dụng hệ số sửa chữa động lượng $\alpha = 1,045$ để tính toán độ sâu liên hiệp nước nhảy trên kênh chữ nhật và cho thấy hệ số của số Froude lớn hơn (có giá trị 10,4 thay cho 8 như trong công thức của Belanger, 1828).

- Độ dốc đáy lòng dẫn của kênh, các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra sự thay đổi độ sâu liên hiệp nước nhảy theo độ dốc lòng dẫn đáy kênh cho cả kênh mặt cắt ngang chữ nhật và mặt cắt ngang hình thang, điều này thể hiện ở độ dốc âm hoặc dương đều cho các công thức tính giá trị tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy khác nhau. Đối với nước nhảy trên đáy dốc của kênh mặt cắt ngang chữ nhật có Mahmoud A.R. Eltoukhy (2016) [44] đưa dốc đáy ($S^{1/2}$) vào công thức tính độ sâu liên hiệp và các nghiên cứu khác, với mặt cắt ngang hình thang cân đã thể hiện ở các nghiên cứu của Samir K. (2014) [70], Siad R. (2018) [71] và các trường hợp độ dốc có kèm đáy nhám lớn hoặc các mô sau nước nhảy (nghiên cứu của Nasrin H. và cộng sự, 2017[51]).

- Đặc trưng hình học khác của kênh, đối với kênh hình thang cân thì độ sâu liên hiệp nước nhảy bị ảnh hưởng nhất định bởi hệ số mái dốc kênh (m) như nghiên cứu của Shahin S.A và cộng sự (2018) [72], ảnh hưởng bởi độ sâu phân giới (y_c) như nghiên cứu A.N. Rakhmanov (1930), sự nối tiếp các dạng mặt cắt khác nhau như nghiên cứu của Siad Rafik (2018)[71]...

1.5.2 Các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy

Qua phân tích các công thức tính chiều dài nước nhảy đã có của các tác giả, nhận thấy chiều dài nước nhảy phụ thuộc vào một số yếu tố sau:

+ Độ sâu trước nước nhảy (y_1), biểu thị cho năng lượng và tốc độ dòng chảy phát sinh ra nước nhảy, có thể kể đến các nghiên cứu cho mặt cắt ngang chữ nhật của Chertoussov (1935) [16], Hager (1992)[30] ..., công thức tính cho mặt cắt hình thang của Rajaratnam và Subramanya (1968) [56].

+ Độ sâu sau nước nhảy (y_2), biểu thị cho sự ổn định năng lượng dòng chảy sau nước nhảy, đối với mặt cắt ngang chữ nhật có khá nhiều các công thức liên quan như Ludin (1927) [16], Safranez (1933-39) [16], Page (1935) [16], Mahmoud Ali R. Eltoukhy (2016) [42], H. V. Hùng và L. X. Hiền (2017), về mặt cắt hình thang có nghiên cứu của Posey C. J. và Hsing P. S. (1938) [55], N. Afzal (2002) [50]... các nghiên cứu này cho thấy chiều dài nước nhảy phụ thuộc chủ yếu vào y_2 .

+ Chênh lệch mức nước trước và sau nước nhảy ($y_2 - y_1$), biểu thị cho chênh lệch dòng chảy trước và sau nước nhảy, các công thức nghiên cứu về chiều dài nước này phụ thuộc khác nhiều vào yếu tố này, như đối với mặt cắt ngang chữ nhật có Bakhmeteff, Matzke (1936) [16], Smetana(1935) [16], Wu (1949) [16], Triatmojo

(1993) [16], Bambang Sulistiono, Lalu Makrup (2017) [17]..., mặt cắt ngang hình thang có nghiên cứu của Silvester, R (1964) [63], Ohtsu (1976) [59].

+ Tỷ lệ độ sâu sau và trước nước nhảy ($y_2/y_1, y_1/y_2$), tỷ lệ này cũng được xem xét đến trong một số nghiên cứu về chiều dài nước nhảy, thể hiện trong các nghiên cứu về mặt cắt chữ nhật của Woycicki (1931) [16], Bambang Sulistiono, Lalu Makrup (2017) [17]..., về mặt cắt hình thang có N. Afzal (2002) [50].

+ Số Froude trước nước nhảy (Fr_1), giá trị này ảnh hưởng khá sâu sắc đến chiều dài nước nhảy, có thể thấy trong nghiên cứu về mặt cắt ngang hình chữ nhật của Ivanchenko (1935) [16], Wu (1949)[16], Silvester (1964) [63], Hager (1992)[30], Mahmoud Ali R. Eltoukhy (2016) [41], Bambang S., Lalu M. (2017)[17], H. V. Hùng và L. X. Hiền (2017), Roushangar, K. và Homayounfar, F. (2019)[36]..., đối với mặt cắt ngang hình thang có Rajaratnam và cs (1968)[56], Kateb S. (2014)[70]...

+ Độ sâu phân giới của dòng chảy (y_c), giá trị này cũng có ảnh hưởng nhất định đến chiều dài nước nhảy, điều này được thể hiện trong nghiên cứu của Abolfazl N.G (2013) [13] từ phân tích mối quan hệ của các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy theo lý thuyết Pi của Buckingham đến xây dựng công thức nghiệm.

+ Số Reynolds, yếu tố ảnh hưởng này thể hiện trong nghiên cứu thực nghiệm của Sanjeev K.G và cộng sự (2013) [75]

Từ các phân tích ảnh hưởng của các yếu tố đến chiều dài nước, cho thấy giá trị chiều dài nước nhảy phụ thuộc vào các thông số cơ bản:

$$L_j = f(y_1, y_2, y_c, Fr_1, Re, e) \quad (1.53)$$

Phương trình (1.53) mô tả các mối quan hệ thực nghiệm giữa chiều dài nước nhảy và các yếu tố ảnh hưởng. Trong đó, L_j và L_r có mối quan hệ với nhau, do vậy các đặc điểm của (1.53) cũng được xem tương tự cho L_r .

1.6 Vấn đề đặt ra và hướng nghiên cứu

1.6.1 Các vấn đề cần nghiên cứu

Tổng quan các nghiên cứu đối với kênh lắng trụ hình chữ nhật và hình thang có bề mặt phẳng với điều kiện đáy bằng hoặc đáy dốc cho thấy:

+ Nước nhảy có vai trò rất quan trọng trong ứng dụng đối với các công trình thực tế, đặc biệt thiết kế tiêu năng cho dòng chảy sau công trình (đập tràn, cống), nói

tiếp các kênh. Mỗi loại nước nhảy đều có những đặc điểm riêng về hình thái động lực học và đặc biệt là khả năng tiêu năng của dòng chảy. Điều này cho thấy nghiên cứu nước nhảy trên lòng dẫn lắng trụ đối với từng loại nước nhảy là rất cần thiết và là cơ sở khoa học để đi đến một kết quả có độ chính xác cao.

+ Đối với độ sâu liên hiệp nước nhảy, thì kênh có mặt cắt ngang hình chữ nhật chủ yếu sử dụng công thức của Belanger (1828) làm cơ sở nghiên cứu. Trong khi đó, độ sâu liên hiệp của nước nhảy đối với kênh hình thang cân có các nghiên cứu lý thuyết cơ bản nhưng chưa chỉ ra rõ ràng các minh chứng hoặc chỉ được nghiên cứu thực nghiệm. Nên vẫn còn hạn chế rất lớn trong áp dụng trong thực tế.

+ Các nghiên cứu về chiều dài nước nhảy từ kênh có mặt cắt ngang hình chữ nhật đến kênh hình thang cân, chủ yếu là các công thức thực nghiệm, tuy các nghiên cứu khá phong phú, nhưng phạm vi ứng dụng chưa chỉ rõ, ứng dụng thực tế đối với nước nhảy tự do vẫn còn nhiều vấn đề chưa phù hợp.

+ Phân tích cũng cho thấy các nghiên cứu nước nhảy trong kênh hình thang với mái dốc $m = 1$ vẫn chưa được hoàn thiện, các kết quả nghiên cứu mới dừng ở thực nghiệm hoặc phân tích lý thuyết mà chưa có kiểm chứng. Đồng thời, dựa trên đặc trưng một số công trình thực tế đã có, cho thấy nghiên cứu nước nhảy trong kênh hình thang với hệ số mái dốc $m = 1$ vẫn còn cần hoàn thiện hơn.

+ Căn cứ trên cấu trúc nước nhảy trên kênh lắng trụ (mặt cắt ngang hình chữ nhật và hình thang), cho thấy độ sâu trước nước nhảy (y_1) thống nhất cho các nghiên cứu, còn độ sâu sau nước nhảy được phân chia ra độ sâu sau khu xoáy (y_r) và độ sâu liên hiệp của nước nhảy (y_2), vị trí xác định 2 giá trị độ sâu này tương ứng với 2 giá trị chiều dài của nước nhảy là chiều dài khu xoáy (L_r) và chiều dài nước nhảy (L_j).

Do tính chất của nước nhảy không ổn định, nên việc xác định vị trí kết thúc của nước nhảy là rất khó khăn, phụ thuộc vào quá trình thực nghiệm trên mô hình vật lý, trong khi đó vị trí cuối khu xoáy của nước nhảy thì xác định thuận lợi hơn (dựa trên dòng xoáy cuộn, đặc trưng các bọt khí trong nước nhảy và đường mặt nước trên bề mặt). Nên nghiên cứu ở đây tập trung phân tích đối với các yếu tố hình học trong khu xoáy của nước nhảy.

Từ các phân tích trên, cho thấy nghiên cứu nước nhảy trên kênh hình thang cân, đặc biệt là nước nhảy sau công trình đập tràn có ý nghĩa thiết thực trong phân tích khoa học và ứng dụng cho các công trình thực tế.

1.6.2 Định hướng nghiên cứu

Định hướng nghiên cứu sẽ tập trung vào một số nội dung sau:

+ *Đối với lý thuyết:*

Giải bài toán lý thuyết về xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy. Xuất phát từ hệ phương trình vi phân Navier-Stokes, xác định các điều kiện biên nghiên cứu cho lòng dẫn có mặt cắt ngang hình thang cân, đáy bằng để xác định phương trình tính toán độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy của nước nhảy (y_1 , y_r). Sử dụng phương trình cân bằng năng lượng để phân tích xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy (L_r).

+ *Đối với thực nghiệm:*

Nghiên cứu nước nhảy bằng mô hình vật lý để kiểm định các công thức lý thuyết, xác định các hệ số thực nghiệm đối với các đặc trưng của nước nhảy.

Trong đó, nghiên cứu đi sâu về nước nhảy ổn định (có $Fr_{D1} = 4,0 - 9,0$) trong lòng dẫn lắng trụ có mặt cắt ngang hình thang cân (có đáy bằng và hệ số mái dốc lòng dẫn $m = 1$). Đặc biệt, sử dụng mô hình vật lý lòng cứng có kích thước lớn (như lòng dẫn của kênh tiêu năng thí nghiệm là $b = 33,5\text{cm}$ và $b = 55\text{cm}$) nhằm đảm bảo sự phù hợp giữa các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và công trình thực tế.

1.7 Kết luận Chương I

Nghiên cứu nước nhảy trên thế giới và Việt Nam rất phong phú, các nghiên cứu về kênh chữ nhật tương đối đa dạng và có nhiều áp dụng cụ thể trong thực tế. Tuy nhiên đối với nước nhảy trong kênh hình thang, có ít nghiên cứu và chủ yếu là nghiên cứu thực nghiệm mô hình, đặc biệt việc áp dụng các công thức vào thực tế công trình vẫn chưa được chuẩn hóa và có những hướng dẫn cụ thể.

Nghiên cứu đã thực hiện được các vấn đề sau:

① Thể hiện các khái niệm cơ bản, phân loại và đặc trưng thủy động lực học của nước nhảy để phục vụ cho quá trình nghiên cứu và đánh giá thuận lợi hơn.

② Tổng hợp được các nghiên cứu (10 công thức) về xác định độ sâu phân giới (y_c) cho kênh hình thang và đã phân chia thành 4 phương pháp nghiên cứu cơ bản.

③ Trình bày được các nghiên cứu về đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình chữ nhật, trong đó thống kê được 06 nghiên cứu về độ sâu liên hiệp, 30 công thức về chiều dài nước nhảy và 08 công thức về chiều dài khu xoáy nước nhảy.

④ Nghiên cứu về đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình thang, gồm có 08 nghiên cứu về độ sâu liên hiệp của nước nhảy, 11 nghiên cứu về chiều dài nước nhảy. Trong đó có 01 nghiên cứu về kênh hình thang có mái dốc $m = 1$, nhưng chưa giải quyết triệt để về xác định công thức và phạm vi nghiên cứu.

⑤ Trình bày về ứng dụng “Trí tuệ nhân tạo” trong nghiên cứu thủy lực và định hướng áp dụng mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên” vào nghiên cứu nước nhảy.

⑥ Phân tích được các yếu tố ảnh hưởng đến các đặc trưng hình học của nước nhảy từ các nghiên cứu đã có, nhằm mục đích xác định được mối liên hệ giữa các đặc trưng thủy động, để từ đó có cơ sở nghiên cứu xây dựng và đánh giá các công thức bán thực nghiệm và thực nghiệm cho phù hợp.

⑦ Xác định được vấn đề nghiên cứu về đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$, bao gồm độ sâu khu xoáy (y_1 và y_r), chiều dài khu xoáy của nước nhảy (L_r).

Nghiên cứu các đặc trưng hình học của nước nhảy sau đập tràn với các mô hình kích thước lớn, có tỷ lệ tương ứng với công trình trong thực tế, mang ý nghĩa thiết thực và rất cần thiết trong điều kiện hiện nay.

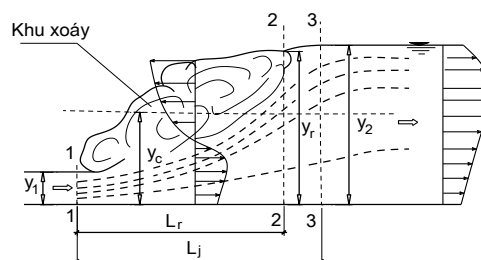
CHƯƠNG II – CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH LĂNG TRỤ MẶT CẮT HÌNH THANG

2.1 Cơ sở lý thuyết phân tích đặc trưng hình học của nước nhảy

2.1.1 Đặc điểm của nước nhảy

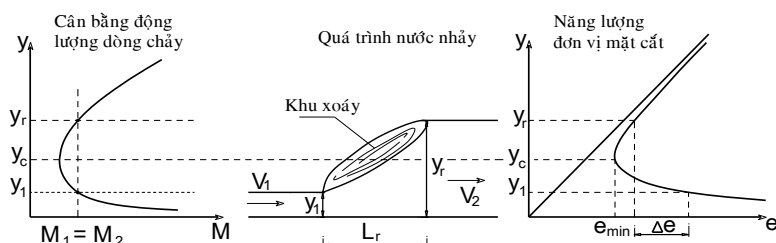
Trong nước nhảy, đặc tính của dòng tia rơi rất phức tạp, được xuất hiện trong cấu trúc dòng xoáy trên bề mặt và thành bên (kênh hình thang). Để giải các bài toán lý thuyết trong nước nhảy, phương pháp lớp biên do Prandtl (1904) [1] đề xuất đáp ứng được các yêu cầu nghiên cứu.

Các nghiên cứu cho thấy, sức cản dòng chảy xuất hiện ở lớp biên sát thành rắn và đặc tính dòng xoáy rơi trên bề mặt, các tổn thất này phụ thuộc độ sâu của dòng chảy và đặc điểm về độ nhám trên bề mặt [1]. Điều này cho thấy các quy luật tổn thất trong nước nhảy cũng tuân theo đặc điểm về tổn thất năng lượng trong dòng chảy.



Hình 2.1 Sơ đồ dòng tia và phân bố vận tốc của nước nhảy

Nghiên cứu hiện tượng nước nhảy tại thể tích kiểm tra, khu vực giới hạn bởi mặt cắt dòng chảy trước (1-1) và sau (2-2) khu xoáy của nước nhảy, các đặc trưng thủy động lực học tuân theo phương trình bảo toàn động lượng và năng lượng [13][27][82]. Mối quan hệ chứng minh cho quá trình hình thành và tiêu hao năng lượng của nước nhảy (ΔE), thể hiện như Hình 2.2.



Hình 2.2 Mối quan hệ động lượng, năng lượng với quá trình nước nhảy [27]

Như vậy, phương trình vi phân cơ bản Navier-Stokes (thể hiện quy luật bảo toàn động lượng) và phương trình cân bằng năng lượng là cơ sở quan trọng trong việc nghiên cứu đặc trưng hình học của nước nhảy.

2.1.2 Phương trình cơ bản xác định độ sâu dòng chảy của khu xoáy

2.1.2.1 Phương trình vi phân cơ bản của chất lỏng chuyển động

Chuyển động của chất lỏng phụ thuộc vào nhiều yếu tố, để xem xét các đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến chuyển động đến chất lỏng, thì phương trình vi phân cơ bản của Navier-Stokes đã mô tả được các đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy. Phương trình Navier-stokes được viết dưới dạng tổng quát như sau [27]:

$$\rho \underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}}_{\substack{\text{Gia tốc} \\ \text{tốc thời} \\ \text{Gia tốc} \\ \text{đối lưu}}} = -\underbrace{\nabla p}_{\substack{\text{Gradient} \\ \text{áp suất}}} + \underbrace{\mu \cdot \nabla^2 \mathbf{v}}_{\substack{\text{độ nhớt}}} + \underbrace{\mathbf{f}}_{\substack{\text{Lực}}} \quad (2.1)$$

Khi xem xét với chất lỏng không nén được, chuyển động liên tục, phương trình Navier-Stokes viết dưới dạng tọa độ Descartes như sau[1][27]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_x + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= F_y + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

trong đó:

u, v, w là thành phần lưu tốc trung bình thời gian theo phương x, y và z ;

ρ : khối lượng riêng của chất lỏng;

p : Áp suất trên bề mặt của khối chất lỏng;

τ_{ij} : Ứng suất trên bề mặt khối chất lỏng theo phương i và j ;

F_x, F_y, F_z là lực khối đơn vị theo phương x, y, z .

Phương trình (2.2) không thể tìm lời giải chính xác bằng các phương pháp tích phân thông thường, mà thường được giải gần đúng bằng phương pháp số hoặc phương pháp giải tích với các điều kiện biên kèm theo.

Trong nghiên cứu ở đây, sử dụng phương trình (2.2) giải theo phương pháp lớp biên do Prandtl (1904) đề xuất, sau đó tích phân và xác định phương trình đại số cơ bản áp dụng trong nghiên cứu nước nhảy.

Phương trình (2.2) với điều kiện riêng của dòng chảy trong khu vực nước nhảy, sẽ được phân tích và giải tìm nghiệm xác định các đặc trưng về độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy của nước nhảy.

2.1.2.2 Các giả thiết áp dụng cho phương trình Navier-Stokes

Các giả thiết áp dụng cho quá trình giải phương trình Navier-Stokes như sau:

- + Dòng chảy ổn định, liên tục: $Q = \text{const}$;
- + Quy luật phân bố áp suất theo quy luật thủy tĩnh;
- + Lực khối là trọng lực, chiếu lên phương dọc trục x (hướng chuyển động của dòng chảy): $F_x = g$

+ Chất lỏng không nén được có $\rho = \text{const}$, hay $d\rho/dt = 0$

+ Mặt cắt lăng trụ đối xứng;

+ Coi thành phần ma sát rời của dòng chảy tỷ lệ với cột nước lưu tốc.

2.1.2.3 Phương trình Navier-Stokes cho dòng chảy chất lỏng chuyển động

Để giải phương trình Navier-Stokes cho dòng chảy trong hệ thống không gian bất kỳ, tích phân phương trình vi phân (2.2) trên mặt cắt ngang A bằng cách tích phân từng số hạng của phương trình.

Với điều kiện: tại $z = 0$ thì $u, v, w = 0$ và trên mặt thoáng thì $u = u_n$.

$$\int_A \frac{\partial u}{\partial t} dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_A u dA - u \frac{\partial A}{\partial t} \Big|_0^A = \frac{\partial Q}{\partial t} - u_n \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \int_A v \frac{\partial u}{\partial y} dA &= uv \frac{\partial A}{\partial y} \Big|_0^A - \int_A u \frac{\partial v}{\partial y} dA = u_n v \frac{\partial A}{\partial y} - \int_A u \frac{\partial v}{\partial y} dA \\ \int_A w \frac{\partial u}{\partial z} dA &= uw \frac{\partial A}{\partial z} \Big|_0^A - \int_A u \frac{\partial w}{\partial z} dA = u_n w \frac{\partial A}{\partial z} - \int_A u \frac{\partial w}{\partial z} dA \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow \int_A v \frac{\partial u}{\partial y} dA + \int_A w \frac{\partial u}{\partial z} dA = u_n \left(v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \left[\int_A u \frac{\partial v}{\partial y} dA + \int_A u \frac{\partial w}{\partial z} dA \right] \quad (2.5)$$

Xét phương trình vi phân liên tục của dòng chảy không nén được, có:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad -\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow -\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial A} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial A} \left(w \frac{\partial A}{\partial z} \right)$$

$$\Rightarrow -\int_A \frac{\partial u}{\partial x} dA = v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z} \quad (2.7)$$

Thay (2.6) và (2.7) vào (2.5) có

$$\begin{aligned} \int_A v \frac{\partial u}{\partial y} dA + \int_A w \frac{\partial u}{\partial z} dA &= -u_n \int_A \frac{\partial u}{\partial x} dA + \int_A u \frac{\partial u}{\partial x} dA \\ &= -u_n \frac{\partial}{\partial x} \int_A u dA + u_n^2 \frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_0^A + \int_A u \frac{\partial u}{\partial x} dA \\ \Rightarrow \int_A v \frac{\partial u}{\partial y} dA + \int_A w \frac{\partial u}{\partial z} dA &= -u_n \frac{\partial Q}{\partial x} + u_n^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \int_A u \frac{\partial u}{\partial x} dA \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\int_A u \frac{\partial u}{\partial x} dA = \frac{\partial}{\partial x} \int_A u^2 dA - u_n^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (2.9)$$

Thay (2.9) vào (2.8) có:

$$\int_A v \frac{\partial u}{\partial y} dA + \int_A w \frac{\partial u}{\partial z} dA = -u_n \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_A u^2 dA \quad (2.10)$$

$$\int_A \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dA = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_A p dA = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.11)$$

Áp lực bề mặt được tính theo công thức:

$$P = \int_A p dA \quad (2.12)$$

Các tích phân về ứng suất bề mặt khối chất lỏng nghiên cứu được xác định theo lực ma sát trên bề mặt (T_{ij}) của khối chất lỏng như sau:

$$\begin{cases} \int_A \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} dA = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} = \int_A \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dA \\ \int_A \frac{\partial}{\partial y} \tau_{xy} dA = \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} = 0 \\ \int_A \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} dA = \frac{\partial}{\partial x} \int_A \tau_{zx} dA - \tau_{zx} \cdot A \Big|_0^y = \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} - \tau_o A \end{cases} \quad (2.13)$$

trong đó với dòng chảy 1 chiều theo phương x sẽ có:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0 \quad \tau_{xx} = \sigma_{xx} \text{ (ứng suất pháp theo phương x)}$$

$$z = 0 \quad \tau_{zx} = \tau_o \text{ (ứng suất tiếp)}$$

$$z = y \quad \tau_{zx} = 0$$

Từ các giá trị (2.3), (2.10), (2.11) và (2.13), tích phân phương trình Navier-Stokes viết theo không gian chuyển động như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_A u^2 \cdot dA - u_n \frac{\partial Q}{\partial x} - u_n^2 \frac{\partial A}{\partial x} = \int_A F_x \cdot dA - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\int_A \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dA - \tau_o A \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.1.2.4 Tích phân phương trình Navier-Stokes cho nước nhảy trong kênh lắng trụ đáy bằng

Từ các giả thiết trên, áp dụng cho phương trình (2.14), rút ra được:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_A u^2 dA = \int_A g_i \cdot dA - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \tau_o A \right) \quad (2.15)$$

Nghiên cứu cho trường hợp kênh đáy bằng: $i = 0$, từ (2.15) có:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial x} \int_A u^2 dA + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \int_A \frac{\sigma_{xx}}{\partial x} dA \right) = \frac{\tau_o}{\rho} A \\ \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_A \left(u^2 + \frac{\tau_{zx}}{\rho} \right) dA + \frac{1}{\rho} \int_A (p + \sigma_{xx}) \cdot dA \right) = \frac{\tau_o}{\rho} A \\ \Rightarrow \int_A (u^2 + \beta u^2) dA + \frac{1}{\rho} \int_A p dA = \frac{\tau_o}{\rho} A \end{aligned} \quad (2.16)$$

trong đó:

$$\tau_{zx} = \tau_{rối} + \tau_{tàng}$$

Chỉ xét khuếch tán rối, nên giá trị $\tau_{tàng} \approx 0$, như vậy sẽ còn lại:

$$\tau_{zx} = \tau_{rối} = \rho \beta u^2$$

với β là hệ số khếch tán rối theo phương dòng chảy (xx).

Lại có:

$$\int_A (u^2 + \beta u^2) dA = \alpha_o V^2 A$$

$$\int_A (p + \sigma_{xx}) dA = \gamma \cdot z_c A$$

$\tau_o = \rho \zeta V^2$ với ζ là hệ số đặc trưng mức độ rối, ảnh hưởng về tổn thất

ma sát của dòng chảy tại mặt cắt nghiên cứu [1]

Thay vào (2.16) có phương trình:

$$(\alpha_o - \zeta) V^2 A + \frac{1}{\rho} \gamma \cdot z_c A = C$$

Rút gọn phương trình như sau:

$$A \left(\frac{\alpha_o^* V^2}{g} + z_c \right) = C_o \quad (2.17)$$

với C_o : Hằng số tích phân

Xét (2.17) tại 2 mặt cắt (1-1) và (2-2) của dòng chảy trước và sau khu xoáy của nước nhảy, phương trình thể hiện như sau:

$$A_1 \left(\frac{\alpha_{o1}^* V_1^2}{g} + z_{c1} \right) = A_2 \left(\frac{\alpha_{o2}^* V_2^2}{g} + z_{c2} \right) \quad (2.18)$$

trong đó: α_{oi}^* : Hệ số sửa chữa động lượng có xét đến ảnh hưởng quá trình

dòng rối mạnh (với $\alpha_o^* = \alpha_o - \zeta$);

A_i : Diện tích mặt cắt ướt (m^2);

z_{ci} : Độ sâu trọng tâm mặt cắt ướt (m);

Phương trình (2.18) là tích phân của phương trình Navier-Stokes theo phương chuyển động của dòng chảy, phương trình thể hiện ý nghĩa của định luật bảo toàn động lượng của dòng chảy. Các hệ số và thông số khếch tán rối được biểu thị thông qua các hệ số thực nghiệm.

Phương trình (2.18) được sử dụng để tính độ sâu khu xoáy của nước nhảy trên kênh lắng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang bất kỳ.

2.1.3 Phương trình cơ bản xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy

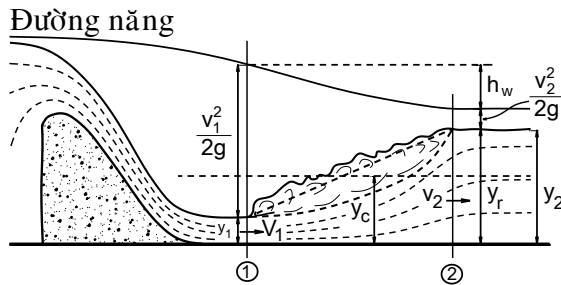
2.1.3.1 Các giả thiết cơ bản

Một số giả thiết áp dụng cho phương trình năng lượng trong xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy:

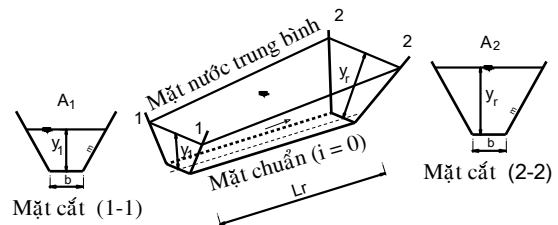
- + Chất lỏng không nén được, chuyển động liên tục;
- + Dòng chảy ổn định thay đổi dần;
- + Các đặc trưng thủy lực được phân tích theo tính chất trung bình từ độ sâu y_1 đến y_r (đường mặt nước, đường năng...);
- + Nghiên cứu cho kênh đáy bằng (độ dốc đáy $i = 0$).

2.1.3.2 Phương trình xác định chiều dài dòng chảy

Chuyển động của chất lỏng luôn thỏa mãn điều kiện cân bằng về năng lượng, đối với dòng chảy trong nước nhảy từ mặt cắt trước nước nhảy (1-1) đến mặt cắt sau nước nhảy (2-2), đã chịu ảnh hưởng từ thành phần lực ma sát của dòng chảy và sự xáo trộn của dòng chảy 2 pha trong khu xoáy của nước nhảy. Nghiên cứu với giả thiết dòng chảy trong khu xoáy của nước nhảy coi chuyển động của chất lỏng ở trạng thái thay đổi dần từ mặt cắt trước sang mặt cắt sau khu xoáy với trạng thái ổn định trong dòng chủ lưu. Xem xét phương trình cân bằng năng lượng cho chuyển động của dòng chảy từ mặt cắt (1-1) sang mặt cắt (2-2), thể hiện tại sơ đồ Hình 2.3 và Hình 2.4.



Hình 2.3 Sơ đồ dòng tia và mặt cắt ướt của nước nhảy sau đập tràn



Hình 2.4 Sơ đồ phân tích phương trình năng lượng trong nước nhảy

Gọi tổn thất năng lượng giữa 2 mặt cắt trước và sau khu xoáy là ΔE , tiêu hao năng lượng này được mô tả bởi 2 tổn thất dòng chảy, gồm tổn thất cục bộ và tổn thất dọc đường, như sau:

$$\Delta E = h_d + h_c \quad (2.19)$$

Các giá trị tổn thất được xác định như sau:

+ Tổn thất cục bộ (h_c) được coi như loại tổn thất mở rộng đột ngột. Do dòng chảy trong nước nhảy có mặt cắt mở rộng dần từ A_1 đến A_2 , đường mặt nước trung bình có dạng logarit, dòng chảy đột biến mở rộng sẽ ngắn hơn chiều dài dòng chảy khu xoáy ($0 < x < L_r/2$) [1], nên để xác định giá trị tổn thất cục bộ trung bình cho toàn khu xoáy, nghiên cứu đã sử dụng vận tốc trung bình giữa 2 mặt cắt để phân tích tổn thất theo định dạng của công thức Boorda-Canot.

Tổn thất cục bộ được xác định như sau:

$$h_c = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_{tb}^2}{2g} \quad (2.20)$$

+ Tổn thất dọc đường (h_d) được xác định theo phương trình cơ bản của dòng đều và tính với độ dốc thủy lực trung bình có dạng tuyến tính trong khu xoáy (độ dốc đường năng), nghiên cứu trong trạng thái dòng chảy rối thành nhám. Tổn thất dọc đường được xác định như sau:

$$h_d = \frac{Q^2}{K_{tb}^2} L \quad (2.21)$$

Thay (2.20), (2.21) và (2.19) vào phương trình (2.24) có:

$$\Delta E = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{V_{tb}^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_{tb}^2} L \quad (2.22)$$

$$\Rightarrow L = \frac{\Delta E - \left(1 - A_1 / A_2\right)^2 (V_{tb}^2 / 2g)}{(Q / K_{tb})^2} \quad (2.23)$$

trong đó:

h_{tb} là độ sâu dòng chảy trung bình giữa 2 mặt cắt trước và sau nước nhảy

$$h_{tb} = \frac{y_1 + y_r}{2}$$

V_{tb} , K_{tb} là vận tốc và Môđun lưu lượng trung bình giữa 2 mặt cắt tính theo h_{tb} .

$$K_{tb} = A_{tb} C_{tb} \sqrt{R_{tb}}$$

A_{tb} , C_{tb} và R_{tb} là diện tích mặt cắt, hệ số Chezy và bán kính thủy lực tính theo giá trị h_{tb} .

ΔE là tiêu năng trong nước nhảy (m), được thể hiện như sau:

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right) - \left(y_r + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right) \quad (2.24)$$

Công thức (2.23) là công thức lý thuyết xác định chiều dài từ mặt cắt 1-1 đến mặt cắt 2-2 của dòng chảy, phương trình này thiết lập dựa trên dòng chảy ổn định thay đổi dần, được sử dụng làm cơ sở để nghiên cứu chiều dài khu xoáy của nước nhảy.

Trong thực tế, có rất nhiều các yếu tố tác động để hình thành nên chiều dài khu xoáy của nước nhảy, đặc biệt quá trình dòng tia rơi và khuếch tán bán không gian ở trên mái kênh dẫn. Trong đó công thức xác định chiều dài từ tổn thất dọc đường có

ý nghĩa biểu thị tương tự như đặc trưng về ứng suất bề mặt đáy của dòng chảy, nên có thể coi là thành phần lực ma sát lên dòng chảy, nhưng chưa mô tả được đặc trưng khuếch tán rối trong lòng dẫn và bề mặt mái dốc kênh.

Bên cạnh đó, công thức công thức (2.23) được viết trong điều kiện dòng chảy ổn định, nhưng đối với đặc trưng của khu xoáy của nước nhảy là sự biến đổi mở rộng đột ngột về dòng chảy, nên công thức (2.23) sẽ cho giá trị rất lớn so với thực tế chiều dài khu xoáy của nước nhảy. Vì vậy, xác định chiều dài của khu xoáy thì cần phải bổ sung các hệ số theo nghiên cứu thực nghiệm.

2.2 Cơ sở lý thuyết tương tự và mô hình hóa

2.2.1 Lý thuyết về phân tích thứ nguyên

2.2.1.1 Thứ nguyên của một đại lượng

Phân tích thứ nguyên là một phương pháp giải quyết một vấn đề vật lý bằng cách đồng nhất các tham số để giảm số lượng các biến có liên quan. Phân tích thứ nguyên rất hữu ích trong thực nghiệm mô hình vì nó cung cấp một chỉ dẫn về các yếu tố ảnh hưởng đến các hiện tượng được nghiên cứu [5][22].

Bảng 2.1 Các thứ nguyên cơ bản

TT	Đại lượng	Đơn vị	Thứ nguyên (Hệ MLT θ)
1	Khối lượng	kg	M
2	Chiều dài	m	L
3	Thời gian	s	T
4	Nhiệt độ	°C	θ

Hầu hết các phương pháp phổ biến được sử dụng trong phân tích thứ nguyên là phương pháp Rayleigh (nguyên lý cơ bản) và Lý thuyết Pi của Buckingham. Trong nghiên cứu ở đây, áp dụng dụng Lý thuyết Pi của Buckingham để phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới đối tượng nghiên cứu.

2.2.1.2 Lý thuyết Pi (Π) của Buckingham

Lý thuyết Pi (Π) được hiểu là số lượng nhóm không thứ nguyên để xác định một vấn đề bằng tổng số biến n (mật độ, độ nhớt ...) trừ đi số lượng các thứ nguyên cơ bản dùng để biểu thị các biến k (ví dụ như độ dài, thời gian và khối lượng...)[5].

Phương trình theo nhóm Pi thể hiện như sau:

$$\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) = 0 \quad (2.25)$$

Theo lý thuyết Pi của Buckingham, phương trình (2.25) được biến đổi thành mối quan hệ như sau:

$$\Pi_1 = \Psi(\Pi_2, \Pi_3 \dots \Pi_{n-k}) \quad (2.26)$$

Phương trình (2.26) được sử dụng để phân tích và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến đại lượng cần nghiên cứu, đồng thời chỉ ra các đặc trưng dữ liệu cần thu thập trong nghiên cứu thực nghiệm mô hình vật lý.

2.2.2 Các đại lượng đầu vào và ra của nghiên cứu

Các yếu tố liên quan, ảnh hưởng tới đặc trưng hình học của nước nhảy chia thành nhóm dữ liệu đầu vào và dữ liệu đầu ra. Các dữ liệu này được thể hiện như sau:

+ Dữ liệu đầu vào là các đại lượng chủ động điều khiển được theo ý định thí nghiệm gồm: Các thông số công trình và lưu lượng xả qua mô hình, độ sâu mực nước trước và sau nước nhảy.

+ Dữ liệu đầu ra là độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy, chiều dài khu xoáy cuộn của nước nhảy.

Bảng 2.2 Thứ nguyên của các thông số thủy lực đầu vào

TT	Thông số	Ký hiệu	Thứ nguyên
I	Đại lượng đầu vào		
1	Chiều rộng đáy kênh	b	[L]
2	Hệ số mái dốc	m	-
3	Lưu lượng dòng chảy	Q	[L ³ T ⁻¹]
4	Vận tốc dòng chảy trước nước nhảy	V ₁	[LT ⁻¹]
5	Độ sâu dòng chảy trước nước nhảy	y ₁	[L]
6	Khối lượng riêng của nước	ρ	[ML ⁻³]
7	Gia tốc trọng trường	g	[LT ⁻²]
8	Độ nhớt động lực của nước	μ	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
II	Đại lượng đầu ra		
9	Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy	y _r	[L]
10	Chiều dài khu xoáy của nước nhảy	L _r	[L]

2.2.3 Hiện tượng tương tự và chuẩn tương tự về kích thước mô hình vật lý

2.2.3.1 Hiện tượng tương tự

Hai hiện tượng gọi là tương tự (hay đồng dạng) là khi căn cứ trên đặc trưng của hiện tượng này có thể suy ra đặc trưng của hiện tượng kia khi dựa vào một phép biến đổi cơ bản nào đó. Do vậy, khi nghiên cứu về đặc trưng thủy động học của công trình, thiết kế chế tạo các thiết bị (oto, máy bay...) người ta thường dựa trên mô hình thí nghiệm tương tự [5].

Để xây dựng công thức thủy lực từ phương pháp phân tích thứ nguyên, hiện tượng tương tự đóng vai trò quan trọng trong xác định số mũ tương tự của đại lượng dẫn xuất nào đó.

Trong cơ học chất lỏng nói chung, thủy lực học công trình nói riêng có ba loại tương tự cơ bản [1][5]:

- + *Tương tự hình học*: Khi mô hình và nguyên mẫu có các đặc trưng hình học tương ứng tỷ lệ với nhau theo một tiêu chuẩn tương tự về chiều dài.

- + *Tương tự động học*: Tương tự về chuyển động của các thành phần giữa mô hình và nguyên mẫu. Hay nói cách khác khi các đại lượng về vận tốc, gia tốc ở các điểm tương ứng giữa mô hình và nguyên mẫu có đại lượng tương tự nhau.

- + *Tương tự động lực học*: Tương tự của lực tác dụng giữa mô hình và nguyên mẫu nhằm đảm bảo tỉ lệ như nhau của các véc-tơ lực giữa mô hình và nguyên mẫu.

Tương tự động lực học có thể kể đến các tương tự về số Reynolds và số Froude, 02 giá trị này được sử dụng để xây dựng mô hình nghiên cứu thí nghiệm.

2.2.3.2 Ứng dụng định luật tương tự cho dòng chảy hở

Trong kỹ thuật thường xây dựng mô hình thì các thông số không thứ nguyên phải được bảo toàn giữa mô hình và nguyên hình, các thông số này được sử dụng làm tiêu chuẩn để xây dựng mô hình.

Một số tiêu chuẩn được thể hiện như sau:

a. Tiêu chuẩn Reynolds

Số Reynolds là thông số phổ biến nhất trong nghiên cứu dòng chảy của thủy lực học, mô hình tương tự sử dụng số Reynolds thường áp dụng cho dòng có áp, như dòng chảy trong ống, dòng chảy trong máy bơm hoặc các dòng bao quanh vật chuyển động với vận tốc lớn (như máy bay, tàu thủy ...) [1][5][22]

Số Reynolds là tỷ số giữa lực quán tính và lực nhớt, do đó các vấn đề về dòng chảy của chất lỏng trong đó lực nhớt là chủ yếu. Khi số Reynolds nhỏ thì hiệu ứng nhớt là quan trọng, khi số Reynolds lớn thì hiệu ứng quán tính chiếm ưu thế. Các mô hình được thiết kế để tương tự theo luật Reynolds, thì số Reynolds của mô hình phải bằng số Reynolds của nguyên mẫu.

Tiêu chuẩn mô hình Reynolds giữa mô hình và nguyên hình luôn tương đồng, trạng thái chảy ở cả mô hình và nguyên hình luôn nằm trong khu vực chảy rối thành nhám.

b. Tiêu chuẩn Froude

Số Froude là một tham số không thứ nguyên quan trọng trong nghiên cứu dòng chảy không áp, thường sử dụng trong xây dựng mô hình cho kênh hở, dòng chảy qua đập tràn, nước nhảy, mô phỏng sóng tác dụng vào vật thể (tàu, thuyền ...). Về mặt vật lý, số Froude đại diện cho tỷ lệ giữa lực quán tính và lực hấp dẫn, nên ảnh hưởng của trọng lực tác động rất lớn trong mô phỏng theo tiêu chuẩn Froude [1][5][22].

Thực tế, mô hình tương tự theo số Froude thường được dùng phân tích các loại hình tác động của dòng chảy hở, như căn cứ trên số Froude phân loại nước nhảy, phân loại trạng thái chảy... do đó khi nghiên cứu trên mô hình phòng thí nghiệm, số Froude được dùng làm cơ sở nghiên cứu để đưa các kết quả từ mô hình thí nghiệm ra thiết kế công trình thực tế [78][81].

c. Tiêu chuẩn Weber

Tham số không thứ nguyên liên quan đến hiệu ứng sức căng bề mặt, số Weber trở thành một tham số quan trọng khi xử lý các ứng dụng liên quan đến giao diện của dòng chất lỏng như dòng chảy của chất lỏng trong màng mỏng và sự hình thành bong bóng. Tiêu chuẩn Weber là qui luật thể hiện các yếu tố của mô hình vật lý dựa trên số Weber, là tỷ số giữa căn bậc hai của lực quán tính và lực căng bề mặt.

Để đảm bảo dòng chảy không chịu ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài, số We nhỏ nhất cần lớn hơn 54 hay chiều sâu cột nước tràn nhỏ nhất là 0,03m [69]. Trong TCVN 8214:2009 cũng quy định độ sâu mực nước thí nghiệm mô hình không nhỏ hơn 2,0 cm (mục 3.1) [12], giá trị này có thể áp dụng trong một số thí nghiệm hiện trường, còn đo đạc thí nghiệm trên mô hình phải đảm bảo không nhỏ hơn 0,03m đối với độ sâu dòng chảy.

2.3 Các hàm toán học mô tả mối quan hệ giữa các dữ liệu

2.3.1 Một số thuật toán hồi quy

Các dạng hàm số hồi qui là hàm f nào đó để liên kết dữ liệu giữa hai biến X , Y với nhau. Một số thuật toán hồi qui được áp dụng trong nghiên cứu như sau:

a. Hồi quy tuyến tính

Hàm hồi quy tuyến tính có dạng:

$$Y = a.X + b \quad (2.27)$$

trong đó: a, b là các thông số cần xác định từ tập hợp bộ số $(x, y)_i$.

b. Hồi quy phi tuyến

- Tương quan đa thức

$$Y = a_1 + a_2.x + a_3.x^2 + a_4.x^3 + \dots + a_n.x^{n-1} \quad (2.28)$$

trong đó: $a_1, a_2, \dots, a_n$ là các hằng số tính toán

- Tương quan lũy thừa

$$Y = a.x^t \quad (2.29)$$

trong đó: a là hệ số, t là số mũ của hàm tương quan.

- Hàm tương quan phi tuyến đa biến

$$Y = a_1.X_1^{n1} + a_2.X_2^{n2} + \dots + a_i.X_i^{ni} \quad (2.30)$$

Các hàm tương quan trên được tính toán và phân tích đầy đủ trong phần mềm MS Excel và IBM SPSS 26 [25] khi xử lý dữ liệu nghiên cứu.

2.3.2 Tiêu chuẩn kiểm nghiệm kết quả tính toán

a. Hệ số tương quan (R^2)

Trong hồi quy, hệ số tương quan R^2 là một thước đo về mức độ gần đúng của các dự đoán hồi quy với các điểm dữ liệu thực. Giá trị R^2 đạt tới 1 chỉ ra rằng những dự đoán hồi quy hoàn toàn phù hợp với dữ liệu. Giá trị của R^2 nằm ngoài phạm vi 0 đến 1 có thể xảy ra khi mô hình phù hợp với dữ liệu kém, các giá trị siêu phẳng hoặc nằm ngang.

Hệ số tương quan được xác định như sau:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2.31)$$

trong đó:

+ SS_{res} : Tổng bình phương độ sai lệch giữa tính toán và thực đo

+ SS_{tot} : Tổng bình phương độ sai lệch so với giá trị trung bình

+ Giá trị trung bình được xác định như sau: $\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

+ y_i : Các giá trị thực đo

+ f_i : Các giá trị tính toán

Căn cứ vào phân tích dữ liệu thống kê, cho thấy giá trị R^2 sẽ cho mức độ đánh giá như Bảng 2.3 sau [46]:

Bảng 2.3 Đánh giá mức độ tương quan giữa các biến

TT	Hệ số R^2	Mức độ đánh giá
1	0,80 ÷ 1,000	Tương quan rất cao
2	0,60 ÷ 0,799	Tương quan cao
3	0,40 ÷ 0,599	Tương quan trung bình
4	0,20 ÷ 0,399	Tương quan thấp
5	0,00 ÷ 0,199	Tương quan rất thấp

Trong phần mềm MS Excel, IBM SPSS 26 các chuỗi số được đánh giá bằng chỉ số R^2 . Các hàm tương quan được xác định khi có số R^2 tốt hơn.

b. Sai số tương đối (ε)

Sai số tương đối được tính theo tỷ lệ phần trăm, nhằm mục tiêu đánh giá sai số giữa số liệu thực đo và tính toán.

$$\varepsilon = \frac{|y_i - f_i|}{f_i} \times 100 (\%) \quad (2.32)$$

Sai số tuyệt đối trung bình ε có giá trị từ 0 đến 100, khi giá trị sai số này càng gần 0 thì phương pháp tính toán càng đảm bảo độ chính xác về thuật toán.

c. Sai số tuyệt đối trung bình (MAE)

Sai số tuyệt đối trung bình (Mean Absolute Error – MAE) là chỉ số trung bình của các sai số trong một tập hợp các giá trị, nhưng không xem xét được xu. Sai số tuyệt đối giữa dự đoán và quan sát thực tế, được xác định như sau:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - f_i| \quad (2.33)$$

MAE càng gần 0, thì mô hình hồi quy càng tốt.

d. Sai số bình phương trung bình (MSE)

Sai số bình phương trung bình (Mean squared error - MSE) [85] là một công cụ dùng để đo giá trị trung bình bình phương của các sai số.

Thực tế là MSE luôn luôn có giá trị dương (luôn khác 0) là do ngẫu nhiên của giá trị thực tế tạo nên sự sai khác nhất định với giá trị dự báo. MSE là thước đo chất lượng của một công cụ ước lượng và có giá trị càng gần 0 càng tốt.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2 \quad (2.34)$$

e. Sai số chuẩn (RMSE)

Sai số chuẩn (Root Mean Square Error - RMSE) [85] là căn bậc hai của trung bình về sự khác biệt bình phương giữa giá trị dự đoán và quan sát thực tế.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2} \quad (2.35)$$

Giá trị RMSE càng gần 0, phương trình hồi quy càng tốt.

2.4 Lý thuyết cơ bản về mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên”

2.4.1 Khái quát chung

Học máy (Machine Learning) là một tập con của Trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence) được phát triển từ những thập kỷ 80 của thế kỷ 20 [8], Học Máy là một lĩnh vực của Khoa Học Máy Tính có khả năng tự học hỏi dựa trên cơ sở dữ liệu đưa vào mà không đòi hỏi các thuật toán lập trình cụ thể cho đối tượng nghiên cứu.

2.4.2 Đánh giá dữ liệu của nước nhảy và sự phù hợp với thuật toán Học máy

Dữ liệu sử dụng cho giải pháp Học máy phải đảm bảo tính độc lập và có mối liên hệ với mục tiêu phân tích. Trong nghiên cứu nước nhảy các đặc trưng hình học như độ sâu sau khu xoáy, chiều dài của nước nhảy có xét đến các yếu tố ảnh hưởng đều có tính độc lập và thỏa mãn các đặc trưng cơ sở dữ liệu áp dụng cho quá trình học máy. Để kiểm tra trong các mô hình Học máy, sẽ sử dụng một phần cơ sở dữ liệu để kiểm độ chính xác của mô hình.

Căn cứ vào trường dữ liệu phân tích ở trên, các số liệu thu thập trên mô hình vật lý tổng hợp lại gồm có (L_r, y_1, y_r, Q) là các giá trị độc lập, còn (m, b) là thông số của mô hình nghiên cứu, mỗi mô hình nghiên cứu có một giá trị hình học (m, b) riêng.

Nghiên cứu ở đây, sẽ xem xét sự biến đổi các thông số (L_r, y_1, y_r, Q) cho mỗi trường hợp thí nghiệm. Số lần làm thí nghiệm càng nhiều, cơ sở dữ liệu phân tích mối quan hệ giữa các biến mục tiêu và biến dữ liệu càng chặt chẽ.

Trong quan hệ hàm số, các thông số (L_r, y_1, y_r, Q) có một quan hệ chặt chẽ nào đó, tức là xây dựng được một hàm số để đảm bảo các dữ liệu “vừa khớp”. Nhưng thực tế có rất nhiều yếu tố tác động, cũng như sự biến đổi các thông số quan sát trong thực tế, nên dẫn đến các sai số ngẫu nhiên khách quan, điều này làm cho các thông số cơ bản hoặc các tổ hợp các thông số cơ bản sẽ phân tán, nhưng thường xoay quanh một giá trị hội tụ nào đó, căn cứ trên các giá trị này có thể dùng các thuật toán hồi quy để phân tích sự hội tụ của các thông số nước nhảy.

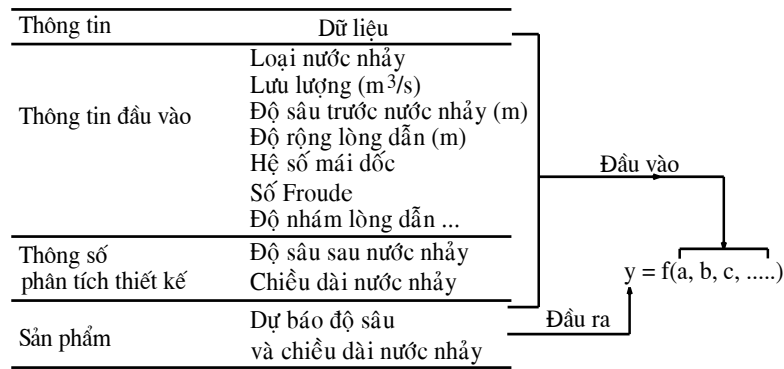
Điều này cho thấy, phương pháp Trí tuệ nhân tạo, Học máy hoặc Học sâu có thể áp dụng vào nghiên cứu đặc trưng hình học của nước nhảy.

2.4.3 Phân tích giải thuật “Học Máy” trong nghiên cứu đặc trưng nước nhảy

Áp dụng Học máy trong phân tích các đặc trưng thủy lực trong nước nhảy, được mô tả bằng một quy trình như sau:

+ **Bước 1.** Phân tích bài toán thủy lực cho hiện tượng nước nhảy trên kênh lắng trụ thông qua các phương trình toán học hoặc các công thức thực nghiệm đã có, để đánh giá mối quan hệ giữa các yếu tố thủy lực với nhau. Phần này thường dùng phương pháp kinh nghiệm (phân tích các công thức đã có) hoặc dùng phương trình toán học để mô tả (áp dụng lý thuyết Pi của Buckingham để phân tích).

Mô hình phân tích Học máy mô phỏng như Hình 2.5 với hàm số f là thuật toán dùng để phân tích trong mô hình Học máy, tham số ($a, b, c \dots$) là cơ sở dữ liệu đầu vào, giá trị y là hàm mục tiêu tính toán.



Hình 2.5 Sơ đồ phân tích Học máy cho dữ liệu trong nước nhảy

+ **Bước 2.** Xây dựng mô hình thí nghiệm, thực hiện thí nghiệm và thu thập các dữ liệu từ mô hình thí nghiệm vật lý, xử lý dữ liệu thô và xây dựng tập hợp thông số để đưa vào mô hình học máy để phân tích. Dữ liệu chia ra làm 2 loại: Dữ liệu mục tiêu (thông số cần dự đoán) và dữ liệu liên quan (biến phân tích). Dữ liệu mục tiêu cần phân tích là độ sâu sau khu xoáy (y_r) và chiều dài nước nhảy (L_r). Bên cạnh đó cần có 1 bộ dữ liệu sử dụng để kiểm định mô hình học máy.

+ **Bước 3.** Với rất nhiều các loại mô hình Học máy khác nhau, cần xác định mô hình phù hợp với đặc điểm của bài toán nghiên cứu

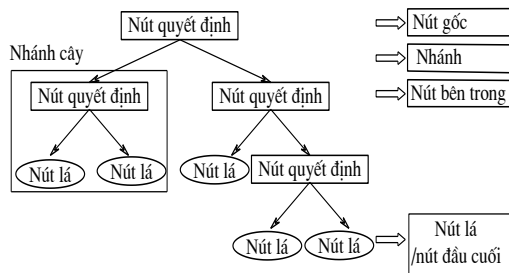
+ **Bước 4.** Kiểm tra tính toán dự báo mô hình nước nhảy. Dùng bộ dữ liệu kiểm định mô hình học máy đã xây dựng ở trên để dự báo các kết quả tính toán, so sánh kết quả tính toán với kết quả đo đạc thực tế, đánh giá sai số của mô hình.

Với các phân tích trên, dựa vào đặc điểm của mô hình Học máy, nghiên cứu sẽ phân tích đi sâu vào ứng dụng mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên”, trong đó mô hình “Cây quyết định” là một bộ phận cơ sở của mô hình “Rừng ngẫu nhiên”.

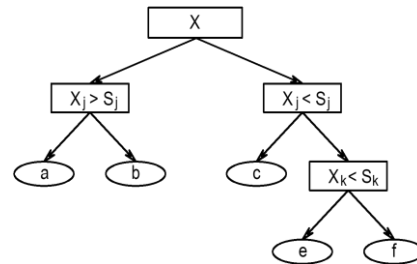
2.4.4 Mô hình học máy “Cây quyết định”

Cây quyết định là một trong những phương pháp tiếp cận mô hình dự đoán, được sử dụng trong thống kê, khai thác dữ liệu và phân tích xu hướng. Sử dụng cây quyết định (như một mô hình dự đoán) để đi từ các quan sát về một giá trị mục tiêu của thông số đó (biểu diễn trong các nhánh) đến kết luận (biểu thị trong các “lá”).

Thuật toán hồi quy của “Cây” sẽ sử dụng sai số trung bình bình phương (MSE) để quyết định tách một nút “Quyết định” thành hai nút “lá” và “nút quyết định” mới [39][61][77].



Hình 2.6 Sơ đồ phân tích mô hình Cây quyết định nhị phân



Hình 2.7 Cấu trúc thuật toán của cây quyết định nhị phân

Xem xét một “Cây quyết định nhị phân”, thuật toán đầu tiên sẽ chọn một giá trị và chia dữ liệu thành hai tập “con”. Đối với mỗi tập hợp “con”, mô hình sẽ tính toán giá trị MSE riêng biệt. “Cây” sẽ chọn “nhánh” giá trị có kết quả là giá trị MSE nhỏ nhất để tiếp tục phân tích [39][61][77]:

$$\min_R \left[\sum (y_i - y_R)^2 \right] \quad (2.36)$$

Trong đó: y_i là giá trị thực tế dự đoán trong vùng R; y_R là giá trị trung bình của vùng được chọn R.

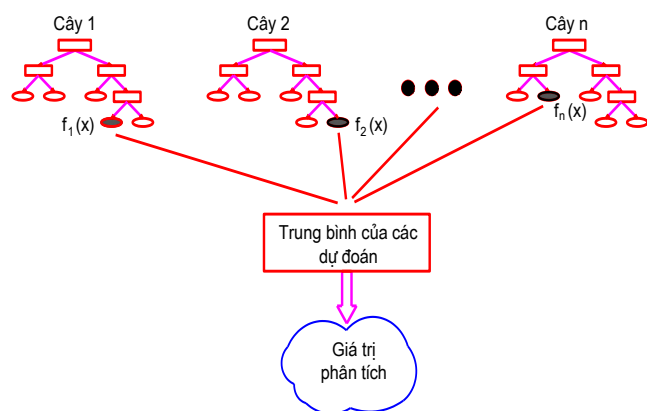
Cây quyết định nhị phân là mỗi nút chỉ có 2 phần “nhánh, lá” và phân tích lần lượt cho tất cả các biến trong trường dữ liệu.

2.4.5 Mô hình học máy “Rừng ngẫu nhiên”

“Rừng ngẫu nhiên” là một tập hợp của nhiều “Cây quyết định”, trong đó mỗi “Cây” được tạo ngẫu nhiên từ việc tái chọn mẫu (chọn ngẫu nhiên 1 phần của dữ liệu) và chọn ngẫu nhiên các biến từ toàn bộ các biến trong trường dữ liệu.

Với một cơ chế như vậy, “Rừng ngẫu nhiên” sẽ cho một kết quả chính xác cao hơn, nhưng không thể nắm bắt được cơ chế hoạt động của thuật toán, do cấu trúc quá phức tạp của mô hình [20][39][61][77].

Mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên” thuộc về phương pháp “Học có giám sát”.



Hình 2.8 Cấu trúc mô hình “Rừng ngẫu nhiên”

Thuật toán của mô hình rừng ngẫu nhiên có thể mô tả như sau:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x) \quad (2.37)$$

trong đó:

$f_i(x)$ là mô hình cơ sở của “Cây quyết định” thứ i

α_i : Trọng số của mô hình “Cây trong rừng”, $\sum \alpha_i = 1$

Kỹ thuật thể hiện trong (2.37) được sử dụng rộng rãi và có hiệu suất dự đoán tốt, còn được gọi là “Tập hợp các mô hình”.

2.5 Ứng dụng quy hoạch thực nghiệm trong nghiên cứu nước nhảy

2.5.1 Các đặc điểm của mô hình thí nghiệm đảm bảo điều kiện tương đồng với công trình thực tế

Nghiên cứu nước nhảy trong phòng thí nghiệm là việc xây dựng một mô hình thu nhỏ, trên đó phân tích các đặc trưng thủy động lực học, các hiện tượng và mối tương quan giữa các hiện tượng, trên cơ sở ứng dụng các phép biến đổi tương tự để đưa các kết quả nghiên cứu trên mô hình vào thiết kế công trình thực tế.

Mô hình thí nghiệm xác định các đặc trưng hình học của hiện tượng nước nhảy, bao gồm các tham số vật lý của mô hình được xem xét đến [32]:

+ *Đặc tính của chất lỏng*: khối lượng riêng, hệ số nhớt đảm bảo giữa mô hình và nguyên hình, nghiên cứu một loại chất lỏng là nước. Về sức căng bề mặt đảm bảo độ sâu dòng chảy tối thiểu ($y \geq 3\text{cm}$) trong mô hình thí nghiệm, đảm bảo điều kiện theo tiêu chuẩn Weber.

+ *Kích thước hình học*: Tỷ lệ mặt cắt ngang, mái dốc, vật liệu làm kênh (độ nhám bề mặt), quá trình hình thành nước nhảy sau công trình (đập tràn)... đảm bảo sự tương đồng giữa mô hình và công trình thực tế. Mô hình thí nghiệm dùng kính hữu cơ có hệ số nhám Manning $n = 0,011$ (áp dụng cho hệ số mô hình $\lambda_L = 20 \div 120$), tương đương hệ số nhám của bê tông trong công trình thực tế ($n = 0,015 \div 0,023$).

Kích thước mô hình lòng dẫn, đáp ứng điều kiện chiều rộng đáy kênh $b \geq 20\text{cm}$ (điều kiện loại bỏ ảnh hưởng của thành bên, sức căng bề mặt tác động lên dòng chảy trong mô hình thí nghiệm). Với các công trình nghiên cứu và thí nghiệm mô hình thực tế, cho thấy kích thước chiều rộng kênh hình thang đảm thí cho thí nghiệm mô

hình là $0,2m \leq b \leq 0,6m$ (thể hiện ở Bảng 1.4, hoặc như mô hình thí nghiệm của Thủy điện Nà Sản có $b = 0,58m$ [7], Thủy điện Hồi Xuân có $b = 0,5m$...). Khi thiết kế mô hình thí nghiệm, lựa chọn kích thước kênh phù hợp với đặc điểm và điều kiện thí nghiệm của cụm công trình đầu mối (đập tràn, cửa van...).

+ *Điều kiện biên của dòng chảy*: Lưu lượng, độ sâu trước và sau nước nhảy, chiều dài nước nhảy, vận tốc trung bình ... đều được xác định theo tỷ lệ ở dạng không thứ nguyên trên mô hình nghiên cứu. Để đảm bảo nghiên cứu thỏa mãn các tương quan giữa mô hình thí nghiệm và công trình thực tế, chỉ tiêu về cần đáp ứng là số Froude. Nên mô hình thí nghiệm cần đảm bảo dải dữ liệu về số Froude trong phạm vi nghiên cứu. Như vậy, các đặc trưng thủy động sẽ có quy luật biến đổi trên mô thí nghiệm tương tự với công trình trong thực tế.

+ *Các đặc tính của dòng 2 pha* (pha khí và lỏng), các trường chảy rối vi mô (như áp suất mạch động) ..., được nghiên cứu dưới dạng các đặc trưng sức cản dòng chảy trên mô hình.

+ *Hằng số vật lý cơ bản*: gia tốc trọng trường (g), độ dốc lòng dẫn ($i = 0$)... thỏa mãn các điều kiện tương tự công trình thực tế

Trong nghiên cứu ở đây, sẽ phân tích đặc trưng hình học nước nhảy một chiều dọc theo lòng dẫn dựa trên các quá trình đơn giản hóa và xét đến các hệ số thực nghiệm để đặc trưng cho các tham số ảnh hưởng đến nước nhảy.

2.5.2 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

Áp dụng phương trình tích phân (2.18), các yếu tố ảnh hưởng chính được viết dưới dạng quan hệ hàm số:

$$f(y_r, y_1, Q, V_1, V_2, m, b, \alpha_{01}^*, \alpha_{02}^*, \rho, \mu, g, \Sigma\xi) = 0 \quad (2.38)$$

Trong phương trình (2.38) có quan hệ như sau:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \text{ hay } Q = A.V$$

Nên phương trình trên lược giản các yếu tố trùng hợp, còn lại:

$$f(y_r, y_1, V_1, b, \mu, \rho, m, g, \Sigma\xi) = 0 \quad (2.39)$$

Trong phương trình trên có số lượng biến đổi độc lập là 9, chọn 3 thứ nguyên cơ bản là M , L và T , khi đó một đại lượng sẽ được biểu diễn theo công thức số mũ

của các thứ nguyên cơ bản ($M^a.L^b.T^c$). Trong số các biến (V_1 , y_1 và ρ). Các giá trị trong hàm Pi được xác định lại từ (2.39) như sau:

$$f(y_r, b, \mu, m, g, \Sigma\xi) = 0 \quad (2.40)$$

$$\Pi_1 = V_1^{a_1} \cdot y_1^{b_1} \cdot \rho^{c_1} \cdot y_2$$

$$\Pi_1 = [LT^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [ML^{-3}]^c \cdot [L] = M^0 L^0 T^0$$

$$\Pi_1 = M^{c_1} \cdot L^{a_1+b_1-3c_1+1} \cdot T^{-a_1} = M^0 L^0 T^0$$

Đồng nhất thứ nguyên 2 về có:

$$\begin{cases} c_1 = 0 \\ a_1 + b_1 - 3c_1 + 1 = 0 \\ -a_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 = 0 \\ b_1 = -1 \\ c_1 = 0 \end{cases}$$

Ta có: $\Pi_1 = \frac{y_r}{y_1}$

$$\Pi_2 = V_1^{a_2} \cdot y_1^{b_2} \cdot \rho^{c_2} \cdot b \Rightarrow \Pi_2 = [LT^{-1}]^{a_2} \cdot [L]^{b_2} \cdot [ML^{-3}]^{c_2} \cdot [L] = M^0 L^0 T^0$$

Tương tự giải được:

$$\{a_2 = 0 \quad b_2 = -1 \quad c_2 = 0\}$$

Vậy: $\Pi_2 = \frac{b}{y_1}$

$$\Pi_3 = V_1^{a_3} \cdot y_1^{b_3} \cdot \rho^{c_3} \cdot \mu$$

$$\Pi_3 = [LT^{-1}]^{a_3} \cdot [L]^{b_3} \cdot [ML^{-3}]^{c_3} \cdot [ML^{-1}T^{-1}] = M^0 L^0 T^0$$

$$M^{c_3+1} L^{a_3+b_3-3c_3-1} T^{-a_3-1} = M^0 L^0 T^0$$

Đồng nhất thứ nguyên, giải ra được:

$$\{a_3 = -1 \quad b_3 = -1 \quad c_3 = -1\} \quad \text{Vậy: } \Pi_3 = \frac{\mu}{V_1 \cdot y_1 \cdot \rho}$$

$$\Pi_4 = m$$

$$\Pi_5 = V_1^{a_5} \cdot y_1^{b_5} \cdot \rho^{c_5} \cdot g$$

$$\Pi_5 = [LT^{-1}]^{a_5} \cdot [L]^{b_5} \cdot [ML^{-3}]^{c_5} \cdot [LT^{-2}] = M^0 L^0 T^0$$

$$\Pi_5 = M^{c_5} \cdot L^{a_5+b_5-3c_5+1} \cdot T^{-a_5-2} = M^0 L^0 T^0$$

$$\Rightarrow \{a_5 = -2 \quad b_2 = 1 \quad c_5 = 0\}$$

Vậy: $\Pi_5 = V_1^{-2} y_1 \cdot g = \frac{g \cdot y_1}{V_1^2}$

$$\Pi_6 = \sum \xi$$

Kết quả phân tích thứ nguyên theo hàm Π ở (2.40) có:

$$\varphi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) = 0$$

$$\varphi\left(\frac{y_r}{y_1}, \frac{b}{y_1}, \frac{\mu}{V_1 \cdot y_1 \cdot \rho}, m, \frac{g \cdot y_1}{V_1^2}, \sum \xi\right) = 0 \quad (2.41)$$

trong đó có: $\Pi_3 = \frac{\mu}{V_1 \cdot y_1 \cdot \rho} = \frac{1}{Re}$

Đây là giá trị nghịch đảo của số Reynolds, mô hình được thí nghiệm với dòng chảy ở khu vực bình phương sức cản thỏa mãn điều kiện $Re > Re_{gh}$ nên bỏ qua ảnh hưởng của Reynolds.

$$\Pi_5 = \frac{g \cdot y_1}{V_1^2} = \frac{1}{Fr_1^2}$$

Đây là giá trị nghịch đảo của số Froude trước nước nhảy.

Phương trình (2.41) trở thành

$$\beta\left(\frac{y_r}{y_1}, \frac{b}{y_1}, m, Fr_1, \sum \xi\right) = 0$$

Phương trình phân tích theo Lý thuyết Π của Buckingham được thể hiện:

$$\frac{y_r}{y_1} = \Psi\left(\frac{b}{y_1}, m, Fr_1, \sum \xi\right)$$

Trong phân tích cho thấy, giá trị độ sâu liên hiệp có liên quan với hệ số mở rộng mặt cắt và số Froude trước nước nhảy. Quan hệ tương quan thể hiện như sau:

$$\frac{y_r}{y_1} = \Psi\left(\frac{m y_1}{b}, Fr_1, \sum \xi\right) \quad (2.42)$$

Nếu $m = 0$, bỏ qua tổn thất thì quan hệ (2.42) còn lại là $\frac{y_r}{y_1} = \Psi(Fr_1)$ đúng với

công thức của Belanger (1882). Các nhà khoa học như Ratjanam (1968) đã mở rộng

công thức Belanger để nghiên cứu, đặc biệt các nghiên cứu với đáy có mố nhám thì phải xem xét cả hệ số tổn thất và đưa vào trong công thức tính độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy. Phương trình (2.42) thể hiện các động như phân tích tại mục 1.5.

2.5.3 Chiều dài khu xoáy của nước nhảy

Áp dụng phương trình xác định chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy (2.23), cho thấy giá trị chiều dài nước nhảy phụ thuộc vào các yếu tố cơ bản như sau:

$$f(L_r, y_1, y_r, V_1, V_2, m, \rho, \mu, g, b, e) \quad (2.43)$$

Do thỏa mãn các điều kiện của phương trình liên tục, nên các giá trị V_1, V_2 và $\bar{V}$ tương đương, chỉ cần sử dụng V_1 để tính toán, các giá trị diện tích, chu vi ướt ($A, \bar{P}$) được thay bằng trị số y_1, y_r . Giá trị e (độ nhám tuyệt đối) đặc trưng giá trị K_{tb} , vì $K_{tb} = f(R, n) = f(y_1, y_r, e)$.

Trong phương trình trên số đại lượng biến đổi độc lập chỉ còn lại 10. Dùng phương pháp Buckingham (Lý thuyết Π) với việc lựa chọn 3 đại lượng cơ bản là V_1 [LT^{-1}], ρ [ML^{-3}], y_1 [L], ta có phiên hàm mới với $10 - 3 = 7$ đại lượng không thứ nguyên.

$$f(L_r, y_r, m, b, \mu, g, e) = 0 \quad (2.44)$$

Theo lý thuyết Pi có:

$$\beta(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7) = 0 \quad (2.45)$$

Tính các giá Π_i như sau:

$$\Pi_1 = V_1^{m_1} \cdot y_1^{n_1} \cdot \rho^{q_1} \cdot L_j$$

$$\Pi_1 = [LT^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [ML^{-3}]^c \cdot [L] = M^0 L^0 T^0$$

$$\Pi_1 = M^{c_1} \cdot L^{a_1+b_1-3c_1+1} \cdot T^{-a_1} = M^0 L^0 T^0$$

Đồng nhất thứ nguyên 2 về có:

$$\begin{cases} q_1 = 0 \\ m_1 + n_1 - 3q_1 + 1 = 0 \\ -m_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_1 = 0 \\ n_1 = -1 \\ q_1 = 0 \end{cases}$$

Ta có: $\Pi_1 = \frac{L_r}{y_1}$

Tương tự các giá trị Π_i được tính như sau:

$$\begin{array}{lll} \Pi_2 = \frac{y_r}{y_1} & \Pi_3 = m & \Pi_6 = \frac{\mu}{V_1 \cdot y_1 \cdot \rho} = f(Re) \\ \Pi_4 = \frac{b}{y_1} & \Pi_5 = \frac{g \cdot y_1}{V_1^2} = \frac{1}{Fr_1^2} & \Pi_7 = \frac{e}{y_1} \end{array}$$

Do mô hình luôn thỏa mãn điều kiện $Re > Re_{gh}$, dòng chảy luôn ở trạng thái chảy rối thành hoàn toàn nhám trên cả mô hình thí nghiệm và công trình thực tế. Bên cạnh đó, tổn thất chủ yếu do đặc trưng khuếch tán rối trong khu xoáy và sự cắt dòng bề mặt bởi không khí [32], nên giá trị Π_6 , không ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy, trong nghiên cứu có thể bỏ qua việc phân tích các giá trị này.

Theo định lý Buckingham Π , phương trình (2.45) sẽ thành:

$$\begin{aligned} \beta \left(\frac{Lr}{y_1}, \frac{y_r}{y_1}, m, \frac{b}{y_1}, Fr_1, \frac{e}{y_1} \right) &= 0 \\ \Rightarrow \frac{Lr}{y_1} &= \Phi \left(\frac{y_r}{y_1}, \frac{m y_1}{b}, Fr_1, \frac{e}{y_1} \right) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Phương trình (2.46) tương tự với các nghiên cứu của Rouse và cộng sự. (1959), Sarma và Newnham (1973), Hager W. và cộng sự (1990) [31][30]...

Đối với kênh chữ nhật và thành nhẵn (bỏ qua e)[79], thì $m = 0$, thì quan hệ (2.46) còn lại:

$$\frac{Lr}{y_1} = \Psi(y_r/y_1, Fr_1) \quad (2.47)$$

Đối với kênh hình thang cân, thì có quan hệ:

$$Fr_{D1} = \sqrt{\frac{2M_1 + 1}{M_1 + 1}} \cdot Fr_1 \quad \text{với } M = \frac{m \cdot y_1}{b}$$

Như vậy quan hệ (2.46) có thể viết thành:

$$\frac{Lr}{y_1} = \Phi \left(\frac{y_r}{y_1}, Fr_{D1}, \frac{e}{y_1} \right) \quad (2.48)$$

Phương trình (2.48) phù hợp với một số công thức thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy đã có. Phương trình (2.48) tương tự như nghiên cứu của Hamed Azimi và cộng sự (2018)[35], phương trình đã thể hiện đầy đủ các yếu tố tác động đến chiều dài nước nhảy (như phân tích tại mục 1.5).

2.5.4 Cấu tạo mô hình thí nghiệm

Căn cứ trên cơ sở lý thuyết xây dựng mô hình vật lý, mô hình thí nghiệm công trình nước nhảy sau đập tràn được bố trí tại Trung tâm Nghiên cứu Thủy lực thuộc Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

2.5.4.1 Mục đích thí nghiệm

- + Nghiên cứu hiện tượng nước nhảy sau đập tràn trong lòng dẫn lắng trụ có mặt cắt ngang hình thang.
- + Đo đạc các thông số của nước nhảy trên các mô hình.
- + So sánh kết quả đo đạc với kết quả tính toán bằng các công thức lý thuyết đã xây dựng ở Chương 2.
- + Sử dụng các phần mềm thống kê (như IBM SPSS 26, MS Excel 2019) để mô phỏng lại biến đổi của công thức lý thuyết tương ứng với các giá trị thực đo, từ đó đề xuất các công thức bán thực nghiệm, thực nghiệm ứng dụng cho tính toán thủy lực công trình.

2.5.4.2 Các phép đo đạc được thực hiện

Đo lưu lượng: Để xác định lưu lượng cấp vào mô hình, dùng máng lường chữ nhật, với ngưỡng là đập tràn thành mỏng (Hình 2.10). Lưu lượng được xác định theo công thức Rehbock.



Hình 2.9 Máy thủy bình, mia đo độ sâu
dòng chảy



Hình 2.10 Máng lường và kim đo để
xác định lưu lượng

Mở van để dẫn nước vào máng lường (Hình 2.10), sử dụng kim đo mực nước trong bình để xác định độ cao mực nước trên đập tràn thành mỏng trong máng lường.

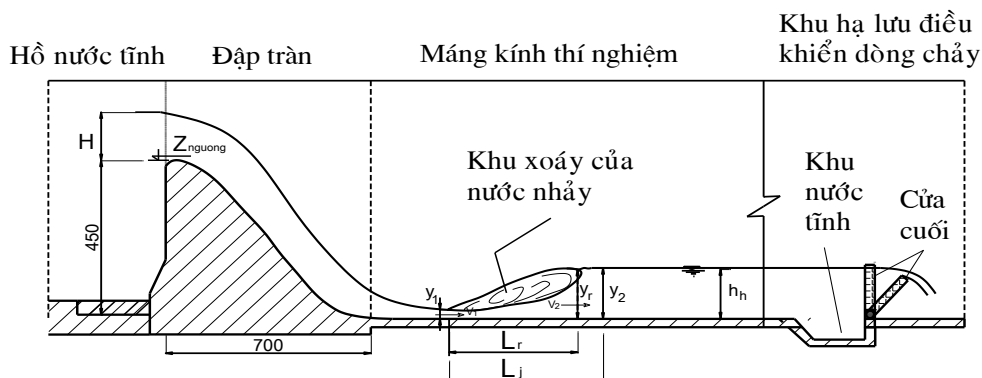
Từ đó sử dụng công thức Rehbock để xác định lưu lượng dòng chảy đi vào mô hình thí nghiệm (thể hiện giá trị đo trên phụ lục 5.1).

Đo cao độ mặt nước: Sử dụng kim đo mực nước cố định, máy thủy chuẩn Ni04 và MIA để đo cao độ mặt nước (Hình 2.9), kết hợp kiểm tra bằng thước thép.

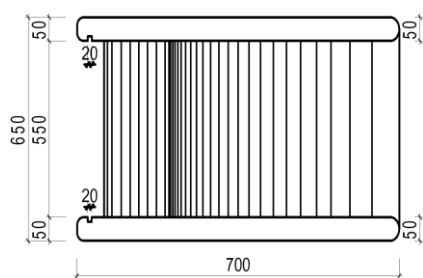
Đo chiều dài khu xoáy cuộn của nước nhảy: Chiều dài khu xoáy của nước nhảy là phép đo khó khăn nhất vì nó thường biến động, nên được chú ý đặc biệt. Chiều dài khu xoáy của nước nhảy tính từ điểm trên kênh có độ sâu ở điểm trước khu xoáy đến điểm kết thúc khu xoáy quan sát được ở thành kênh và kết hợp với dữ liệu đo đường mặt nước. Vị trí khi dòng chảy quán lại cuối cùng là điểm kết thúc của khu xoáy, có thể quan sát thông qua bọt khí chuyển động dạng vòng cung từ đáy kênh nổi lên mặt nước và hướng dòng chảy ngược. Trong phép đo này, vị trí kết thúc xoáy cuộn là vị trí tính theo phương pháp trung bình thời gian.

2.5.4.3 Cấu tạo thí nghiệm

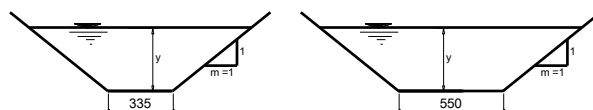
- + Một đập tràn mặt cắt thực dụng được thiết kế bằng thủy tinh hữu cơ.
- + Kênh thủy tinh có mặt cắt ngang hình thang với hệ số mái dốc $m = 1$, chiều rộng đáy kênh được lựa chọn là $b = 0,55\text{m}$ và $b = 0,335\text{cm}$ (đảm bảo kích thước mô hình tương đương, phù hợp với các nghiên cứu và công trình thực tế), chiều dài kênh thủy tinh $L = 4\text{m}$.
- + Khu vực lòng dẫn hạ thấp tạo ổn định mực nước tĩnh cuối mô hình và đặt trước cửa cuối, cửa cuối sử dụng điều khiển nâng hạ mực nước ở hạ lưu và thay đổi phù hợp cho các trường hợp thí nghiệm khác nhau.
- + Các thiết bị đo mực nước và khống chế mực nước hạ lưu khi thí nghiệm.



Hình 2.11 Sơ đồ mặt cắt dọc mô hình thí nghiệm



Hình 2.12 Mặt bằng thiết kế đầu mối tràn có cửa



Hình 2.13 Các mặt cắt ngang lòng dẫn có hệ số mái dốc $m = 1$



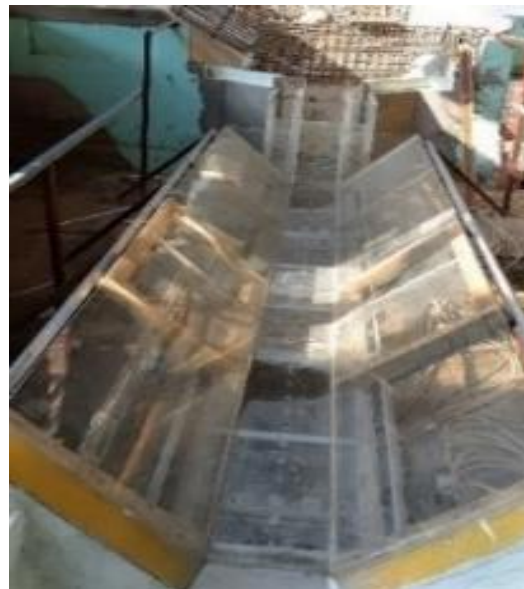
Hình 2.14 Lắp đặt, cân chỉnh đáy kênh dẫn đảm bảo đáy phẳng



Hình 2.15 Lắp đặt đập đầu mối và hoàn thiện trên mô hình với $b = 55\text{cm}$



Hình 2.16 Hệ thống van điều khiển thay đổi mực nước hạ lưu đập



Hình 2.17 Đập đầu mối và kênh hình thang có $b = 33,5\text{cm}$

2.5.4.4 Đánh giá sai số mô hình

Sai số thực nghiệm mô hình vật lý bao gồm sai số trong chế tạo, xây dựng và đo đạc số liệu. Đặc biệt sai số trong quá trình đo đạc dữ liệu, do quá trình rối mạnh của nước nhảy. Các sai số được phân tích và đánh giá như sau:

+ Sai số do chế tạo:

- Sai số tại máng lường: Sai số kích thước máng lường $\pm 1\text{mm}$ và độ rộng thực tế của máng lường là 800mm .

Sai số tại máng lường xác định: $1/800 \approx 0,1\%$

- Sai số máng kính: Kênh dẫn kính có độ rộng đáy là $0,55\text{cm}$ và $33,5\text{cm}$. Quá trình gia công kênh kính theo đúng tiêu chuẩn thí nghiệm với sai số $\pm 2\text{mm}$.

Sai số tương đối lớn nhất được xác định: $2/335 \approx 0,6\%$

- Sai số đập đầu mối: Đập đầu mối chế tạo bằng kính hữu cơ, có sai số $\pm 0,2\text{mm}$, kích thước bề rộng đập nhỏ nhất $33,5\text{cm}$, tương ứng với sai số lớn nhất $0,12\%$. Độ sâu dòng chảy nhỏ nhất 3cm tương ứng sai số $0,6\%$.

- Sai số lớn nhất đập đầu mối mắc phải bao gồm chế tạo, xây dựng và lắp đặt theo chiều ngang và đứng là:
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = 0,6 + 0,12 = 0,72(\%)$$

+ Sai số do thiết bị

- Sai số đo mực nước bằng kim đo là $0,1\text{mm}$;

- Sai số đo mực nước bằng mia và máy Ni04 là $0,1\text{mm}$;

- Sai số đo chiều dài bằng thước thép là $0,5\text{mm}$ ($1/2$ khoảng chia);

+ Sai số trong quá trình thu thập dữ liệu thực nghiệm

- Sai số tính lưu lượng bằng công thức Rehbock qua máng lường là 1% ;

- Cao trình mực nước nhỏ nhất 30cm , sai số khoảng $0,33\%$.

Kết luận: Các sai số của mô hình giới hạn trong phạm vi các giá trị cho phép theo TCVN8214:2009. Mô hình đủ điều kiện để nghiên cứu thí nghiệm.

2.5.4.5 Điều kiện áp dụng mô hình

Nghiên cứu cho dòng chảy hở, yếu tố trọng lực đóng vai trò chủ yếu, điều này thể hiện qua số Froude, hay có thể nói số Froude của mô hình và nguyên hình tương tự nhau. Các bộ dữ liệu nghiên cứu đều đảm bảo số $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.

Bên cạnh đó, về chế độ dòng chảy giữa mô hình và nguyên hình tương tự, thể hiện qua trạng thái chảy, điều này được đảm bảo thông qua số Reynolds. Giữ mô hình và nguyên hình đảm bảo trạng thái chảy rối thành hoàn toàn nhám (chảy rối ở khu vực cản bình phương). Số Reynolds nghiên cứu có giới hạn từ 87.000 đến 280.000 (Phụ lục 5.2), lớn hơn $Re_{gh} = 5.000 \div 10.000$ (Hoàng Văn Quý, 1979).

Độ nhám của mô hình và nguyên hình đảm tính tương tự, điều này thể hiện qua các nghiên cứu về đặc trưng hình học có ảnh hưởng bởi yếu tố độ nhám lòng dẫn (Chương 2, Chương 3), mô hình sử dụng kính hữu cơ tương đương khi phân tích cho nguyên hình bằng bê tông với tỷ lệ mô hình từ $\lambda = 20 \div 120$.

Về ảnh hưởng độ nhớt, đặc tính chất lỏng và sức căng mặt ngoài, các thí nghiệm đảm bảo độ sâu dòng chảy $y \geq 3\text{cm}$ và chiều rộng đáy lòng dẫn $b \geq 20\text{cm}$.

2.6 Phương pháp thí nghiệm và xử lý số liệu

2.6.1 Các trường hợp nghiên cứu thí nghiệm mô hình

Từ phân tích mối quan giữa các đặc trưng thủy động của nước nhảy bằng lý thuyết hàm Pi, cho thấy các đại lượng cần thu thập ở mỗi cấp thí nghiệm như sau:

Bảng 2.4 Các thông số đo đạc trên mô hình thí nghiệm vật lý

TT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Ghi chú
1	Lưu lượng dòng chảy	Q	m ³ /s	Đo trên máng lường
2	Độ sâu trước nước nhảy	y ₁	m	Đo trên mô hình
3	Độ sâu sau khu xoáy	y _r	m	Đo trên mô hình
4	Chiều dài khu xoáy	L _r	m	Đo trên mô hình

Xét thực nghiệm yếu tố toàn phần 2 mức m yếu tố ảnh hưởng thì số thí nghiệm tối thiểu phải thực hiện là 2^m [3]. Trong nghiên cứu ở đây, các chuỗi thí nghiệm được lập là tổ hợp của các thông số: Q, y₁, y₂ và L_r.

Như vậy số thí nghiệm tối thiểu cần thực hiện là: $N = 2^4 = 16$ thí nghiệm. Xây dựng kịch bản với thông số đầu vào thí nghiệm với 14 cấp lưu lượng từ 201 m³/s đến 0,04 m³/s. Mỗi cấp lưu lượng không chế độ sâu dòng chảy y₂ thay đổi tương đương 2 hoặc 4 lần. Tổng cộng có 45 trường hợp thí nghiệm khi tổ hợp với mực nước hạ lưu (đảm bảo điều kiện dữ liệu thí nghiệm sử dụng trong nghiên cứu thực nghiệm).

2.6.2 Phương pháp thí nghiệm và thu thập dữ liệu thí nghiệm

2.6.2.1 Phương pháp thí nghiệm

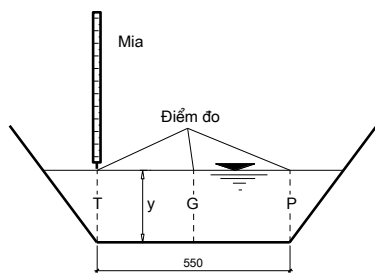
+ Phương pháp thực hiện được tiến hành với dải lưu lượng từ lớn nhất ($Q = 201 \text{ l/s}$) đến nhỏ nhất ($Q = 40 \text{ l/s}$) chảy qua đập tràn và phân chia 14 cấp lưu lượng (cấp lưu lượng phân chia dựa trên lưu lượng lớn nhất và nhỏ nhất của dòng chảy qua đập tràn, phân chia các trường hợp đo để đảm bảo cho số Froude trước nhảy đại diện cho các trường hợp nước nhảy ổn định).

+ Mỗi trường hợp thí nghiệm được tiến hành theo các bước: Cho nước chảy qua đập tràn, điều chỉnh mực nước hạ lưu để tạo nước nhảy ở lòng dẫn trên kênh mặt cắt ngang hình thang. Như vậy, mỗi cấp lưu lượng sẽ tạo được một trường hợp nước nhảy ở chân công trình, đồng thời thay đổi mực nước hạ lưu tạo ra 2 đến 3 trường hợp nước nhảy trong lòng kênh dẫn (phương pháp thực hiện là nâng cao đỉnh đập tràn bằng phai chắn hoặc tạo nước nhảy tự do trên lòng dẫn khi hạ thấp mức nước hạ lưu).

+ Đặt máy thủy chuẩn, cân bằng và xác định mốc đo đặc tại vị trí đặt máy thủy chuẩn (hình 2.21), mốc đo tại đáy kênh dẫn hình thang, đo thêm mốc trên thành đập tràn (kiểm tra mực nước trên đỉnh đập tràn đầu mối).

+ Một người cầm MIA đứng trên cầu đo, đặt đầu MIA (đỉnh nhọn mũi thép) vào vị trí cần đo (hình 2.20 và 2.21), khi đó người sử dụng máy thủy bình sẽ đọc dữ liệu. Kết hợp dữ liệu mốc tại vị trí máy đo, mốc đáy kênh và cao độ điểm đo để xác định độ sâu mực nước tại vị trí đo. Mỗi mặt cắt đo sẽ đo tại 3 điểm (như hình 2.18), và lấy giá trị trung bình để xác định độ sâu dòng chảy (Kết quả đo chi tiết một số trường hợp được thể hiện tại Phụ lục 5.1).

+ Xác định chiều dài khu xoáy bằng thước thép, đây là bước khi khăn khi thực nghiệm. Đầu tiên xác định vị trí bắt đầu nước nhảy (Hình 2.24), vị trí này xác định thuận lợi do vị trí bắt đầu khu xoáy dễ xác định, sau đó định vị vị trí đầu khu xoáy trên thành bể. Tiếp theo, quan sát đặc trưng khu xoáy ở thành bể, đặc điểm bề mặt khu xoáy để xác định vị trí kết thúc khu xoáy, đánh dấu trên thành bể (Hình 2.23). Dùng thước thép để đo chiều dài khu xoáy (Hình 2.24).



Hình 2.18 Các vị trí đo cao độ mặt nước



Hình 2.19 Kim đo mực nước thượng lưu lòng hồ



Hình 2.20 Đo mực nước bằng MIA với kênh có $b = 55\text{cm}$



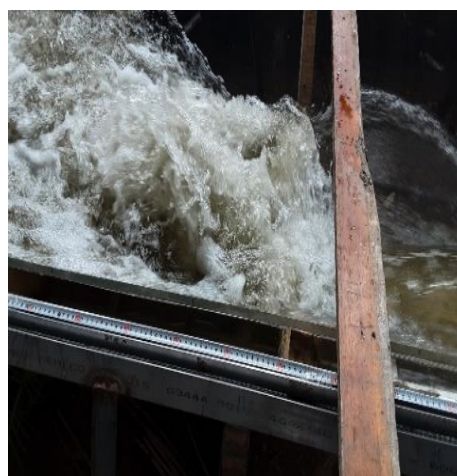
Hình 2.21 Đo số liệu mực nước từ MIA trên mô hình có $b = 33,5\text{cm}$



Hình 2.22 Hệ thống điều khiển mực nước và kim đo mực nước hạ lưu



Hình 2.23 Xác định vị trí cuối khu xoáy trên mô hình



Hình 2.24 Đo chiều dài khu xoáy của nước nhảy

2.6.2.2 Dữ liệu thí nghiệm mô hình

Tổng hợp các kết quả đo đặc nước nhảy trên mô hình vật lý sau khi thí nghiệm, với mỗi cấp lưu lượng, đã thực hiện đo 1 lần chi tiết đường mặt nước, sau đó 2 đến 3 lần tiếp theo điều chỉnh thay đổi mực nước hạ lưu để đo các đặc trưng hình học nước nhảy trên kênh dẫn. Số liệu thực nghiệm như Bảng 2.5:

Bảng 2.5 Tổng hợp số liệu đo đặc đặc trưng nước nhảy theo các cấp lưu lượng

Giá trị	Kim đo máng lượng (cm)	Lưu lượng (m ³ /s)	b (m)	Đặc trưng hình học nước nhảy		
				y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)
Max	47.55	0.201	0.55	0.092	0.488	2.1
Min	30.2	0.04	0.335	0.04	0.182	0.8

(Chi tiết tại Phụ lục 5.1)

Nhận xét: Với dữ liệu nghiên cứu thực nghiệm mô hình vật lý tại Bảng 2.5 cho thấy, lưu lượng dòng chảy nghiên cứu trải dài từ $Q = 40$ l/s đến 201 l/s, giá trị chiều dài khu xoáy lượn nằm trong phạm vi kênh nghiên cứu (kênh dài $L = 4$ m). Số liệu phân tích 45 trường hợp, loại bỏ các trường hợp có $Fr_{D1} < 4,0$ (không phù hợp với phạm vi nghiên cứu), còn lại 34 trường hợp có số $Fr_{D1} = 4,0 \div 8,4$ (Bảng 2.6).

Như vậy, dữ liệu đã đáp ứng để phân tích về biến đổi các đặc trưng hình học của nước nhảy ổn định trong kênh hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

2.7 Mối quan hệ thực nghiệm giữa các đặc trưng thủy động trong nước nhảy

2.7.1 Cơ sở dữ liệu phân tích đặc trưng hình học nước nhảy

Từ dữ liệu Bảng 2.5, phân tích các thông số ảnh hưởng đến nước nhảy dưới dạng không thứ nguyên, từ đó thu được bảng cơ sở dữ liệu như sau:

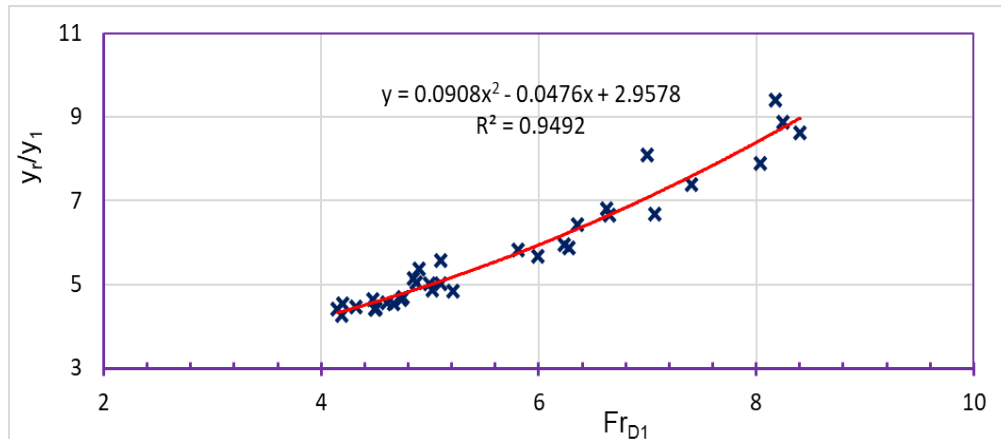
Bảng 2.6 Các thông số về đặc trưng hình học của nước nhảy

Giá trị	Fr_1	Fr_{D1}	M_1	$\frac{L_r}{y_1}$	$\frac{L_r}{y_r}$	$\frac{y_r}{y_1}$	Re_1	$\Delta E/y_1$
Max	7.978	8.402	0.275	39.583	5.000	9.396	280127	24.087
Min	3.936	4.149	0.073	17.742	3.916	4.258	87273	4.130

(chi tiết dữ liệu trình bày Phụ lục 5.2)

2.7.2 Ảnh hưởng số Froude đến độ sâu dòng chảy sau khu xoáy

Số Froude trước nước nhảy có ảnh hưởng lớn đến độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, điều này thể hiện rõ trong công thức tính toán nước nhảy cho lòng dẫn lăng trụ (mặt cắt chữ nhật và hình thang) và trong phân tích lý thuyết Pi của Buckingham đối với nước nhảy trên kênh lăng trụ hình thang cân



Hình 2.25 Quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy với số Froude trước nước nhảy

Khi phân tích quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy với số Froude, cho thấy mối quan hệ tương quan cao ($R^2 = 0,95$), điều này cho thấy sự phụ thuộc chặt chẽ của độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy vào số Froude trước nước nhảy.

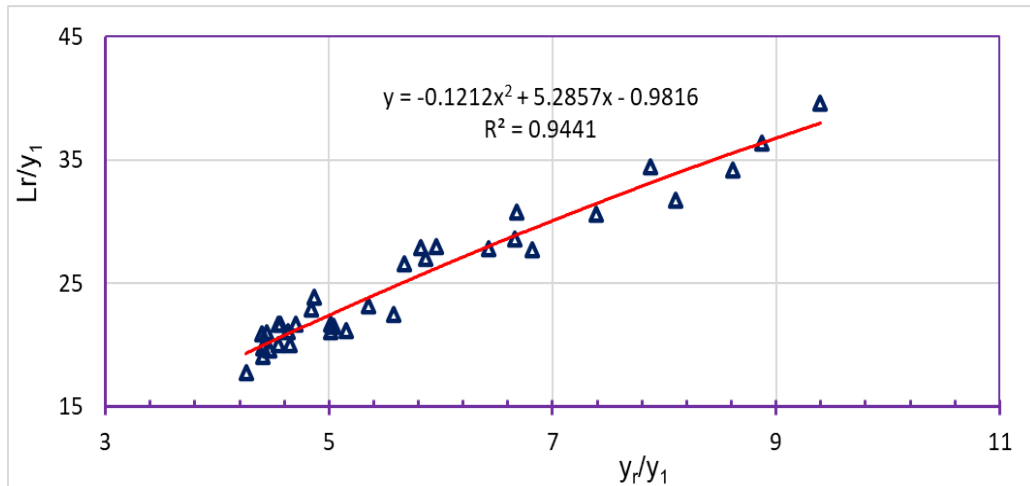
Tương tự như các nghiên khác, cho thấy số Fr_{D1} là yếu tố ảnh hưởng chính đến độ sâu dòng chảy sau khu xoáy.

2.7.3 Các đặc trưng ảnh hưởng đến chiều dài khu xoáy

2.7.3.1 Ảnh hưởng tỷ lệ độ sâu trước và sau khu xoáy đến chiều dài nước nhảy

Độ sâu dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và chiều dài khu xoáy của nước nhảy thể mối quan hệ khá sâu sắc, điều này thể hiện trong các công thức thực nghiệm về chiều dài nước nhảy trên kênh chữ nhật và kênh hình thang.

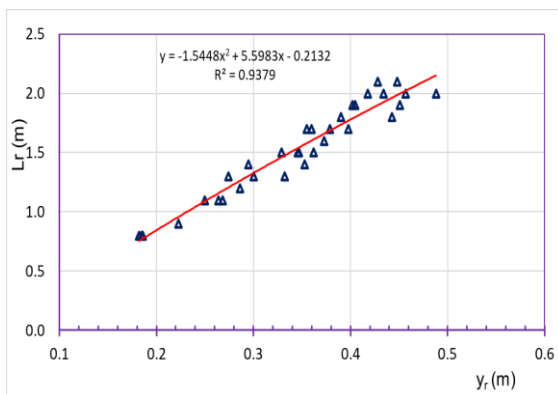
Xem xét phân tích các công thức tính chiều dài nước nhảy thực nghiệm và công thức phân tích theo lý thuyết cân bằng năng lượng trên kênh lăng trụ (kênh có mặt cắt ngang hình chữ nhật và hình thang cân), thì tỷ lệ độ sâu trước và sau khu xoáy của nước nhảy có mối quan hệ chặt chẽ với chiều dài khu xoáy của nước nhảy (Mục 1.5). Mối quan hệ này được thể hiện như sau:



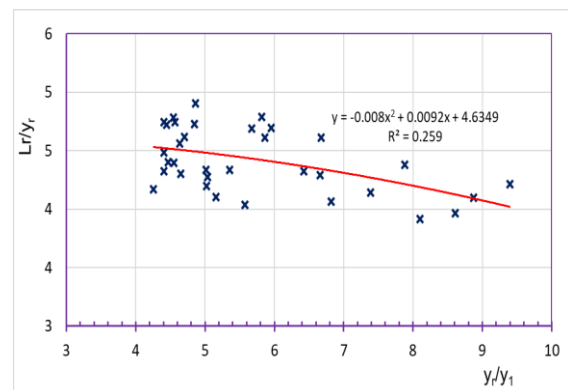
Hình 2.26 Mối quan hệ giữa L_r/y_1 với tỷ số y_r/y_1

Từ biểu đồ phân tích (Hình 2.26) nhận thấy quan hệ giữa các giá trị chiều dài với tỷ số độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy rất chặt chẽ ($R^2 = 0,94$), điều này cũng được hiện rõ trong các công thức tính về chiều dài của nước nhảy trên kênh lăng trụ. Khi xây dựng công thức tính chiều dài trong nước nhảy, tỷ lệ độ sâu dòng chảy của nước nhảy cũng là một thông số cần thiết và quan trọng.

Xem xét mối quan hệ giữa L_r và y_r , cho thấy đây là quan hệ chặt chẽ ($R^2 = 0,93$), tuy nhiên khi số Froude tăng, quan hệ này bị phân tán do đặc trưng các quá trình dòng xoáy trong kênh hình thang, mối quan hệ giữa L_r và y_r phù hợp với rất nhiều công thức thực nghiệm về xác định chiều dài nước nhảy trong kênh chữ nhật. Nhưng nếu xem xét tỷ lệ (L_r/y_r) với các đặc trưng hình học khác sẽ cho thấy quan hệ phân tán (Hình 2.28), quan hệ này không phù hợp với nghiên cứu về xác định chiều dài khu xoáy ở đây.



Hình 2.27 Quan hệ (L_r) với (y_r)



Hình 2.28 Quan hệ L_r/y_r với tỷ lệ độ sâu sau khu xoáy (y_r/y_1)

Như vậy, quan hệ giữa chiều dài dòng chảy (L_r/y_1) và tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy (y_r/y_1) là hàm phi tuyến và được thể hiện rõ trong các nghiên cứu về công thức xác định chiều dài của nước nhảy.

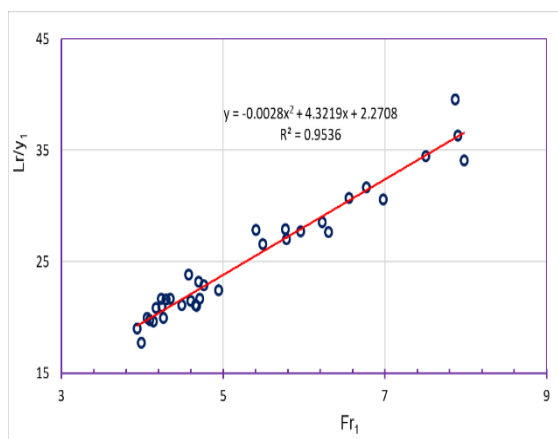
2.7.3.2 Quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và số Froude

Số Froude là một thông số đặc trưng cho lực quán tính và trọng lực, số Froude được dùng để đánh giá, phân loại nước nhảy [13][16][82], phân tích lý thuyết cân bằng tổn thất năng lượng (công thức (2.23)) và các nghiên cứu khác cho thấy mối quan hệ giữa số Froude và chiều dài nước nhảy.

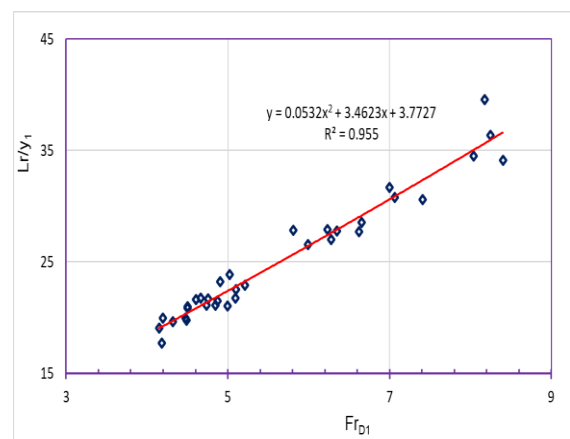
Xem xét đầy đủ yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy bao gồm độ sâu liên hiệp nước nhảy (y_1, y_r), độ sâu dòng chảy phân giới (y_c), hệ số mái dốc kênh (m), hệ số mở rộng mặt cắt (M_1) và đặc biệt là số Froude trước nước nhảy.

Trường phái nghiên cứu xây dựng công thức tính chiều dài nước nhảy có chứa giá trị Froude trước nước nhảy là khá phổ biến, số Froude xuất hiện trong rất nhiều các công thức tính chiều dài nước nhảy trên kênh lắng trụ (như Tréctôn-xôp, Picalôp, O.M.Aivadian, Wu, Ivanchenko, Chertoussov, Silvester, Hager, Rajaratnam and Subramanya...), quan hệ giữa chiều dài nước nhảy và số Froude trước nước nhảy cũng là quan hệ phi tuyến. Trong công thức bán thực nghiệm, quan hệ giữa L_r và Fr_D là hàm bậc 2.

Từ các số liệu nghiên cứu thực nghiệm mô hình vật lý (Bảng 2.6), ta có mối quan hệ như Hình 2.29 và Hình 2.30:



Hình 2.29 Biểu đồ quan hệ giữa L_r/y_1 với Fr_1



Hình 2.30 Biểu đồ quan hệ giữa L_r/y_1 với Fr_{D1}

Quan hệ giữa (Lr/y_1) với số Fr_1 và Fr_{D1} theo biểu đồ Hình 2.29 và Hình 2.30 được phân tích trên phần mềm MS Excel có hệ số quan hệ tương quan với nhau rất cao ($R^2 = 0,95$). Quan hệ giữa chiều dài nước nhảy với số Froude có xu hướng hội tụ, điều này khá phù hợp với một số công thức tính chiều dài nước nhảy trên kênh lắng trụ và số Froude ảnh hưởng rất lớn đến trị số chiều dài nước nhảy. Quan hệ này có xu hướng tương tự như các nghiên cứu trong kênh chữ nhật và kênh hình thang, như nghiên cứu Samir Kateb (2014) [70], Siad Rafik (2018) [71]...

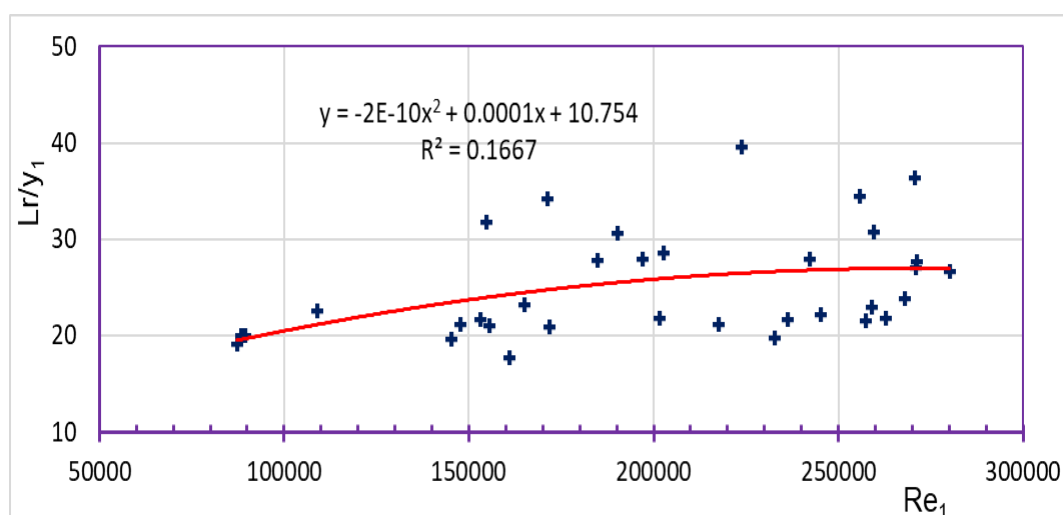
Trong thực tế không nên dùng quan hệ độc lập này để tính độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy, vì tuy có hệ số tương quan rất cao, nhưng các giá trị tính toán lại có biên độ phân bố khá rộng, nên nếu sử dụng công thức tương quan này sẽ cho sai số tính toán khá lớn. Mà khi xây dựng công thức thực nghiệm còn cần kết hợp với các yếu tố ảnh hưởng khác để giảm thiểu sai số do công thức thực nghiệm gây ra.

2.7.3.3 Quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và số Reynolds

Số Reynolds là một thông số quan trọng trong nghiên cứu dòng chảy, số Reynolds đặc trưng cho lực quán tính và lực nhớt.

Số Reynolds nghiên cứu ở đây được tính thông qua bán kính thủy lực (R) của mặt cắt trước nước nhảy, điều kiện nước ở 20 độ C.

Số Reynolds cũng là thông số đặc trưng cho trạng thái dòng chảy. Mối quan hệ này được thể hiện như Hình 2.31:



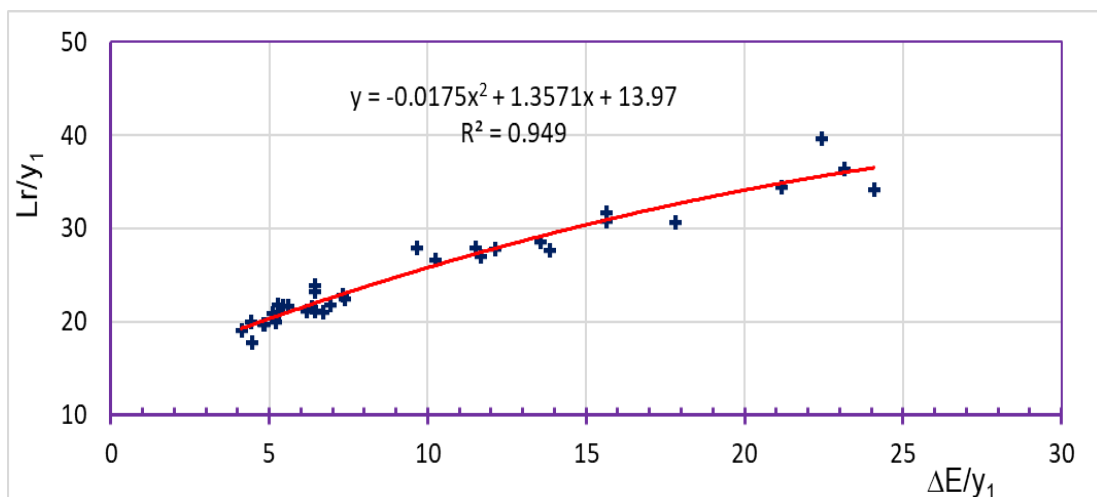
Hình 2.31 Quan hệ giữa Lr/y_1 với số Reynolds (Re_1) trước nước nhảy

Nhìn trên Biểu đồ quan hệ (Hình 2.31) cho thấy quan hệ giữa chiều dài nước nhảy và số Reynolds khá phân tán.

Do vậy, thiết lập quan hệ giữa chiều dài nước nhảy và số Reynolds không có nhiều ý nghĩa và rất khó xác lập ảnh hưởng của số Reynolds tới chiều dài nước nhảy, điều này phù hợp với hầu hết các công thức bán thực nghiệm và thực nghiệm đã có.

2.7.3.4 *Mối quan hệ giữa chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy với năng lượng dòng chảy*

Chiều dài dòng chảy khu xoáy và năng lượng dòng chảy của nước nhảy có mối quan hệ khăng khít, điều này thể hiện rõ qua công thức phân tích theo lý thuyết cân bằng năng lượng, trong các công thức thực nghiệm về chiều dài nước nhảy trên kênh lắng trụ các tác giả cũng đã sử dụng yếu tố năng lượng dòng chảy để xác định công thức thực nghiệm.



Hình 2.32 *Mối quan hệ giữa chiều dài nước nhảy với tiêu năng dòng chảy*

Từ quan hệ giữa chiều dài nước nhảy với năng lượng dòng chảy theo biểu đồ Hình 2.32. Cho thấy chiều dài nước nhảy có quan hệ chặt chẽ với năng lượng dòng chảy, hệ số phù hợp của mô hình R^2 rất cao ($R^2 > 0,9$). Nên khi phân tích công thức của chiều dài nước nhảy thông qua phương trình cân bằng năng lượng (2.23) là hoàn toàn phù hợp và có cơ sở khoa học rõ ràng.

Như vậy: Khi phân tích xác định công thức chiều dài nước nhảy (L_r) bán thực nghiệm theo độ sâu trước nước nhảy (y_1) là phù hợp và đảm bảo tính tương quan chặt chẽ giữa chiều dài nước nhảy với các yếu tố ảnh hưởng khác.

2.8 Kết luận Chương II

Các nội dung cơ bản của Chương 2 được thể hiện như sau:

① Tích phương trình vi phân cơ bản Navier-Stokes và xác định được phương trình cơ bản (2.18) xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy . Phân tích phương trình cơ bản (2.23) về mối quan hệ giữa chiều dài dòng chảy trong nước nhảy với các yếu tố ảnh hưởng, từ đó làm cơ sở xây dựng công thức xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy.

② Trên cơ sở lý thuyết tương tự, lý thuyết thứ nguyên và mô hình, đã thiết lập được các quan hệ giữa các đặc trưng hình học của nước nhảy với các yếu tố ảnh hưởng, từ đó xác định đầy đủ các thông số cần đo đạc trên mô hình vật lý.

③ Phân tích đầy đủ các đặc trưng và sự phù hợp của công nghệ Học Máy ứng dụng trong nghiên cứu nước nhảy, phân tích đầy đủ cấu trúc và thuật toán của mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên”.

④ Xác định được các chỉ tiêu đánh giá, phân tích kiểm nghiệm kết quả tính toán bằng các công cụ thống kê phù hợp.

⑤ Bố trí và thực nghiệm trên mô hình vật lý, từ đó xác định được cơ sở dữ liệu phục vụ cho nghiên cứu đặc trưng hình học của nước nhảy (Bảng 2.5).

⑥ Phân tích được mối quan hệ thực nghiệm giữa các yếu tố thủy động với các đặc trưng hình học của nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang hình thang cân. Kết hợp với phân tích tại mục 1.5, sẽ đảm bảo cơ sở cho các nghiên cứu xây dựng các công thức bán thực nghiệm và thực nghiệm về đặc trưng hình học của nước nhảy.

CHƯƠNG III – XÂY DỰNG CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG HÌNH HỌC CỦA NƯỚC NHẢY TRONG KÊNH LĂNG TRỤ MẶT CẮT NGANG HÌNH THANG

3.1 Xây dựng công thức xác định độ sâu phân giới

3.1.1 Xây dựng công thức xác định độ sâu phân giới

Độ sâu phân giới của kênh hình thang đã được nghiên cứu với các thuật toán biến đổi phức tạp khác nhau, như phương pháp Newton-raphson, phương pháp dây cung hoặc giải dựa trên biến đổi phương trình hình học, ANN... Trong nghiên cứu này, đã phân tích lý thuyết, xây dựng phương trình toán học và áp dụng chuỗi dữ liệu thực để phân xây dựng công thức xác định độ sâu phân giới của kênh hình thang cân.

Công thức tổng quát về độ sâu phân giới [27][82]:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} \quad (3.1)$$

Biến đổi về dạng:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c} = \frac{(b + m y_c)^3 y_c^3}{b + 2m y_c} \quad (3.2)$$

$$\text{trong đó:} \quad A_c = (b + m y_c) y_c \quad T_c = b + 2m y_c$$

Để giải tìm nghiệm tổng quát của phương trình (3.2) là tương đối phức tạp, vì đây là phương trình bậc 6, không có cách giải tổng quát.

$$\text{Đặt:} \quad M_c = \frac{m y_c}{b} \quad \Rightarrow \quad m y_c = b M_c$$

Thay vào (3.2), rút ra được:

$$\frac{\alpha Q^2}{g b^2} = \frac{(1 + M_c)^3}{1 + 2M_c} y_c^3 \quad (3.3)$$

Theo (3.3) có:

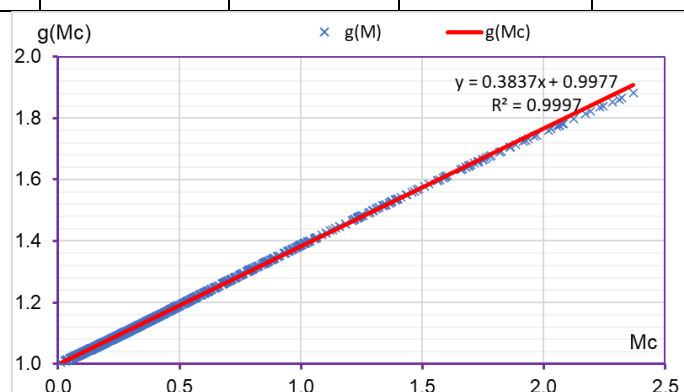
$$y_{cCN}^3 = \frac{(1 + M_c)^3}{1 + 2M_c} y_c^3 \quad \Rightarrow \quad \frac{y_{cCN}}{y_c} = \frac{1 + M_c}{\sqrt[3]{1 + 2M_c}} \quad (3.4)$$

$$\text{Đặt hàm số:} \quad g(M_c) = \frac{1 + M_c}{\sqrt[3]{1 + 2M_c}} \quad (3.5)$$

Khảo sát với chuỗi dữ liệu với 1000 số liệu được thể hiện trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1 Khoảng biến đổi của các thông số khảo sát đánh giá

STT	Thông số	Đơn vị	Nhỏ nhất	Lớn nhất
1	Q	m ³ /s	1	120
2	b	m	1	10
3	m	-	0.5	2
4	y _c	m	0.14	3.9
5	M _c	-	0.1	2.5



Hình 3.1 Quan hệ giữa M_c và $g(M_c)$ theo dữ liệu nghiên cứu

Từ biểu đồ tương quan Hình 3.1 ta thiết lập được phương trình như sau:

$$g(M_c) \approx \frac{5}{13} \cdot M_c + 1 \quad (3.6)$$

Từ (3.4) và (3.6), biến đổi về phương trình bậc 2 như sau:

$$\frac{5m}{13b} \cdot y_c^2 + y_c - y_{cCN} = 0 \quad (3.7)$$

Phương trình (3.7) là phương trình bậc 2 theo ẩn y_c , với kênh chữ nhật ($m = 0$) thì từ (3.7) có độ sâu phân giới y_c của kênh hình thang trở thành độ sâu phân giới của kênh chữ nhật ($y_c = y_{cCN}$), khi $m \neq 0$ giải (3.7) ta được:

$$y_c = \frac{13b}{10m} \left(\sqrt{1 + \frac{20m}{13b} \cdot y_{cCN}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

trong đó: y_{cCN} tính theo công thức (1.7)

Khi phân tích mối quan hệ tương quan giữa đại lượng về y_c , y_{cCN} và các hệ số theo giá trị m , đã xác định được công thức kinh nghiệm về độ sâu phân giới:

$$y_c = \frac{b}{(0,004m^2 + 0,0128m + 1) \frac{b}{y_{cCN}} - 0,037m^2 + 0,32} \quad (3.9)$$

Công thức (3.8), (3.9) được dùng để tính độ sâu phân giới của kênh hình thang cân, công thức này có thể tính toán cho cả kênh chữ nhật và kênh hình thang cân.

3.1.2 Đánh giá về công thức xác định độ sâu phân giới

Bảng 3.2 Tính toán độ sâu phân giới của kênh hình thang theo công thức (3.8)

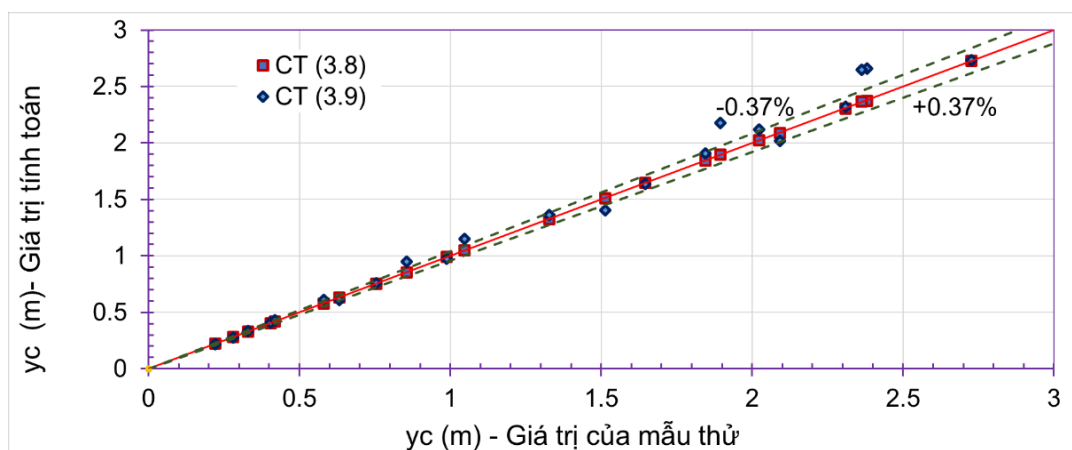
Giá trị	Giá trị mẫu thử					Giá trị tính toán		
	Q (m ³ /s)	b (m)	m	y _c thử dần theo (3. 1) (m)	y _{cCN} (m)	M _c	y _c theo (3.8) (m)	ε (%)
Max	100	10	2	2.727	3.442	0.481	2.727	0.37
Min	1	1	0.5	0.28	0.294	0.019	0.279	0

(chi tiết tính toán tại Phụ lục 6.1)

Bảng 3.3 Tính toán độ sâu phân giới của kênh hình thang theo công thức (3.9)

Giá trị	Giá trị mẫu thử					Giá trị tính toán	
	Q (m ³ /s)	b (m)	m	y _c thử dần theo (3. 1) (m)	y _{cCN} (m)	y _c theo (3.8) (m)	ε (%)
Max	100	10	2	2.727	3.442	2.731	14.75
Min	1	1	0.5	0.28	0.294	0.218	0.15

(chi tiết tính toán tại Phụ lục 6.1)



Hình 3.2 So sánh độ sâu phân giới giữa giá trị tính toán và mẫu thử

Kiểm nghiệm kết quả tính toán: Đánh giá sai số giữa các công thức bán thực nghiệm (3.8), (3.9) và phương pháp tính theo công thức (3. 1).

Bảng 3.4 Đánh giá kết quả tính toán theo chỉ tiêu thống kê

Công thức	MAE	MSE	RMSE	R ²	MAPE (%)
CT 3.8	0.002	0.000	0.003	0.999	0.188
CT 3.9	0.088	0.023	0.152	0.962	5.376

Nhận xét: Từ các kết quả phân tích trên cho thấy, giá trị y_c theo công thức (3.8) cho kết quả tốt hơn công thức (3.9), đề xuất sử dụng công thức (3.8) trong các tính toán về độ phân giới trong nghiên cứu này. Phân tích y_c theo công thức (3.8) với các điều kiện dòng chảy khác nhau cho thấy sai số nhỏ hơn 0,37%, giá trị R^2 xấp xỉ 1 và các chỉ tiêu thống kê khác xấp xỉ hoặc bằng không (chứng tỏ kết quả tính toán gần như chính xác), sai số trung bình tuyệt đối của phương pháp tính toán MAPE = 0,188% rất nhỏ so với sai số lớn nhất của chuỗi tính toán (0,37%) và không có sai số đột biến trong phạm vi kiểm tra. Điều này cho thấy, công thức đề xuất (3.8) về xác định độ sâu phân giới (y_c) đảm bảo kết quả tính toán cho kênh hình thang cân.

3.2 Xây dựng công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

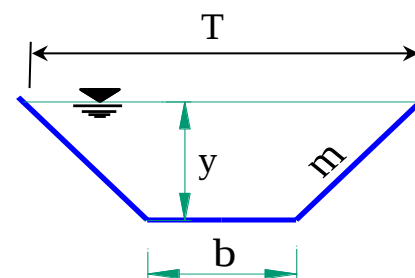
3.2.1 Thiết lập phương trình xác định độ sâu

dòng chảy sau khu xoáy trên kênh hình thang

3.2.1.1 Các đặc trưng của mặt cắt ngang hình thang cân

Xét một kênh lăng trụ hình thang có:

Số Froude tính theo độ sâu dòng chảy (y)



Hình 3.3 Mặt cắt hình thang cân

$$F_r^2 = \frac{\alpha V^2}{gy} \quad (3.10)$$

Đặt:

$M = \frac{my}{b}$ là hệ số mở rộng mặt cắt kênh hình thang

Có:

$$bM = my \quad (3.11)$$

$$A = (b + my)y = (M + 1)b \cdot y \quad (3.12)$$

$$T = b + 2my = (2M + 1)b \quad (3.13)$$

$$z_c = \frac{T + 2b}{T + b} \frac{y}{3} = \frac{b + 2bM + 2b}{b + 2bM + b} \frac{y}{3} = \frac{\frac{1}{3}M + \frac{1}{2}}{M + 1} \cdot y \quad (3.14)$$

3.2.1.2 Xây dựng phương trình về độ sâu dòng chảy khu xoáy của nước nhảy

Từ phương trình (2.18), áp dụng cho các mặt cắt trước nước nhảy (1-1) và sau nước nhảy (2-2) của khu xoáy, có:

$$F_1 = \left(\frac{\alpha_{01}^* V_1^2}{g} + z_{c1} \right) A_1 = C_o \quad (3.15)$$

Và

$$F_2 = \left(\frac{\alpha_{02}^* V_2^2}{g} + z_{c2} \right) A_2 = C_o \quad (3.16)$$

Từ (3.15) có:

$$\begin{aligned} F_1 &= \left(\frac{\alpha_{01}^* V_1^2}{g} + z_{c1} \right) A_1 = \left(\frac{\alpha_{01}^*}{\alpha_1} \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{g \cdot y_1} \cdot y_1 + \frac{\frac{1}{3}M_1 + \frac{1}{2}}{M_1 + 1} \cdot y_1 \right) (M_1 + 1)b \cdot y_1 \\ \Rightarrow F_1 &= \left(\frac{\alpha_{01}^*}{\alpha_1} F_{r1}^2 + \frac{\frac{1}{3}M_1 + \frac{1}{2}}{M_1 + 1} \right) (M_1 + 1)b \cdot y_1^2 \\ \Rightarrow F_1 &= \left[\frac{\alpha_{01}^*}{\alpha_1} F_{r1}^2 \cdot (M_1 + 1) + \frac{1}{3}M_1 + \frac{1}{2} \right] b \cdot y_1^2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

trong đó:

$$M_1 = \frac{m \cdot y_1}{b} \quad (3.18)$$

Xét tương tự với (3.16) có:

$$F_2 = \left[\frac{\alpha_{02}^*}{\alpha_2} F_{r2}^2 \cdot (M_2 + 1) + \frac{1}{3}M_2 + \frac{1}{2} \right] b \cdot y_r^2 \quad (3.19)$$

a. Tính hệ số độ sâu sau và trước nước nước nhảy

$$\text{Đặt: } Y = \frac{y_r}{y_1} \quad (3.20)$$

Từ (3.18) và (3.20) có:

$$M_2 = \frac{my_r}{b} = Y.M_1 \quad (3.21)$$

Ta có:

$$\frac{A_1^2}{A_2^2} = \left(\frac{(M_1 + 1)b y_1}{(M_2 + 1)b y_r} \right)^2 = \left(\frac{M_1 + 1}{Y.M_1 + 1} \right)^2 Y^{-2} \quad (3.22)$$

Theo phương trình liên tục có:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 \quad (3.23)$$

Như vậy có:

$$F_{r2}^2 = \frac{\alpha_2 V_2^2}{gy_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{A_1^2}{A_2^2} \frac{1}{Y} F_{r1}^2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\frac{M_1 + 1}{Y.M_1 + 1} \right)^2 Y^{-3} F_{r1}^2 \quad (3.24)$$

Thay (3.21), (3.24) vào (3.19) có:

$$F_2 = \left[\frac{\alpha_{02}^*}{\alpha_2} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\frac{M_1 + 1}{Y.M_1 + 1} \right)^2 Y^{-3} F_{r1}^2 (Y.M_1 + 1) + \frac{1}{3} Y.M_1 + \frac{1}{2} \right] b.y_r^2$$

$$\Rightarrow F_2 = \left[\frac{\alpha_{02}^*}{\alpha_1} \frac{(M_1 + 1)^2}{Y.M_1 + 1} Y^{-3} F_{r1}^2 + \frac{1}{3} Y.M_1 + \frac{1}{2} \right] b.y_r^2 \quad (3.25)$$

Từ (2.18), (3.15), (3.16), (3.22), (3.23), (3.24) và (3.25) có:

$$\left[\frac{\alpha_{01}^*}{\alpha_1} F_{r1}^2 (M_1 + 1) + \frac{1}{3} M_1 + \frac{1}{2} \right] b.y_1^2 = \left[\frac{\alpha_{02}^*}{\alpha_1} \frac{(M_1 + 1)^2}{Y.M_1 + 1} Y^{-3} F_{r1}^2 + \frac{1}{3} Y.M_1 + \frac{1}{2} \right] b.y_r^2 \quad (3.26)$$

Với mặt cắt (1-1) trước khu xoáy nước nhảy, từ (2.17) có:

$$\alpha_{01}^* = \alpha_{01} - \zeta_1$$

Tại mặt cắt trước nước nhảy, có vận tốc lớn và dòng chảy xiết mạnh, nhưng sự biến đổi trường vận tốc, mạch động và dòng xoáy rối 2 chiều không mạnh, nên

đặc trưng thành phần xoáy rối $\zeta_1 \approx 0$, do đó có thể coi: $\frac{\alpha_{01}^*}{\alpha_1} \approx 1$

Tại mặt cắt (2-2) sau khu xoáy, có: $\alpha_{02}^* = \alpha_{02} - \zeta_2$

Sau khu xoáy của nước nhảy, trường vận tốc biến đổi trên bề mặt dòng chảy chính và trên bề mặt mái dốc hình thang, đặc biệt ảnh hưởng của quá trình xoáy rối

và đặc trưng dòng chảy 2 chiều ở khu xoáy, nên tại mặt cắt (2-2) giá trị $\alpha_0^* \neq \alpha$, khi đó đặt như sau:

$$k = \frac{\alpha_{02}^*}{\alpha_1} \quad (3.27)$$

k được gọi là hệ số tỷ lệ động lượng khu xoáy của nước nhảy

Giá trị k phụ thuộc vào đặc trưng trường vận tốc sau khu xoáy và mức độ xoáy rối của dòng chảy. Giá trị k thể hiện ý nghĩa của quá trình xoáy rối tác động đến hệ số sửa chữa động lượng (α_{02}) tại mặt cắt nghiên cứu, với mỗi loại nước nhảy và đặc trưng lòng dẫn khác nhau sẽ cho các giá trị k khác nhau. Hệ số ζ_2 đối với trường hợp tại mặt cắt có dòng chảy ổn định (như vị trí xác định độ sâu liên hiệp y_2) thì rất nhỏ, lúc đó $\alpha_{02} \approx \alpha_1$ (thể hiện trong Nguyễn Cảnh Cẩm và cộng sự, 2005 [2]) và $k = 1$ thì phương trình (3.26) sẽ trở thành phương trình cơ bản của nước nhảy thường gặp và cho công thức tính như công thức (3.28).

Biến đổi toán học (3.26) thu được như sau:

$$M_1^2 \cdot Y^5 + \frac{5}{2} M_1 \cdot Y^4 + \frac{3}{2} Y^3 - \left[3F_{r1}^2 \cdot (M_1 + 1) + M_1 + \frac{3}{2} \right] M_1 \cdot Y^2 - \left[3F_{r1}^2 \cdot (M_1 + 1) + M_1 + \frac{3}{2} \right] Y + 3 \cdot k \cdot F_{r1}^2 (M_1 + 1)^2 = 0 \quad (3.28)$$

Công thức (3.28) nếu lấy $M_1 = 0$, $k \approx 1$ thì sẽ trở thành:

$$Y^3 - (2F_{r1}^2 + 1)Y + 2F_{r1}^2 = 0 \quad (3.29)$$

Công thức (3.29) là công thức tính độ sâu liên hiệp nước nhảy trên kênh chữ nhật đáy bằng ($i = 0$) của Bélanger (1828), [1][82], có nghiệm:

$$Y = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right) \quad (3.30)$$

Do tính toán nước nhảy trên kênh lắng trụ mặt cắt hình thang cân, nên số Froude của trước nước nhảy được thể hiện như sau:

$$F_{rD}^2 = \frac{\alpha V_1^2}{gD_1} = \frac{2M_1 + 1}{M_1 + 1} F_{r1}^2 \quad (3.31)$$

Với D_1 : Độ sâu thủy lực của mặt cắt (1-1) trước nước nhảy, $D_1 = A_1/T_1$

Khi lòng dẫn có mặt cắt ngang hình chữ nhật, thì: $F_{rD1} = F_{r1}$

Thay (3.31) vào (3.28) có:

$$k_1^2 \cdot Y^5 + \frac{5}{2} M_1 \cdot Y^4 + \frac{3}{2} Y^3 - \left[3F_{rD1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^2}{2M_1+1} + M_1 + \frac{3}{2} \right] M_1 \cdot Y^2 - \left[3F_{rD1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^2}{2M_1+1} + M_1 + \frac{3}{2} \right] Y + 3k \cdot F_{rD1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^3}{2M_1+1} = 0$$

Loại bỏ trường hợp dòng chảy đều ($y_1 = y_r$), phương trình trên trở thành:

$$M_1^2 Y^4 + (M_1^2 + \frac{5}{2} M_1) Y^3 + (M_1^2 + \frac{5}{2} M_1 + \frac{3}{2}) Y^2 + \left[-3F_{rD1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^2}{2M_1+1} \cdot M_1 + M_1 + \frac{3}{2} \right] Y - 3k \cdot F_{rD1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^3}{2M_1+1} = 0 \quad (3.32)$$

Trong đó các giá trị tính như sau:

$$Y = \frac{y_r}{y_1} \quad M_1 = \frac{m \cdot y_1}{b} \quad M_c = \frac{m \cdot y_c}{b}$$

$$F_{rD1}^2 = \frac{\alpha_0 V_1^2}{g D_1} = \frac{A_c^3}{T_c} \cdot \frac{T}{A_1^3} = \frac{2M_1+1}{2M_c+1} \left(\frac{M_c+1}{M_1+1} \right)^3 \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^3$$

y_c : Độ sâu phân giới của dòng chảy được tính theo công thức (3.8)

b. Tính hệ số độ sâu trước và sau nước nhảy

$$\text{Đặt:} \quad \eta = \frac{y_1}{y_r} \quad (3.33)$$

Biến đổi toán học tương tự phương trình (3.32), thu được phương trình sau:

$$M_2^2 \eta^4 + (M_2^2 + \frac{5}{2} M_2) \eta^3 + (M_2^2 + \frac{5}{2} M_2 + \frac{3}{2}) \eta^2 + \left[-3F_{rD2}^2 \cdot \frac{(M_2+1)^2}{2M_2+1} \cdot M_2 + M_2 + \frac{3}{2} \right] \eta - 3F_{rD2}^2 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{(M_2+1)^3}{2M_2+1} = 0 \quad (3.34)$$

Phương trình (3.32), (3.34) được xây dựng để xác định mối quan hệ của độ sâu khu xoáy của nước nhảy trên kênh lăng trụ đối xứng hình thang cân.

3.2.2 Xây dựng công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

Giải phương trình (3.32), (3.34) tính tỷ số độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, nếu $M_{1,2} = 0$ (kênh có mặt cắt ngang chữ nhật) thì nghiệm được tính theo công thức của Bélanger (1828). Hai phương trình (3.32) và (3.34) tương tự nhau,

trong phạm vi nghiên cứu ở đây chỉ xem xét một phương trình (3.32), biến đổi thành phương trình (3.35) với $M_1 \neq 0$ như sau:

$$Y^4 + \left(1 + \frac{5}{2M_1}\right)Y^3 + \left(1 + \frac{5}{2M_1} + \frac{3}{2M_1^2}\right)Y^2 + \left[-3Fr_{D1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^2}{(2M_1+1)M_1} + \frac{1}{M_1} + \frac{3}{2M_1^2}\right]Y - 3.k.Fr_{D1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^3}{(2M_1+1)M_1^2} = 0 \quad (3.35)$$

$$\text{Đặt: } a = \left(1 + \frac{5}{2M_1}\right) \quad c = -3Fr_{D1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^2}{(2M_1+1)M_1} + \frac{1}{M_1} + \frac{3}{2M_1^2}$$

$$b = 1 + \frac{5}{2M_1} + \frac{3}{2M_1^2} \quad d = -3.k.Fr_{D1}^2 \cdot \frac{(M_1+1)^3}{(2M_1+1)M_1^2}$$

$$f = \frac{a^2}{4} - \frac{2b}{3} \quad w = b^2 - 3ac + 12d$$

$$s = 2b^3 - 9abc + 27c^2 + 27a^2d - 72bd \quad q = -a^3 + 4ab - 8c$$

$$v = \frac{2^{1/3} \cdot w}{3\left(s + \sqrt{-4 \cdot w^3 + s^2}\right)^{1/3}} \quad z = \left(\frac{s + \sqrt{-4 \cdot w^3 + s^2}}{54}\right)^{1/3}$$

Giải được nghiệm của phương trình (3.35) xác định quan hệ giữa độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy của nước nhảy theo công thức phù hợp như sau:

$$Y = \frac{-a}{4} + \frac{1}{2}\sqrt{f+v+z} + \frac{1}{2}\sqrt{f-v-z + \frac{q}{4\sqrt{f+v+z}}} \quad (3.36)$$

Công thức (3.36) là công thức tính mối tương quan giữa độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy trên lòng dẫn mặt cắt ngang hình thang cân, đáy bằng.

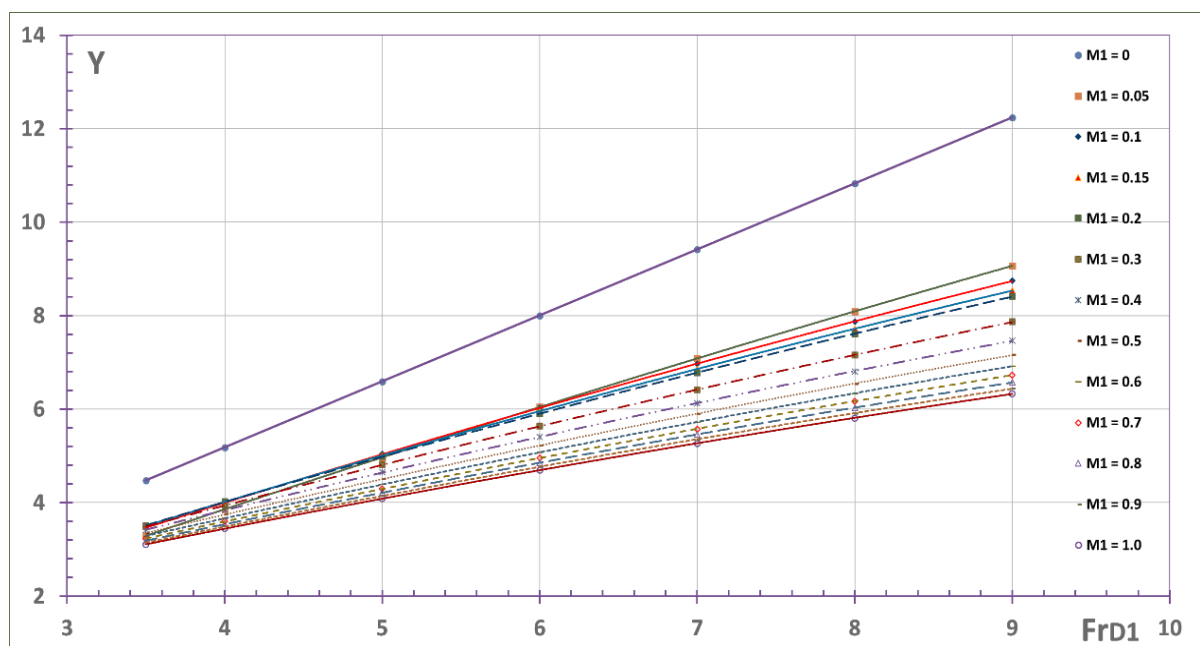
Sử dụng công thức (3.36), tính toán tỷ lệ độ sâu dòng chảy trước và sau khu xoáy với $M_1 = (0 \div 1)$, $k = 1$ và số $Fr_{D1} = (3,5 \div 9)$, kết quả thể hiện ở Bảng 3.5 và Hình 3.4. Như vậy, Bảng 3.5 và Hình 3.4 dùng để tra giá trị của công thức (3.36).

Bảng 3.5 Phân tích kết quả tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

Fr_{D1}	M_1												
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
3,5	4,47	3,29	3,46	3,50	3,51	3,48	3,41	3,34	3,28	3,23	3,18	3,14	3,10
4	5,18	3,86	4,00	4,02	4,02	3,94	3,84	3,75	3,67	3,60	3,54	3,49	3,44

Fr_{D1}	M_1												
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	6,59	4,97	5,04	5,02	4,99	4,81	4,65	4,51	4,40	4,30	4,22	4,15	4,09
6	8,00	6,04	6,03	5,96	5,90	5,63	5,41	5,22	5,08	4,96	4,85	4,77	4,69
7	9,41	7,08	6,97	6,85	6,78	6,41	6,12	5,90	5,72	5,57	5,45	5,35	5,27
8	10,82	8,09	7,87	7,71	7,61	7,15	6,81	6,54	6,33	6,17	6,03	5,91	5,81
9	12,24	9,07	8,74	8,54	8,41	7,87	7,47	7,16	6,92	6,73	6,57	6,44	6,33

Sử dụng dữ liệu tại Bảng 3.5, thể hiện trên biểu đồ như sau:



Hình 3.4 Quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (Y) theo M_1 và Fr_{D1}

Trong thực tế, độ sâu liên hiệp nước nhảy biến đổi phức tạp, phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau, như quá trình xoáy cuộn của dòng tia, ma sát dòng chảy và phân bố lưu tốc không đều trên mặt cắt ướt và dọc theo dòng chảy.

Do vậy, độ sâu sau khu xoáy tính theo công thức (3.36) hoặc theo Bảng 3.5 và Hình 3.4 với điều kiện số $M_1 \geq 0,2$ có quy luật biến đổi phù hợp, điều này tương tự nghiên cứu của Wanoscheck R. và Hager W. (1989) và Hager W. (1992). Khi $M_1 < 0,2$ thì quy luật biến đổi của công thức (3.36) đã không phù hợp cho tính toán độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, vì theo công thức lý thuyết (3.36) thì một bộ giá trị (Y và Fr_{D1}) sẽ tìm được nhiều giá trị M_1 (Hình 3.4), trong khi đó với 1 giá trị Fr_{D1} sẽ cho duy nhất một giá trị y và dẫn đến sẽ chỉ có duy nhất 1 giá trị Y .

Nguyên nhân cơ bản của công thức (3.36) không phù hợp khi $M_1 < 0,2$ là do công thức (3.36) là nghiệm toán học của phương trình bậc 4, nên xảy ra trường hợp nghịch biến ở một số khu vực $M_1 < 0,2$ và gây ra hiện tượng chồng nghiệm. Do đó, cần phải xử lý riêng khi tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy khi $M_1 < 0,2$.

3.2.3 Xác định hệ số tỷ lệ động lượng khu xoáy của nước nhảy

Phân tích phương trình (3.36), các giá trị biểu thị tại Bảng 3.5 và Hình 3.4 cho thấy, khi $M_1 > 0,2$, thì đặc trưng hình học khu xoáy sẽ đảm bảo quy luật biến đổi phù hợp với nghiên cứu lý thuyết. Do vậy, để xác định hệ số k , nghiên cứu sẽ sử dụng bộ dữ liệu nghiên cứu thực nghiệm hiện tại và dữ liệu của Wanoschek R. & Hager W. (1989) để nghiên cứu. Dữ liệu nghiên cứu phải đảm bảo điều kiện:

$$\{4,0 \leq Fr_{D1} \leq 9,0 \quad M_1 \geq 0,2 \quad y_1 \geq 3\text{cm}\}$$

Dữ liệu nghiên cứu sau khi lọc bỏ theo điều kiện, còn lại 22 bộ dữ liệu (nếu xét theo tiêu chuẩn 2^m , thì dữ liệu nghiên cứu đảm bảo phân tích xác định xu thế biến đổi của giá trị nghiên cứu, vì theo Chương 2 có: $2^4 = 16 < 22$ bộ dữ liệu), dữ liệu nghiên cứu thể hiện được thể hiện như sau:

Bảng 3.6 Dữ liệu thực nghiệm nghiên cứu về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy

Giá trị	Q (l/s)	y_1 (m)	y_r (m)	Fr_{D1}	M_1	$Y_{td} = y_r/y_1$
Max	0.158	0.092	0.448	8.681	0.406	7.922
Min	0.0242	0.0405	0.17	3.636	0.2	3.556

(Bảng dữ liệu chi tiết tại phụ lục 6.2)

Từ công thức (3.36), tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo các trường hợp:

$$\begin{cases} Fr_{D1} = 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10. \\ M_1 = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0. \\ k = 0,9; 0,91; 0,92; 0,94; 0,95; 0,97; 1; 1,045; 1,56. \end{cases} \quad (3.37)$$

Như vậy, mỗi một tổ hợp (Fr_{D1} , M_1) ở Bảng 3.6 và một giá trị k ở điều kiện (3.37) sẽ giải tìm được một giá trị tính toán (Y_{tt}) theo công thức (3.36), sau đó sử dụng các chỉ tiêu thống kê để đánh giá giữa giá trị thực đo (Y_{td}) với giá trị tính toán (Y_{tt}) đối với từng trường hợp.

Để thuận lợi, các bảng tra giá trị tính toán (Y_{tt}) ở công thức (3.36) được lập sẵn theo các giá trị k khác nhau (Phụ lục 6.3). Một số trường hợp tính toán được thể hiện ở Bảng 3.7 như sau:

Bảng 3.7 Giá trị tính toán độ sâu sau khu xoáy theo công thức (3.36)

Giá trị	Fr_{D1}	M_1	Y_{td}	$k = 1$		$k = 0.93$		$k = 0.92$		$k = 0.91$	
				Y_{tt}	$\varepsilon \%$	Y_{tt}	$\varepsilon \%$	Y_{tt}	$\varepsilon \%$	Y_{tt}	$\varepsilon \%$
Max	8.681	0.406	7.922	7.980	5.3	7.872	4.1	7.856	4.0	7.840	3.8
Min	3.636	0.200	3.556	3.524	0.3	3.471	0.0	3.463	0.3	3.455	0.1

(Bảng dữ liệu chi tiết tại phụ lục 6.3)

Kết quả nghiên cứu các chỉ tiêu thống kê được tập hợp theo Bảng 3.8 sau:

Bảng 3.8 Các chỉ tiêu phân tích thống kê trong nghiên cứu hệ số k

TT	k	MAE	MSE	RMSE	R^2	MAPE (%)
1	1	0.111	0.021	0.146	0.982	2.034
2	0.95	0.080	0.016	0.127	0.986	1.441
3	0.94	0.078	0.012	0.108	0.990	1.450
4	0.93	0.078	0.011	0.106	0.990	1.453
5	0.92	0.079	0.011	0.104	0.991	1.498
6	0.91	0.081	0.011	0.105	0.990	1.546
7	0.9	0.085	0.011	0.107	0.990	1.625
Max	1	0.111	0.021	0.146	0.991	2.034
Min	0.9	0.078	0.011	0.104	0.982	1.441

Từ các chỉ tiêu đánh giá trong thống kê tại Bảng 3.8 cho thấy, khi $k = 0,91$, $0,92$, $0,93$ và $0,94$ sẽ cho các tham số thống kê tốt nhất, nhưng giá trị $k = 0,92$ cho hiệu quả tính toán của công thức lý thuyết (3.36) là tốt hơn ở tham số R^2 và RMSE.

Như vậy, giá trị thực nghiệm về hệ số tỷ lệ động lượng khu xoáy được xác định là $k = 0,92$, giá trị này nhỏ hơn 1 (điều này là do quá trình rối phức tạp, gây ra cản dòng chảy ở khu xoáy lớn) và hệ số này áp dụng cho nước nhảy ổn định ($Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$) trong kênh lắng trụ hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

3.2.4 Xây dựng phương pháp xác định độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

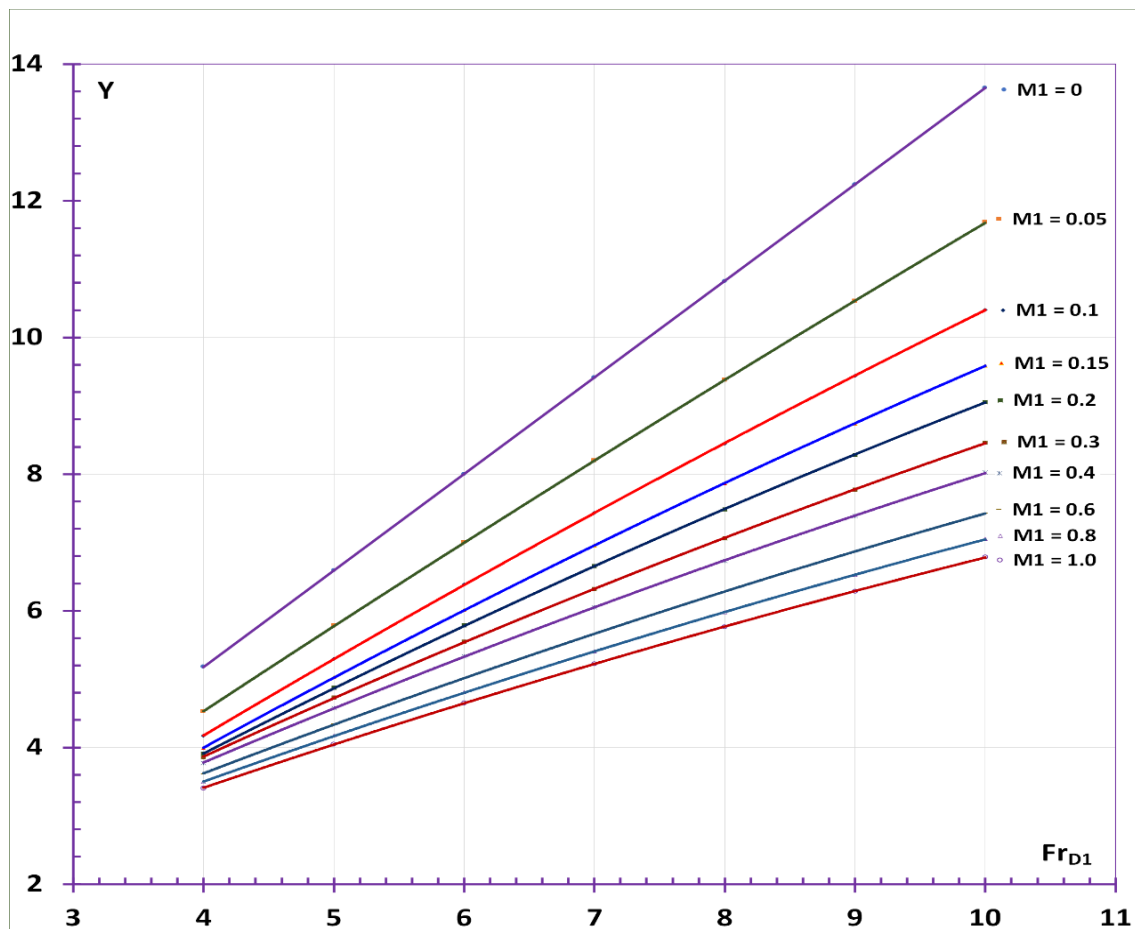
Để tìm độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy từ phương trình (3.36) cho thấy nếu hệ số $M_1 < 0,2$ thì giá trị phương trình (3.36) không ổn định. Để giải quyết hiện tượng này, những giá trị nằm trong khoảng từ $M_1 = 0,0 \div 0,2$ sẽ được tính nội suy

theo các giá trị dữ liệu nghiệm phân tích trên Bảng 3.7. Kết quả phân tích nội suy đối với các trường hợp $M_1 < 0,2$ và tính theo hệ số $k = 0,92$ như sau:

Bảng 3.9 Giá trị tỷ số độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước với $k = 0,92$

Fr_{D1}	M_1												
	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
4	5.18	4.53	4.17	3.99	3.90	3.86	3.77	3.69	3.62	3.55	3.49	3.45	3.40
5	6.59	5.78	5.30	5.03	4.87	4.73	4.58	4.45	4.34	4.25	4.17	4.11	4.05
6	8.00	7.00	6.38	6.01	5.78	5.55	5.33	5.16	5.02	4.90	4.81	4.72	4.65
7	9.41	8.20	7.43	6.96	6.65	6.32	6.05	5.84	5.66	5.52	5.41	5.31	5.22
8	10.82	9.38	8.45	7.86	7.48	7.06	6.73	6.48	6.28	6.11	5.98	5.86	5.76
9	12.24	10.54	9.44	8.74	8.28	7.77	7.39	7.10	6.86	6.68	6.52	6.39	6.28

Bảng 3.9 được sử dụng để xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy theo bộ số (Fr_{D1} và M_1), được thể hiện trên biểu đồ Hình 3.5 như sau.



Hình 3.5 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy với Fr_{D1} khi $k = 0,92$

Mối quan hệ giữa tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy và Fr_{D1} là một đường cong bậc 2 theo các giá trị M_1 khác nhau và là đường cong thỏa mãn phương trình toán học có hệ số phù hợp $R^2 = 1$.

Như vậy, khi xác định tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy sử dụng Bảng 3.9 hoặc biểu đồ Hình 3.5 sẽ phù hợp hơn, vì đúng cho mọi giá trị M_1 và $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$ (trong phạm vi nước nhảy ổn định).

3.2.5 Phân tích thực nghiệm về độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy trên kênh mặt cắt ngang hình thang

3.2.5.1 Tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

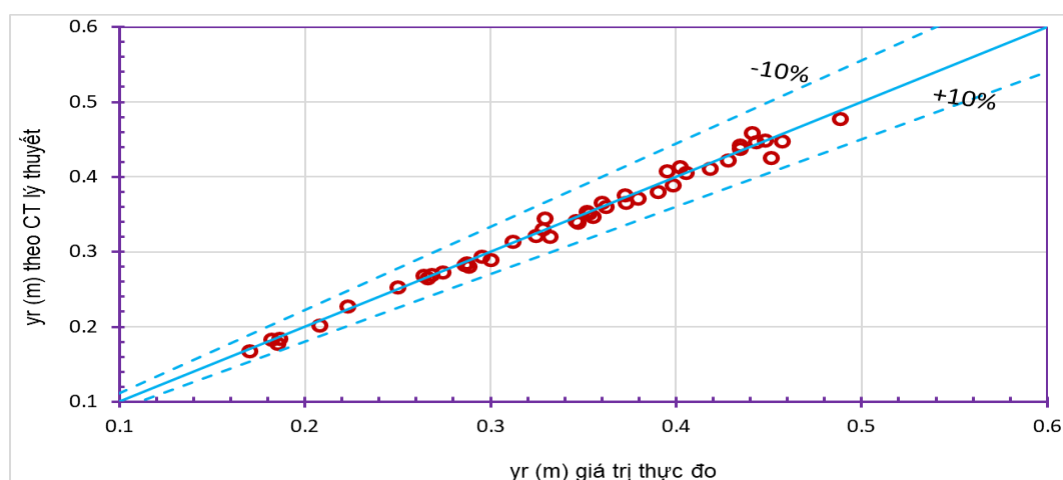
Từ các giá trị đo đạc trên mô hình vật lý, kết hợp với công thức xác định tỷ lệ độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy (3.36) và Bảng 3.9 hoặc Hình 3.5. Sử dụng bộ dữ liệu thực nghiệm nghiên cứu và dữ liệu của Wanschek R. & Hager W. (1989) với tổng số 46 cặp số liệu để phân tích theo phương pháp lý thuyết.

Xác định được các thông số tính toán theo phương pháp lý thuyết đối với độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy:

Bảng 3.10 Tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo phương pháp lý thuyết

Giá trị	Giá trị thực đo					Giá trị tính toán		
	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	Fr _{D1}	M ₁	Y _{tt}	y _r (m)	ε (%)
Max	0.201	0.092	0.488	8.681	0.406	8.869	0.478	5.6
Min	0.0242	0.04	0.170	3.636	0.073	3.463	0.168	0.3

(chi tiết tính toán tại Phụ lục 6.4)



Hình 3.6 Biểu đồ giá trị tính toán và thực đo của độ sâu sau khu xoáy (y_r)

Nhận xét: Tính toán độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy theo Bảng 3.9 hoặc Hình 3.5 cho thấy giữa kết quả tính toán và thực đo có sai số lớn nhất 5,6%.

Như vậy, khi tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy ổn định trong kênh hình thang, có thể sử dụng công thức (3.36) theo giá trị $k = 0,92$, Bảng 3.9 hoặc biểu đồ Hình 3.5. Nếu giá trị $M_1 < 0,2$ thì chỉ sử dụng Bảng 3.9 hoặc hoặc biểu đồ Hình 3.5 để xác định.

3.2.5.2 Xác định công thức thực nghiệm về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy

Xuất phát từ mối quan hệ giữa các yếu tố đặc trưng của nước nhảy và độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy tại mục 1.5, phân tích nghiên cứu theo lý thuyết hàm Pi của Buckingham (2.42) và coi tổn thất là một phần đặc trưng bởi các hệ số thực nghiệm (vì tổn thất có thể phân tích dựa trên đặc trưng của công thức Darcy-Weysbach, biểu thị $\sum \zeta = f \left[\left(V_1^2 / 2g \right) / y_1 \right] = f (Fr_1)$).

Khi đó phương trình xác định mối liên hệ giữa các yếu tố như sau:

$$y_r / y_1 = \Psi (M_1, Fr_1) \quad (3.38)$$

Dựa trên cấu trúc của các công thức về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy tại mục 1.4.1.4, đề xuất phương trình về đặc trưng hình học nước nhảy như sau:

$$y_r / y_1 = a (M_1^b) (Fr_1^c)$$

với: a, b, c là các hệ số thực nghiệm có xét đến các đặc trưng về tổn thất năng lượng, áp suất mạch động và đặc trưng rối của khu xoáy trong nước nhảy.

Căn cứ vào dữ liệu thực nghiệm tại Bảng 2.5 và dữ liệu từ nghiên cứu của Wanoschek R. & Hager W (1989), nghiên cứu tập hợp dữ liệu của 3 mô hình kênh dẫn có mặt cắt ngang hình thang cân, mái dốc $m = 1$ khác nhau, gồm có kênh có bề rộng đáy b là 55cm, 33,5cm và 20cm. Tập hợp được 46 bộ dữ liệu để nghiên cứu, trong đó tách ra 10 bộ dữ liệu để kiểm định và 36 bộ dữ liệu để xây dựng công thức.

Bảng 3.11 Dữ liệu nghiên cứu xây dựng công thức thực nghiệm

Giá trị	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)	M ₁	Fr ₁	Fr _{D1}	b (m)
Max	0.193	0.092	0.488	2.1	0.406	9.315	10.074	0.55
Min	0.0242	0.04	0.17	0.7	0.073	3.639	4.131	0.2

(Chi tiết dữ liệu tại Phụ lục 6.5)

Bảng 3.12 Dữ liệu kiểm định kết quả nghiên cứu

TT	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)	M ₁	Fr ₁	Fr _{D1}	b (cm)
1	0.118	0.062	0.264	1.1	0.113	3.988	4.185	0.55
2	0.201	0.065	0.443	1.8	0.118	6.297	6.621	0.55
3	0.201	0.079	0.398	1.7	0.144	4.595	4.875	0.55
4	0.078	0.06	0.274	1.3	0.179	4.290	4.604	0.335
5	0.136	0.083	0.39	1.8	0.248	4.344	4.756	0.335
6	0.04	0.04	0.186	0.8	0.119	4.257	4.478	0.335
7	0.149	0.074	0.434	2	0.221	5.778	6.279	0.335
8	0.055	0.0611	0.287	1.4	0.306	4.453	4.947	0.2
9	0.085	0.0812	0.352	1.75	0.406	4.171	4.735	0.2
Max	0.201	0.083	0.443	2	0.406	6.297	6.621	0.55
Min	0.04	0.04	0.186	0.8	0.113	3.988	4.185	0.2

Áp dụng phần mềm IBM SPSS 26 cho bộ dữ liệu nghiên cứu, kết quả xác định được các hệ số thực nghiệm (Phụ lục 1), có công thức như sau:

$$\frac{y_r}{y_1} = 0,959M_1^{-0,12}Fr_1^{0,936} \quad (3.39)$$

Sử dụng dữ liệu Bảng 3.11 để kiểm định công thức (3.39) về tính tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, kết quả tính toán được hiện như sau:

Bảng 3.13 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy nước nhảy theo công thức thực nghiệm

Giá trị	Dữ liệu thực nghiệm				Kết quả tính		
	Q (m ³ /s)	M ₁	Fr ₁	y _r /y ₁	y _r /y ₁	y _r (m)	ε (%)
Max	0.193	0.406	9.315	9.396	9.372	0.481	7.1
Min	0.0242	0.073	3.639	3.847	3.581	0.170	0.0

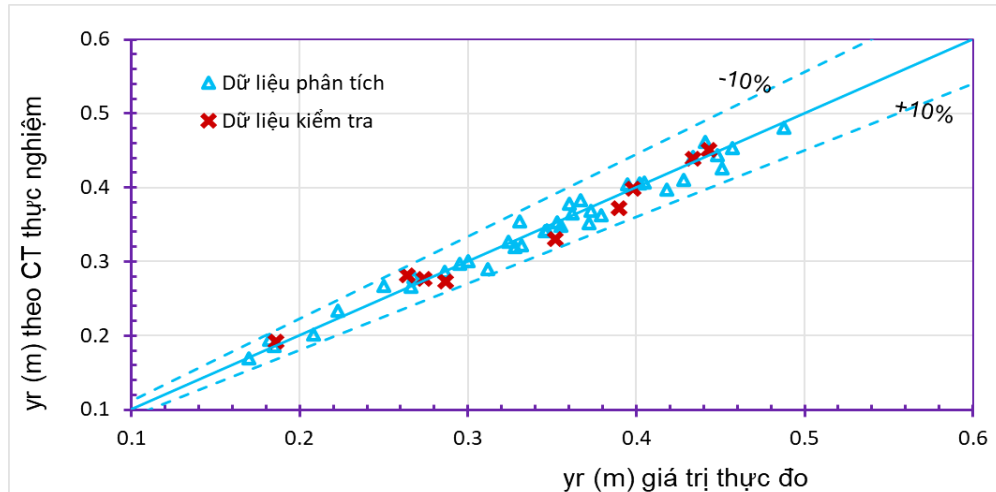
(chi tiết tính toán tại Phụ lục 6.6)

Bảng 3.14 Tính toán với dữ liệu kiểm tra về độ sâu chảy sau khu xoáy theo công thức thực nghiệm

TT	Dữ liệu thực nghiệm				Kết quả tính		
	y _r (m)	M ₁	Fr ₁	y _r /y ₁	y _r /y ₁	y _r (m)	ε (%)
1	0.264	0.113	3.988	4.258	4.548	0.282	6.8
2	0.443	0.118	6.297	6.815	6.936	0.451	1.8
3	0.398	0.144	4.595	5.038	5.045	0.399	0.1
4	0.274	0.179	4.290	4.567	4.607	0.276	0.9
5	0.39	0.248	4.344	4.699	4.484	0.372	4.6
6	0.186	0.119	4.257	4.650	4.802	0.192	3.3
7	0.434	0.221	5.778	5.865	5.937	0.439	1.2
8	0.287	0.306	4.453	4.697	4.475	0.273	4.7

TT	Dữ liệu thực nghiệm				Kết quả tính		
	y_r (m)	M_1	Fr_1	y_r/y_1	y_r/y_1	y_r (m)	ε (%)
9	0.352	0.406	4.171	4.335	4.068	0.330	6.2
Max	0.443	0.406	6.297	6.815	6.936	0.451	6.8
Min	0.186	0.113	3.988	4.258	4.068	0.192	0.1

Các kết quả tính toán được thể hiện như biểu đồ sau:



Hình 3.7 Biểu đồ tỷ lệ độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy giữa giá trị thực đo và tính theo công thức thực nghiệm

Đánh giá kết quả tính toán theo công thức lý thuyết (3.36) và công thức thực nghiệm (3.39) đối với toàn bộ dữ liệu, các chỉ tiêu phân thống kê khi phân tích dữ liệu thực đo và kết quả tính theo công thức thực nghiệm thể hiện ở Bảng 3.15 như sau:

Bảng 3.15 Các chỉ tiêu thống kê theo các phương pháp tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

STT	Phương pháp tính toán	MAE	MSE	RMSE	R^2	MAPE (%)
1	Công thức lý thuyết	0.006	0.000	0.008	0.991	1.725
2	Công thức thực nghiệm	0.009	0.000	0.012	0.978	2.776

Từ các chỉ tiêu thống kê cho thấy quan hệ tương quan giữa giá trị thực đo và tính toán theo công thức lý thuyết rất cao (hệ số $R^2 > 0,9$), bên cạnh đó các chỉ số thống kê khác cũng rất nhỏ, tiến gần đến không đã đảm bảo cho độ chính xác của phương pháp tính toán và sai số MAPE rất nhỏ đối với cả 2 phương pháp tính.

Công thức lý thuyết có sai số lớn nhất ở dữ liệu phân tích là 5,6%, nhỏ hơn sai số so với phương pháp dùng công thức thực nghiệm (7,1%), điều này do các yếu tố ảnh hưởng và quy luật đặc thù của dòng chảy chưa được xem xét trong công

thức thực nghiệm. Tuy nhiên, công thức thực nghiệm (3.39) có phương pháp tính đơn giản, dễ thực hiện hơn công thức lý thuyết (3.36).

Như vậy, nghiên cứu phân tích độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy đều có độ chính xác cao và đảm bảo áp dụng cho nghiên cứu thực tế.

3.2.5.3 Đánh giá các công thức xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy

So sánh kết quả tính toán độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (y_r) giữa công thức lý thuyết, công thức thực nghiệm và công thức của tác giả khác đối với toàn bộ dữ liệu nghiên cứu và dữ liệu của Wanocheck R. & Hager W. (1989)[58].

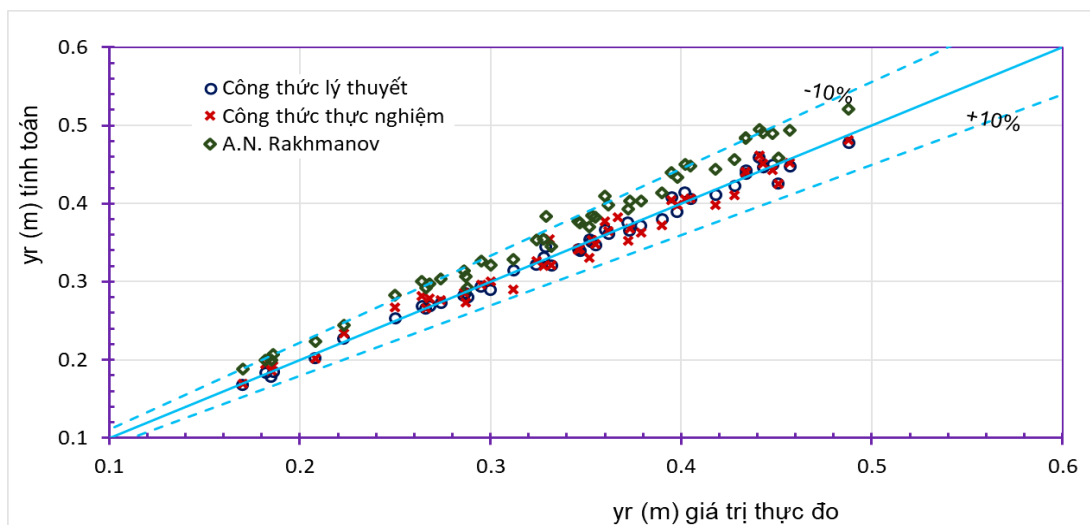
Trong các công thức về xác định độ sâu sau khu xoáy, công thức của A.N. Rakhmanov (1930) phù hợp với nghiên cứu, nên trong nghiên cứu này đã sử dụng công thức này để phân tích cho bộ 46 dữ liệu thực đo, kết quả tính toán như sau:

Bảng 3.16 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo A.N. Rakhmanov (1930)

TT	Giá trị thực đo				Giá trị tính toán		
	Q (m ³ /s)	b (m)	y_1 (m)	y_r (m)	y_c (m)	y_r (m)	ε (%)
Max	0.201	0.55	0.092	0.488	0.225	0.521	16.6
Min	0.0242	0.2	0.04	0.17	0.097	0.188	1.6

(Chi tiết tại phụ lục 6.7)

So sánh với các công thức tính toán theo lý thuyết (3.36) và thực nghiệm (3.39) cho thấy, công của A.N. Rakhmanov (1930) có sai số lớn hơn, các giá trị phân tích về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy thể hiện tại Hình 3.8 sau.



Hình 3.8 Mối quan hệ giữa giá trị thực đo và tính toán của độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

Từ Hình 3.8 cho thấy, các giá trị tính toán từ công thức lý thuyết có độ phù hợp tốt nhất, các điểm phân tích hội tụ theo đường tập trung (đường lý thuyết khi mà giá trị thực đo và tính toán như nhau), các giá trị tính toán theo công thức của A.N. Rakhmanov (1930) có giá trị thiên lớn so với đường tập trung và có sai số lớn so với các công thức đề xuất.

3.3 Xây dựng công thức xác định chiều dài nước nhảy trong kênh lắng trụ đáy bằng có mặt cắt ngang hình thang

3.3.1 Xây dựng công thức bán thực nghiệm xác định chiều dài nước nhảy

3.3.1.1 Phân tích và đánh giá công thức tính chiều nước nhảy

Quá trình biến đổi dòng chảy dựa trên ảnh hưởng của nhiều yếu tố ban đầu, trong đó có các đặc trưng hình học và thủy lực của dòng chảy trước nước nhảy, nên chia 2 vế của phương trình (2.23) cho y_1 sẽ có hệ số tỷ lệ chiều dài dòng chảy theo độ sâu được xác định như sau:

$$M_n = \frac{L}{y_1} = \frac{1}{y_1} \frac{\Delta E - (1 - A_1 / A_2)^2 (V_{tb}^2 / 2g)}{(Q / K_{tb})^2} \quad (3.40)$$

Phương trình (3.40) biểu thị quan hệ chiều dài nước nhảy và độ sâu dòng chảy trước nước nhảy. Giá trị M_n là hệ số không thứ nguyên về đặc trưng phát triển chiều dài khu xoáy theo độ sâu trước nước nhảy.

Từ phương trình (3.40) xác định chiều dài khu xoáy theo hàm số thực nghiệm như sau:

$$\frac{L_r}{y_1} = f(M_n) \quad (3.41)$$

Tiêu năng trong nước nhảy được xác định như sau:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta E}{y_1} = \frac{E_1 - E_2}{y_1} \quad (3.42)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{y_1} &= \frac{1}{y_1} \left(y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) = 1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha_1 V_1^2}{g y_1} = 1 + \frac{1}{2} F_{r1}^2 \\ \frac{E_2}{y_1} &= \frac{1}{y_1} \left(y_r + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) = \frac{y_r}{y_1} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\alpha_2 V_2^2}{g y_r} \right) \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\frac{E_2}{y_1} = \frac{y_r}{y_1} \left(1 + \frac{1}{2} F_{r2}^2 \right) \quad (3.44)$$

Mặt khác khi tính số Froude theo độ sâu dòng chảy giữa 2 mặt cắt, dựa trên phương trình liên tục, mối quan hệ giữa 02 số Froude được xác định như sau:

$$F_{r2}^2 = \frac{y_1}{y_r} \frac{A_1^2}{A_2^2} F_{r1}^2 \quad (3.45)$$

Thay (3.45) vào (3.44) sẽ có:

$$\frac{E_2}{y_1} = \frac{y_r}{y_1} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{y_1}{y_r} \frac{A_1^2}{A_2^2} F_{r1}^2 \right) \quad (3.46)$$

Thay (3.43), (3.46) vào (3.42) có:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E}{y_1} &= \left(1 + \frac{1}{2} F_{r1}^2 \right) - \frac{y_r}{y_1} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{y_1}{y_r} \frac{A_1^2}{A_2^2} F_{r1}^2 \right) \\ \Rightarrow \frac{\Delta E}{y_1} &= \left(1 - \frac{y_r}{y_1} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) F_{r1}^2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Thay (3.47) vào (3.40) sẽ có:

$$M_n = \frac{1}{(Q/K_{tb})^2} \left[\left(1 - \frac{y_r}{y_1} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) F_{r1}^2 - \frac{1}{y_1} \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \frac{V_{tb}^2}{2g} \right] \quad (3.48)$$

Công thức (3.48) cho thấy hệ số M_n bị ảnh hưởng bởi số Froude của mặt cắt trước nước nhảy (F_{r1}), nên Lr/y_1 cũng phụ thuộc vào Fr_1 (hoặc Fr_{D1}), điều này cho thấy công thức (3.48) phù hợp với các nghiên cứu về chiều dài nước nhảy trên kênh hình thang của Silvester (1964) [65], Rajaratnam và Subramanya (1968)[57] và công thức tính chiều dài nước nhảy trên kênh mặt cắt chữ nhật của nhiều tác giả khác đều chịu ảnh hưởng của số Froude trước nước nhảy.

Từ (3.31), thay Fr_{D1} cho Fr_1 , công thức (3.48) được viết lại như sau:

$$M_n = \frac{1}{(Q/K_{tb})^2} \left[\left(1 - \frac{y_r}{y_1} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) \left(\frac{M_1 + 1}{2M_1 + 1} \right) F_{rD1}^2 - \frac{1}{y_1} \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \frac{V_{tb}^2}{2g} \right] \quad (3.49)$$

Công thức (3.48) và (3.49) là công thức phân tích chiều dài dòng chảy với trạng thái dòng chảy ổn định đều và thay đổi dần. Trong khi đó, nước nhảy là hiện tượng nhảy vọt về độ sâu dòng chảy trong một khoảng cách ngắn với tiêu hao năng

lượng lớn, quá trình dòng chảy rối khuếch tán mạnh và có sự ảnh hưởng của dòng chảy 2 chiều (khu xoáy cuộn), 2 pha (nước và khí). Do vậy giá trị Mn theo công thức (3.48) và (3.49) sẽ lớn gấp nhiều lần giá trị chiều dài khu xoáy (L_r/y_1) thực đo của nước nhảy, nên mối quan hệ giữa chiều dài khu xoáy và giá trị tỷ lệ chiều dài dòng chảy (Mn) cần phải xác theo nghiên cứu thực nghiệm.

3.3.1.2 Thiết lập công thức bán thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

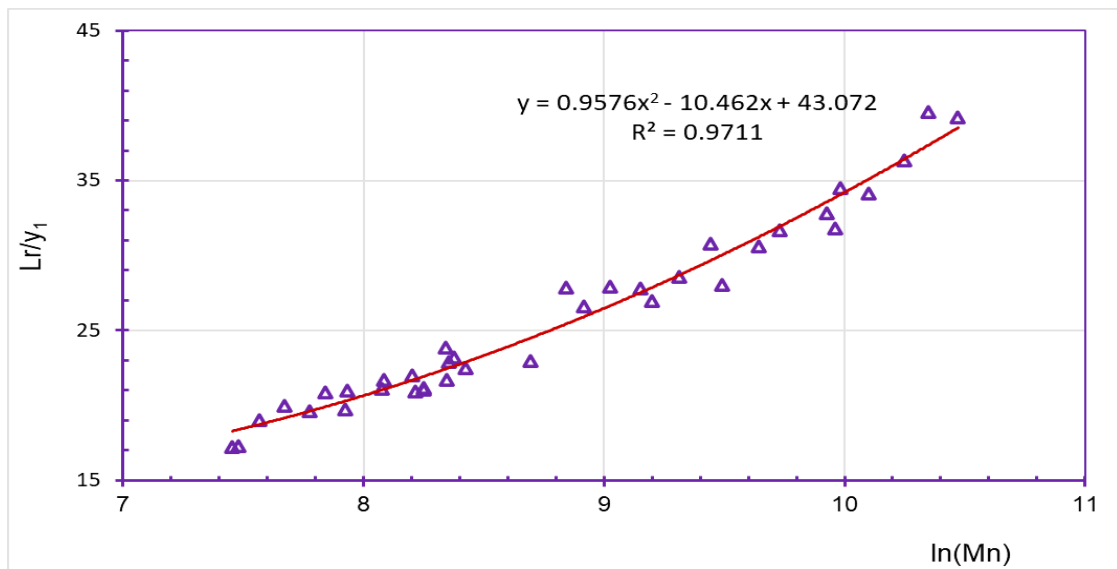
Căn cứ vào số liệu thực nghiệm tại Bảng 2.5, số liệu của Wanoschek R. & Hager W. (1989), dữ liệu nghiên cứu tập hợp thành bộ dữ liệu phân tích công thức và dữ liệu kiểm định (thể hiện tại Phụ lục 6.5). Xuất phát từ công thức (3.48), tính toán các thành phần cơ bản theo chuỗi dữ liệu tính toán như Bảng 3.16 sau:

Bảng 3.17 Phân tích dữ liệu thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

TT	Q (m ³ /s)	b (m)	y ₁ (m)	L _r (m)	L _r /y ₁ đo	K _{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	ln(Mn)
Max	0.193	0.55	0.092	2.1	39.583	6.824	1.475	35267	10.471
Min	0.0242	0.2	0.04	0.7	17.263	0.517	0.173	1729	7.455

(chi tiết tính toán tại phụ lục 6.8)

Xây dựng mối quan hệ giữa $\ln(Mn)$ với L_r/y_1 như biểu đồ sau:



Hình 3.9 Mối quan hệ giữa $\ln(Mn)$ với chiều dài khu xoáy của nước nhảy (L_r/y_1)

Công thức chiều dài khu xoáy của nước nhảy ổn định được thể hiện như sau:

$$\frac{L_r}{y_1} = 0,9576[\ln(Mn)]^2 - 10,462 \ln(Mn) + 43,072 \quad (3.50)$$

trong đó: Mn được tính theo công thức (3.48)

Công thức (3.50) là công thức “bán thực nghiệm” để xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy ổn định ($Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$) trong kênh hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

3.3.1.3 Kiểm tra và đánh giá công thức

Từ công thức (3.50) tiến hành tính toán các giá trị chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo công thức bán thực nghiệm như Bảng 3.18 sau:

Bảng 3.18 Chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo công thức bán thực nghiệm

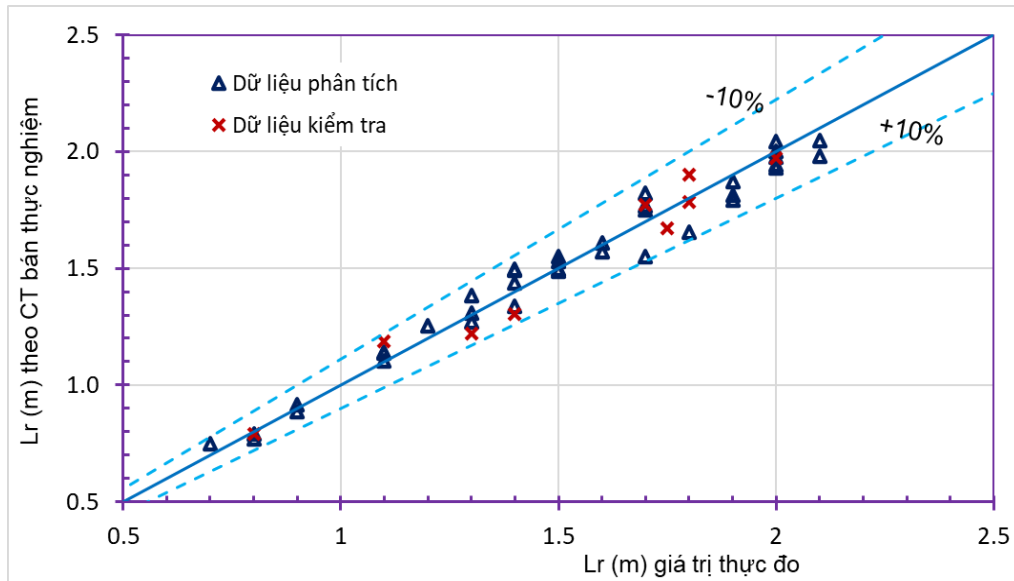
Giá trị thực đo						Giá trị tính toán		
Giá trị	Lr đo (m)	K_{tb}	ΔE	Mn	Ln(Mn)	Lr/y_1 tt	Lr tính	ε
			(m)				(m)	(%)
Max	2.1	6.82	1.475	35267	10.471	38.515	2.047	8.8
Min	0.7	0.52	0.173	1729	7.455	18.300	0.745	0.1

(chi tiết tính toán tại Phụ lục 6.9)

Bảng 3.19 Kiểm tra công thức bán thực nghiệm theo dữ liệu kiểm định

TT	Giá trị thực đo						Giá trị tính toán		
	b (cm)	Lr (m)	K_{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	Ln(Mn)	Lr/y_1	Lr (m)	ε (%)
1	0.55	1.1	2.7476	0.276	2098	7.649	19.074	1.183	7.5
2	0.55	1.8	6.0438	0.900	11950	9.389	29.256	1.902	5.6
3	0.55	1.7	5.3929	0.500	4161	8.333	22.389	1.769	4.0
4	0.335	1.3	1.8521	0.327	2767	7.925	20.306	1.218	6.3
5	0.335	1.8	3.5504	0.464	3487	8.157	21.448	1.780	1.1
6	0.335	0.8	0.9189	0.208	2441	7.800	19.730	0.789	1.4
7	0.335	2	4.0724	0.865	8311	9.025	26.652	1.972	1.4
8	0.2	1.4	1.3463	0.372	3368	8.122	21.270	1.300	7.2
9	0.2	1.75	2.0846	0.426	2893	7.970	20.518	1.666	4.8
Max	0.55	2	6.044	0.900	11950	9.389	29.256	1.972	7.5
Min	0.2	0.8	0.919	0.208	2098	7.649	19.074	0.789	1.1

Từ dữ liệu Bảng 3.18, biểu thị mối quan hệ giữa giá trị tính toán và đo đạc thực nghiệm như Hình 3.10 sau:



Hình 3.10 Chiều dài khu xoáy giữa giá trị thực đo và tính toán theo (3.50)

Nhận xét: Xây dựng công thức (3.50) tính chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo lý thuyết năng lượng, cho thấy giá trị thực đo và giá trị tính toán có độ phù hợp rất cao ($R^2 = 0,98$), trong phân tích công thức thì sai số thực đo và tính toán lớn nhất là 8,8% và trong dữ liệu kiểm định sai số lớn nhất 7,5%. Điều này cho thấy, chiều dài khu xoáy có sự biến đổi mạnh, phụ thuộc vào nhiều yếu tố ảnh hưởng khác nhau.

Công thức bán thực nghiệm (3.50) được xây dựng trên cơ sở phương trình cân bằng năng lượng và thể hiện các quy luật phù hợp với nghiên cứu thực nghiệm.

3.3.2 Xác định công thức thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

Căn cứ vào các phân tích mối quan hệ giữa tỷ lệ chiều dài nước nhảy (L_r/y_1) với các yếu tố ảnh hưởng tại mục 1.5, xem xét các đặc trưng ở công thức bán thực nghiệm về chiều dài khu xoáy (3.50) và sự phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài nước nhảy bằng lý thuyết Pi của Buckingham (2.46) cho kênh hình thang cân mái dốc $m = 1$, đã đề xuất định dạng công thức thực nghiệm dựa trên sự rút gọn của công thức bán thực nghiệm (3.50) như sau:

$$\frac{L_r}{y_1} = \left[a + \left(\frac{e}{y_1} \right)^c \right] \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^d + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^e + f \right] \quad (3.51)$$

với a , c , d , e và f là các hệ số thực nghiệm

Như vậy, với phương pháp đơn giản hóa công thức (3.50), kết hợp các dữ liệu thực đo trên mô hình thí nghiệm (Bảng 2.5) và dữ liệu nghiên cứu của Wanoschek R.

& Hager W. (1989), dữ liệu phân tích bao gồm 46 bộ số liệu, trong đó tách ra 20% (tương đương 9 bộ dữ liệu) dữ liệu để phục vụ kiểm định (chi tiết dữ liệu tại Phụ lục 6.5 và Bảng 3.11). Dữ liệu kiểm tra sẽ đảm bảo đại diện cho 3 mô hình nghiên cứu với kích thước lòng dẫn lần lượt là 0,55cm, 0,335cm và 0,2cm.

Từ các dữ liệu nghiên cứu, sử dụng phần mềm SPSS 26 để xác định được các hệ số thực nghiệm (Phụ lục 1) bằng phương pháp hồi qui và công thức thực nghiệm về chiều dài khu xoáy được thể hiện như sau:

$$\frac{L_r}{y_1} = \left[3,038 - \left(\frac{e}{y_1} \right)^{4,926} \right] \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^{0,94} + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^{0,683} + 0,578 \right] \quad (3.52)$$

Phân tích công thức (3.52), cho thấy thành phần (e/y_1) từ giá trị Max đến Min của (e/y_1) tại Bảng 3.19, có: $(e/y_1)^{4,926} \approx 0$

trong đó: $e \approx 0,5 \times 10^{-3}$ (m) là độ nhám tuyệt đối lòng dẫn kênh có mặt rất nhẵn (mặt kính) [2] và y_1 xác định theo Phụ lục 5.1.

Như vậy, công thức (3.52) rút gọn lại thành:

$$\frac{L_r}{y_1} = 3,038 \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^{0,94} + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^{0,683} + 0,578 \right] \quad (3.53)$$

Công thức (3.53) là công thức xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy trong kênh hình thang cân, có mái dốc $m = 1$ và phạm vi $e/y_1 = 0,0054 \div 0,0125$ hay tương đương với:

$$e/y_1 = 1/200 \div 1/80 \quad (3.54)$$

Áp dụng công thức (3.53) cho các dữ liệu nghiên cứu, cho thấy mức độ sai lệch giữa thực nghiệm và kết quả dự báo như Bảng 3.20 sau:

Bảng 3.20 Kết quả tính toán phân tích dữ liệu chiều dài khu xoáy của nước nhảy

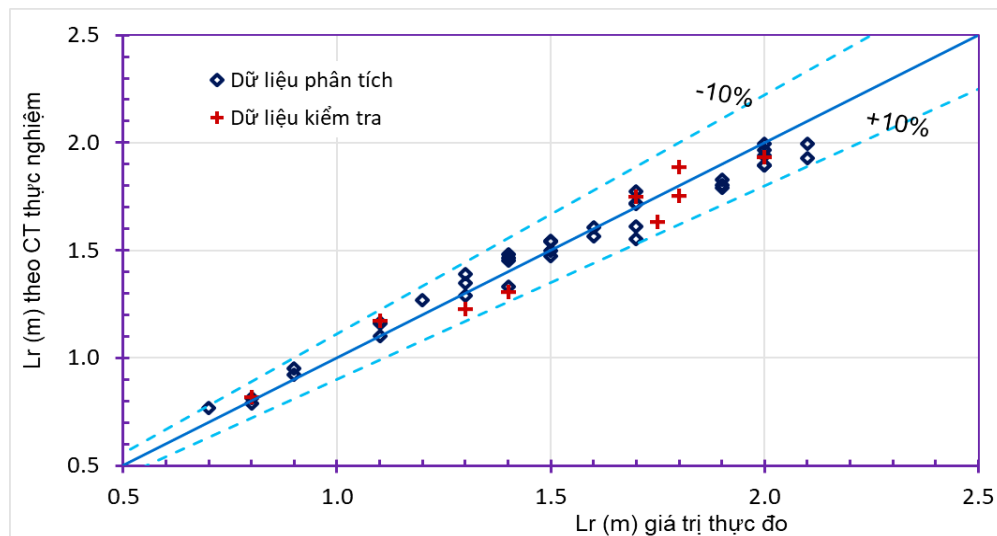
TT	Giá trị thực đo						Giá trị phân tích		
	e/y_1	y_r/y_1	Fr_1	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	L_r/y_1	L_r/y_1	L_r (m)	ε (%)
Max	0.0125	9.396	9.315	0.051	0.507	2.100	38.372	1.996	9.9
Min	0.0054	3.847	3.639	0.010	0.063	0.700	17.931	0.769	0.1

(chi tiết số liệu tại phụ lục 6.10)

Bảng 3.21 Tính toán theo dữ liệu kiểm định cho công thức thực nghiệm

TT	Giá trị thực đo					Giá trị phân tích		
	y_r/y_1	Fr_1	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	L_r/y_1	L_r/y_1	L_r (m)	ε (%)
1	4.258	3.988	0.038	0.215	1.1	18.913	1.173	6.6
2	6.815	6.297	0.040	0.440	1.8	29.032	1.887	4.8
3	5.038	4.595	0.050	0.377	1.7	22.136	1.749	2.9
4	4.567	4.290	0.024	0.167	1.3	20.467	1.228	5.5
5	4.699	4.344	0.035	0.283	1.8	21.142	1.755	2.5
6	4.650	4.257	0.015	0.097	0.8	20.475	0.819	2.4
7	5.865	5.778	0.030	0.334	2	26.103	1.932	3.4
8	4.697	4.453	0.016	0.140	1.4	21.373	1.306	6.7
9	4.335	4.171	0.023	0.194	1.75	20.091	1.631	6.8
Max	6.815	6.297	0.050	0.440	2.000	29.032	1.932	6.8
Min	4.258	3.988	0.015	0.097	0.800	18.913	0.819	2.4

Từ kết quả phân tích dữ liệu xây dựng công thức và kết quả kiểm tra, đánh giá mối quan hệ giữa dữ liệu thực đo vào tính toán theo công thức thực nghiệm như sau:



Hình 3.11 Biểu đồ chiều dài nước nhảy với dữ liệu thực đo và tính toán theo công thức thực nghiệm (3.52)

Kiểm định công thức (3.50) và (3.53) theo các chỉ tiêu phân tích hồi quy đối với toàn bộ dữ liệu kiểm định như sau:

Bảng 3.22 Phân tích các chỉ tiêu đánh giá hồi quy về chiều dài khu xoáy

TT	Công thức	MAE	MSE	RMSE	R ²	MAPE (%)
1	Công thức bán thực nghiệm	0.064	0.005	0.072	0.962	4.365
2	Công thức thực nghiệm	0.070	0.006	0.075	0.959	4.628

Nhận xét: Từ Bảng 3.22, cho thấy khi sử dụng công thức bán thực nghiệm và công thức thực nghiệm cho toàn bộ dữ liệu kiểm tra (09 bộ số liệu), cho thấy cả 2 công thức đều cho các chỉ tiêu đánh giá thống kê về tính toán chiều dài khu xoáy rất tốt, hệ số R^2 rất cao ($R^2 > 0,9$), các chỉ tiêu đánh giá khác đều tiến rất gần không.

Tuy nhiên, xét về mặt giá trị, có thể thấy công thức bán thực nghiệm có hiệu quả tốt hơn công thức thực nghiệm, vì xem xét được nhiều các yếu tố ảnh hưởng đến chiều dài khu xoáy hơn. Cả 2 công thức đều có sai số nhỏ, phù hợp sử dụng để phân tích chiều dài nước nhảy và lựa chọn giá trị bất lợi để thiết kế.

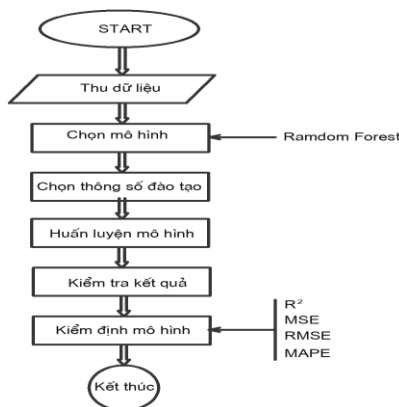
3.4 Xác định đặc trưng hình học nước nhảy bằng mô hình “Rừng ngẫu nhiên”

3.4.1 Xây dựng mô hình Rừng ngẫu nhiên

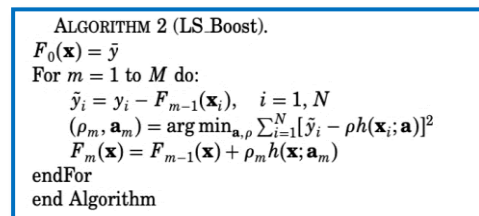
Sử dụng phần mềm Matlab để viết chương trình “Rừng ngẫu nhiên” theo thuật toán Least-Squares Boosting (LS_Boost) của Friedman (2001).

* *Quá trình ước lượng tham số dựa trên hai bước chính:*

- Bước 1: Huấn luyện mô hình Rừng ngẫu nhiên.
- Bước 2: Ước lượng tham số dựa trên mô hình đã huấn luyện.



Hình 3.12 Sơ đồ khối xây dựng mô hình Học máy



Hình 3.13 Cấu trúc thuật toán Least-Squares Boost của Friedman (2001) [20]

* *Một số mã nguồn:*

+ Huấn luyện mô hình:

$$\text{Mdl} = \text{fitrensemble}(\text{Tbl}, \text{ResponseVarName}) \quad (3.55)$$

+ Dự đoán kết quả dựa trên mô hình huấn luyện

$$\text{Results} = \text{predict}(\text{Mdl1}, \text{testdata}) \quad (3.56)$$

Mô hình Rừng ngẫu nhiên được xây dựng trên môi trường Matlab R2020b, máy tính Cài đặt hệ điều hành Windows 10, 8GB RAM, Chip Core i5 2.67 Ghz.

```

1
2
3 Adepth = table2array( Xdepth );
4 Bdepth= table2array( Ydepth);
5 %Mdl2 = fitrensemble(Adepth,Bdepth);
6 Ctest=table2array( XdepthTest );
7 tree = fitctree(Adepth,Bdepth);
8 ketqua_tree=predict(tree,Ctest);
9
10 view(tree,'mode','graph')
11

```

a. Mã lệnh của Cây quyết định

```

3 Yfit = predict(Mdl,X2)
4
5 Adepth = table2array( Xdepth);
6 Bdepth= table2array( Ydepth);
7
8 Mdl2depth = fitrensemble(Adepth,Bdepth);
9 CdepthTest=table2array( XdepthTest);
10
11 YfitdepthTest = predict(Mdl2depth,CdepthTest);
12
13

```

a. Mã lệnh của Rừng ngẫu nhiên

Hình 3.14 Các mã lệnh thực hiện chương trình học máy theo mô hình LS_Boost trong phần mềm Matlab 2020b

3.4.2 Xác định độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

3.4.2.1 Cơ sở dữ liệu trong phân tích độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

Áp dụng phương pháp lý thuyết Pi của Buckingham (Chương 2) đối với hiện tượng nước nhảy trên kênh lắng trụ hình thang cân. Trường dữ liệu thu thập đầu vào dựa vào quan sát các thí nghiệm trên mô hình bao gồm: y_1 , y_r , m , b , Fr_1 và $\sum \xi$. Trong nghiên cứu, coi tổng thất $\sum \xi$ là một thành phần tham số ẩn của mô hình.

Các trường dữ liệu của phương pháp Học máy như sau:

+ Biến mục tiêu: y_r/y_1

+ Biến dữ liệu phân tích: my_1/b , Fr_1 .

Bảng 3.23 Dữ liệu độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy để phân tích học máy

STT	Thông số	Max	Min	Ghi chú
1	y_r/y_1	9.396	3.847	Biến mục tiêu
2	$M_1 = my_1/b$	0.406	0.073	Biến phân tích
3	Fr_1	9.315	3.639	

(Dữ liệu chi tiết tại Phụ lục 6.5)

Dữ liệu kiểm tra sử dụng theo Bảng 3.11 để kiểm nghiệm kết quả dự báo từ mô hình Học máy.

3.4.2.2 Kết quả tính toán độ sâu liên hiệp của nước nhảy theo mô hình Học máy

Dữ liệu phân tích Học máy của độ sâu liên hiệp nước nhảy 46 dữ liệu, gồm 03 mô hình vật lý có kích thước khác nhau. Trong đó tách khoảng 20% dữ liệu để kiểm định kết quả phân tích của mô hình. Như vậy gồm có 9 dữ liệu dùng để kiểm định độ chính xác của mô hình (Bảng 3.11).

Các bước tính toán độ sâu liên hiệp nước nhảy:

Bước 1. Nhập dữ liệu biến phân tích, ký hiệu Xdepth

Tạo dữ liệu biến phân tích trong mô hình là Adepth (Hình 3.15)

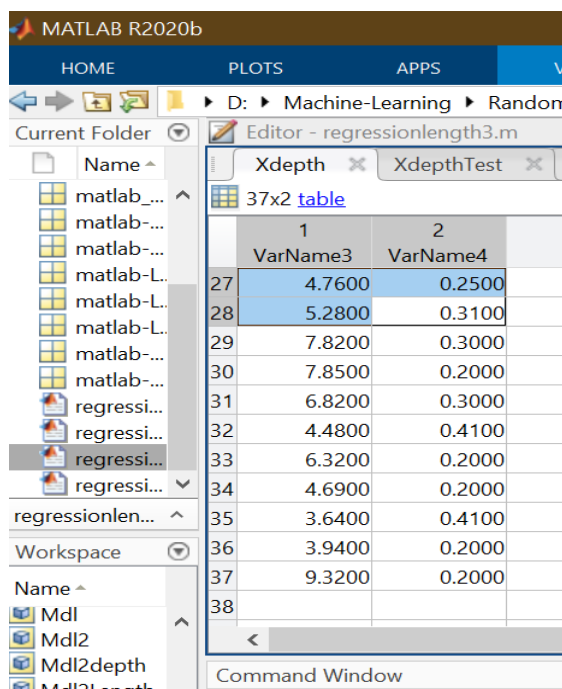
Bước 2. Nhập dữ liệu biến mục tiêu, ký hiệu Ydepth

Tạo dữ liệu biến mục tiêu trong mô hình là Bdepth (Hình 3.16)

Bước 3. Huấn luyện mô hình, ký hiệu Mdl2depth (Hình 3.17)

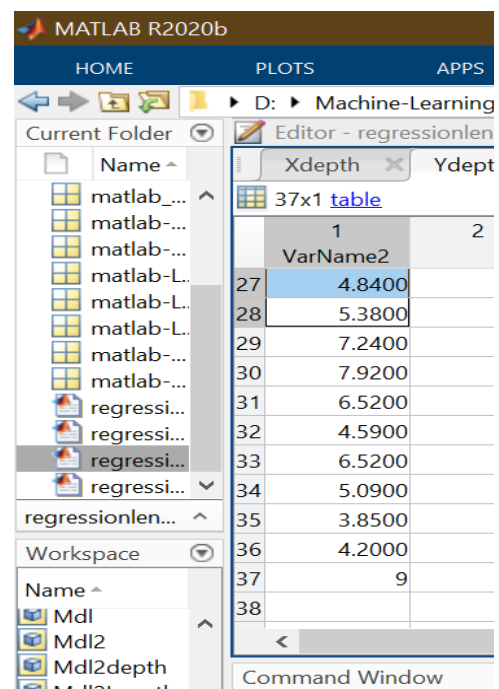
Bước 4. Nhập dữ liệu kiểm định mô hình với biến mục tiêu được ký hiệu là XdepthTest (Hình 3.18).

Bước 5. Phân tích dữ liệu độ sâu liên hiệp nước nhảy, cho kết quả theo dữ liệu YfitdepthTest (Hình 3.21) đối với mô hình Rừng ngẫu nhiên.



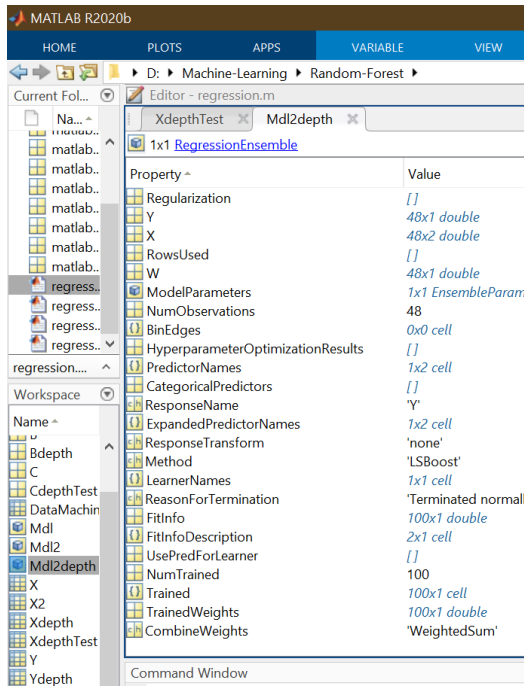
	1	2
	VarName3	VarName4
27	4.7600	0.2500
28	5.2800	0.3100
29	7.8200	0.3000
30	7.8500	0.2000
31	6.8200	0.3000
32	4.4800	0.4100
33	6.3200	0.2000
34	4.6900	0.2000
35	3.6400	0.4100
36	3.9400	0.2000
37	9.3200	0.2000
38		

Hình 3.15 Dữ liệu phân tích Học máy

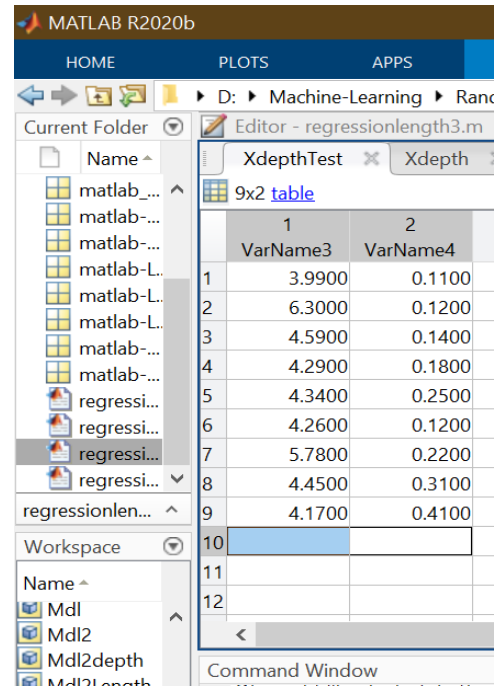


	1	2
	VarName2	
27	4.8400	
28	5.3800	
29	7.2400	
30	7.9200	
31	6.5200	
32	4.5900	
33	6.5200	
34	5.0900	
35	3.8500	
36	4.2000	
37	9	
38		

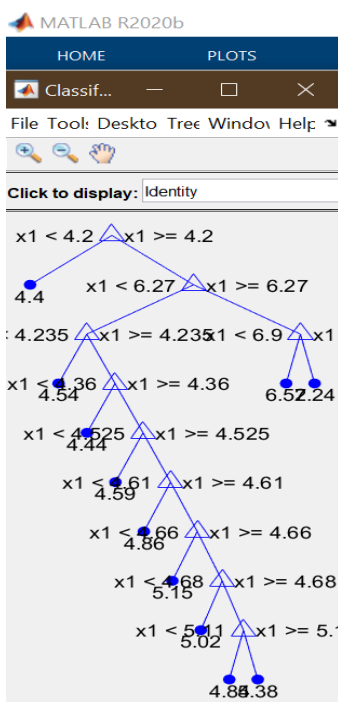
Hình 3.16 Biến mục tiêu trong Học máy



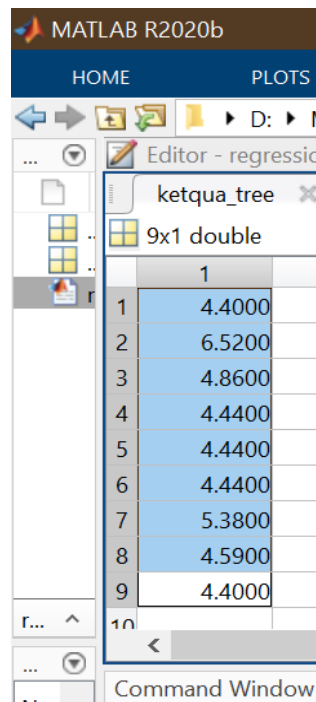
Hình 3.17 Các tham số đào tạo trong mô hình Học máy



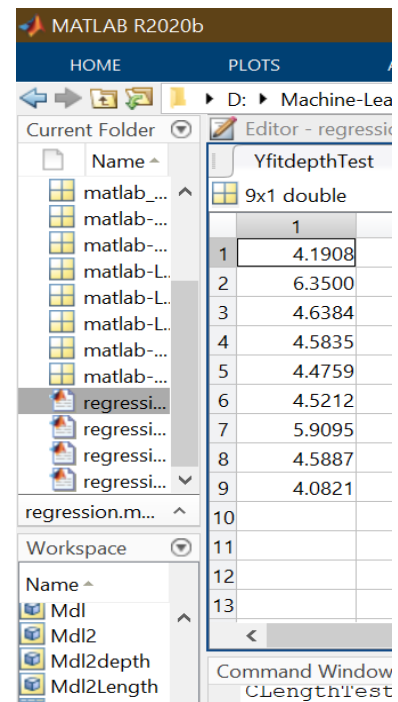
Hình 3.18 Dữ liệu kiểm định dự báo của mô hình



Hình 3.19 Sơ đồ “Cây quyết định” khi phân tích độ sâu sau khu xoáy



Hình 3.20 Kết quả tính toán theo mô hình “Cây quyết định”



Hình 3.21 Kết quả dự báo của mô hình học máy “Rừng ngẫu nhiên”

Kết quả phân tích theo “Cây quyết định” thể hiện trong Hình 3.20, kết quả phân tích “Rừng ngẫu nhiên” thể hiện trong Hình 3.21 và sơ đồ “Cây quyết định” thể hiện theo Hình 3.19.

Kết quả phân tích theo 2 mô hình Học máy là “Cây quyết định” vào “Rừng ngẫu nhiên” được đánh giá trong Bảng 3.24.

Bảng 3.24 Kết quả phân tích độ sâu liên hiệp nước nhảy từ mô hình học máy

TT	Dữ liệu thực đo			Giá trị dự báo			
	Fr ₁	M ₁	y _r /y ₁	MH Cây quyết định		MH Rừng ngẫu nhiên	
				y _r /y ₁	ε (%)	y _r /y ₁	ε (%)
1	3.99	0.11	4.26	4.400	3.3	4.191	1.6
2	6.30	0.12	6.82	6.520	4.3	6.350	6.8
3	4.59	0.14	5.04	4.860	3.5	4.638	7.9
4	4.29	0.18	4.57	4.440	2.8	4.584	0.4
5	4.34	0.25	4.70	4.440	5.5	4.476	4.7
6	4.26	0.12	4.65	4.440	4.5	4.521	2.8
7	5.78	0.22	5.86	5.380	8.3	5.909	0.8
8	4.45	0.31	4.70	4.590	2.3	4.589	2.3
9	4.17	0.41	4.33	4.400	1.5	4.082	5.8
Max	6.30	0.41	6.82	6.52	8.3	6.35	7.9
Min	3.99	0.11	4.26	4.4	1.5	4.19	0.4

Từ *Bảng 3.24* cho thấy, sai số kiểm định lớn nhất giữa thực đo và tính toán của mô hình “Rừng ngẫu nhiên” (7,9%) tốt hơn so với mô hình “Cây quyết định” (8,3%), điều này cho thấy mô hình “Rừng ngẫu nhiên” có hiệu quả trong việc phân tích chuỗi dữ liệu.

Sai số tính toán dữ liệu kiểm định cho thấy sai số lớn nhất khoảng 7,9%, giá trị này cao hơn so với sai số tính toán theo lý thuyết (5,4%) và công thức thực nghiệm (6,8%). Tuy nhiên, đây là nghiên cứu trong phạm vi nhỏ, các dữ liệu có xu thế hội tụ tốt. Phương pháp này vẫn còn phải bổ sung nhiều dữ liệu hơn nữa, để có ứng dụng rộng rãi, và có kết quả phân tích tốt hơn.

Như vậy, phương pháp tính toán theo mô hình học máy “Rừng ngẫu nhiên” với thuật toán LS_Boost của Breiman, L (2001) đã cho thấy hiệu quả tốt trong phân tích độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy.

3.4.3 Xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy

3.4.3.1 Cơ sở dữ liệu trong phân tích chiều dài khu xoáy

Áp dụng phương pháp định lý Pi của Buckingham đối với hiện tượng nước nhảy trên kênh lắng trụ hình thang cân (Chương 2). Trường dữ liệu thu thập đầu vào dựa vào quan sát các thí nghiệm trên mô hình vật lý bao gồm: L_r, y₁, y_r, m, b, Fr₁.

Trong đó các dữ liệu (b, m) cố định theo từng mô hình thí nghiệm, thể hiện trong thông số M_1 .

Nghiên cứu được thực hiện trong trường hợp cố định về giá trị (m), sự biến đổi của (m) ảnh hưởng đến các yếu tố chiều dài nước nhảy thì sẽ được nghiên cứu tiếp theo. Áp dụng phương pháp Học máy với dữ liệu phân tích tại Bảng 3.11 (chi tiết Phụ lục 6.5) và kiểm định dữ liệu tại Bảng 3.11

Trường dữ liệu đầu vào như sau:

+ Biến mục tiêu: $\frac{L_r}{y_1}$

+ Biến dữ liệu phân tích: $\frac{y_r}{y_1}, M_1, Fr_1$

Bảng 3.25 Dữ liệu chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo mô hình học máy

STT	Thông số	Max	Min	Ghi chú
1	L_r/y_1	39.583	17.263	Biến mục tiêu
2	M_1	0.406	0.073	Biến ảnh hưởng
3	Fr_1	9.32	3.64	
4	y_r/y_1	9.396	3.847	

(Dữ liệu thể hiện tại phụ lục 6.5)

Dữ liệu kiểm tra sử dụng dữ liệu tại Bảng 3.11 để kiểm định kết quả phân tích chiều dài khu xoáy của nước nhảy từ mô hình học máy.

3.4.3.2 Xác định chiều khu xoáy của nước nhảy theo mô hình Học máy

Sử dụng 46 dữ liệu để phân tích chiều dài nước nhảy, với đặc trưng về biến ảnh hưởng và biến mục tiêu, trong đó tách ra 9 bộ dữ liệu (20% dữ liệu, bao gồm 3 mô hình lòng dẫn) để kiểm tra kết quả tính toán của mô hình học máy.

Các bước tính toán và phân tích tương tự như tính toán cho độ sâu liên hiệp nước nhảy, kết quả phân tích dự báo của mô hình như sau:

a. Biến ảnh hưởng

b. Biến mục tiêu

Hình 3.22 Dữ liệu phân tích mô hình Học máy cho chiều dài khu xoay

a. Biến mục tiêu (kiểm tra)

b. Kết quả kiểm tra

Hình 3.23 Kết quả phân tích mô hình Học máy cho chiều dài khu xoay

Bảng 3.26 Bảng dữ liệu kiểm tra của kết quả chạy mô hình về chiều dài khu xoay

TT	Dữ liệu thực đo				Giá trị dự báo	
	L _r /y ₁	Fr ₁	M ₁	y _r /y ₁	L _r /y ₁	ε (%)
1	17.74	3.99	0.11	4.26	16.945	4.5
2	27.69	6.30	0.12	6.82	26.182	5.5

TT	Dữ liệu thực đo				Giá trị dự báo	
	L_r/y_1	Fr_1	M_1	y_r/y_1	L_r/y_1	ε (%)
3	21.52	4.59	0.14	5.04	20.690	3.9
4	21.67	4.29	0.18	4.57	21.429	1.1
5	21.69	4.34	0.25	4.70	21.662	0.1
6	20.00	4.26	0.12	4.65	20.474	2.4
7	27.03	5.78	0.22	5.86	28.078	3.9
8	22.09	4.45	0.31	4.70	20.541	7.0
9	21.55	4.17	0.41	4.33	20.809	3.4
Max	27.69	6.30	0.41	6.82	28.08	7.03
Min	17.74	3.99	0.11	4.26	16.94	0.11

Phân tích cơ sở dữ liệu thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy, với 3 tham số cơ bản (M_1 , y_r/y_1 và Fr_1) đã cho thấy: Kết quả dự báo với dữ liệu thực đo của các mô hình vật lý có sai số lớn nhất 7,0% (Bảng 3.26), hiệu quả dự báo của mô hình tốt hơn các phương pháp khác (sai số lớn nhất của công thức bán thực nghiệm và thực nghiệm về chiều dài nước nhảy lần lượt là 8,0% và 7,5%).

Bảng 3.27 Phân tích các chỉ tiêu đánh giá hồi quy về độ sâu sau khu xoáy và chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo mô hình “Học máy”

TT	Công thức	MAE	MSE	RMSE	R^2	MAPE (%)
1	Độ sâu sau khu xoáy	0.190	0.058	0.242	0.905	3.681
2	Chiều dài khu xoáy	0.802	0.884	0.940	0.900	3.527

Phân tích đánh giá chỉ tiêu thống kê đối với dữ liệu kiểm tra tính theo mô hình học máy, cho thấy $R^2 \approx 0,9$ (tương quan mạnh), các chỉ số thống kê khác cũng gần 0, đảm bảo kết quả tính toán hiệu quả tốt trong dự báo.

Như vậy, ứng dụng mô hình học máy vào nghiên cứu xác định chiều khu xoáy của dài nước nhảy trên kênh hình thang cho kết quả tốt.

3.5 Quy trình tính toán xác định các đặc trưng nước nhảy trong thiết kế công trình tiêu năng

3.5.1 Cơ sở xác định các kích thước hình học của nước nhảy

Căn cứ vào các công thức đề xuất, các kết quả nghiên cứu thì độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy được đề xuất theo các công thức ở Bảng 3.28 sau:

Bảng 3.28 Công thức tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

TT	Ký hiệu	Công thức	Loại công thức
1	Es1.1	+ Sử dụng công thức (3.36) khi $M_1 \geq 0,2$ với $k = 0,92$ cho kênh hình thang cân, mái dốc $m = 1$, có $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.	Lý thuyết
2	Es1.2	+ Tra tại Bảng 3.9 hoặc Hình 3.5 với mọi giá trị M_1 khác nhau cho nước nhảy trong kênh hình thang cân, mái dốc $m = 1$, có $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.	Bán thực nghiệm
3	Es2	$\frac{y_r}{y_1} = 0,959M_1^{-0,12}Fr_1^{0,936}$ Với trong kênh hình thang cân, mái dốc $m = 1$, có $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.	Thực nghiệm

Trong tính toán thực tế, sẽ áp dụng các phương án tính toán trên, để từ đó lựa chọn giá trị độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy cho phù hợp, ưu tiên lựa chọn các giá trị tính toán theo lý thuyết và có sự bất lợi.

Căn cứ vào công thức thực nghiệm đã xây dựng, dựa trên các phân tích và đánh giá xác định chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy, từ đó chọn giá trị tính chiều dài phù hợp khi thiết kế công trình.

Bảng 3.29 Các công thức tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy

TT	Công thức	Ghi chú
1	$\frac{L_r}{y_1} = 0,9576[\ln(Mn)]^2 - 10,462 \ln(Mn) + 43,072$ Với Mn được xác định theo công thức (3.48) hoặc (3.49), kênh hình thang cân, mái dốc $m = 1$, có $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.	Bán thực nghiệm
2	$\frac{L_r}{y_1} = 3,083 \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^{0,94} + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^{0,683} + 0,578 \right]$ Với điều kiện (3.54), kênh hình thang cân, mái dốc $m = 1$, có $Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$.	Thực nghiệm

Trong tính toán thực tế sẽ căn cứ vào giá trị tính toán của 2 công thức trên để lựa chọn xác định giá trị chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy cho phù hợp

trong thiết kế công trình. Ưu tiên lựa chọn kết quả tính toán theo công thức bán thực nghiệm và có giá trị bất lợi.

3.5.2 Các bước tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy

Xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy trên kênh có mặt cắt ngang hình thang cân ($m = 1$) và đáy bằng, được thực hiện theo các bước như sau:

- + Xác định tần suất thiết kế của công trình, nhằm mục đích xác định cấp công trình, quy mô công trình và các thông số cơ bản của công trình;
- + Xác định lưu lượng dòng chảy ứng với tần suất thiết kế;
- + Xác định các thông số thiết kế của công trình thủy lợi, như chiều cao đập, chiều rộng đập, cao trình đáy, chiều rộng kênh tiêu năng ...
- + Tính độ sâu dòng chảy co hẹp ở chân đập ứng với tần suất thiết kế công trình, và lấy giá trị độ sâu trước nước nhảy bằng giá trị độ sâu co hẹp để tính toán các đặc trưng hình học trong thiết kế công trình tiêu năng ($h_c = y_1$).
- + Tính độ sâu liên hiệp nước nhảy theo phương pháp tại Bảng 3.28.
- + So sánh các giá trị độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy tính từ công thức lý thuyết và thực nghiệm, từ đó phân tích xác định giá trị phù hợp.

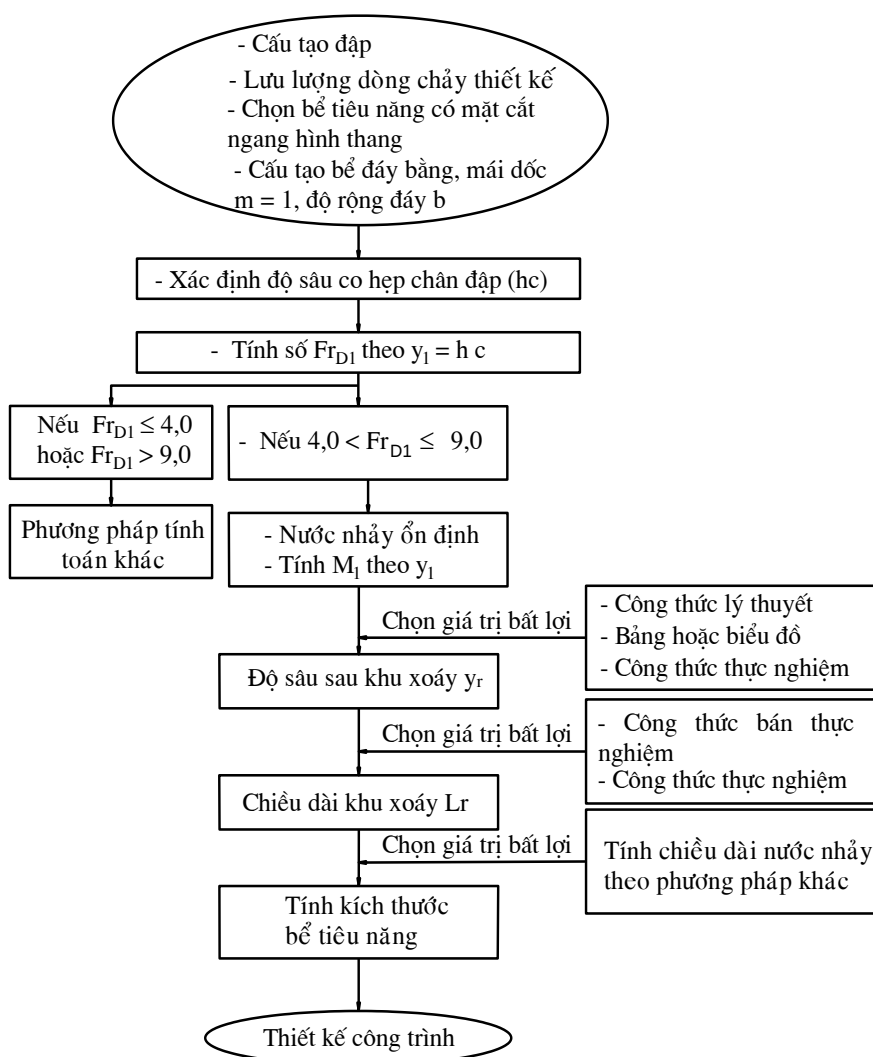
3.5.3 Các bước tính chiều dài khu xoáy của nước nhảy

Để xác chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy phù hợp cho công trình tiêu năng sau đập tràn, ta thực hiện theo các bước sau:

- + Xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy (Mục 3.5.2).
- + Dựa vào các công thức tại Bảng 3.29, tính được giá trị chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy.
- + So sánh các kết quả tính toán và lựa chọn giá trị chiều dài khu xoáy phù hợp.

3.5.4 Quy trình xác định các đặc trưng thủy lực cho công trình áp dụng nước nhảy

Kết hợp các phân tích, nghiên cứu và các bước tính toán đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh có mặt cắt ngang hình thang cân có mái dốc $m = 1$. Quy trình xác định đặc trưng hình học của nước nhảy như sau:



Hình 3.24 Quy trình xác định đặc trưng hình học của nước nhảy ổn định

3.6 Ứng dụng các công thức đề xuất tính toán nước nhảy sau đập tràn của hồ chứa Nà Sản – Sơn La

3.6.1 Các thông số cơ bản của công trình

Từ hồ sơ thiết kế cơ bản về công trình Hồ Nà Sản, xác định được các thông số cơ bản của đập tràn trong tính toán tiêu năng.

Bảng 3.30 Thông số đập tràn hồ chứa Chiềng Dong

TT	Đập tràn có cửa van	Mặt cắt thực dụng Ôphixêrôp tiêu năng đáy	
1	Hình thức đập	Đập bê tông trọng lực	
2	Cao trình đỉnh đập	m	+762,0
3	Chiều cao đập lớn nhất	m	34,0

TT	Đập tràn có cửa van	Mặt cắt thực dụng Ôphixêrôp tiêu năng đáy	
4	Số khoang tràn	khoang	2,0
5	Bề rộng tràn nxB	m	2x7
6	Lưu lượng xả lũ thiết kế Q _{tk} (P =1,0%)	m ³ /s	426,3
7	Cột nước xả lũ thiết kế	m	6,2
8	Lưu lượng xả lũ kiểm tra Q _{kt} (P =0,2%)	m ³ /s	510,83
9	Cột nước xả lũ kiểm tra	m	7,12
10	Chiều cao đập lớn nhất	m	41,0

3.6.2 Xác định các thông số thiết kế công trình tiêu năng

Căn cứ tài liệu thiết kế công trình, các thông số cơ bản đầu vào như sau:

Bảng 3.31 Bảng các thông số cơ bản để tính tiêu năng sau đập tràn

STT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
1	Lưu lượng thiết kế (1%)	Q	m ³ /s	426,3	
2	Độ sâu co hẹp chân đập	h _c	m	0,84	
3	Kênh tiêu năng		Mặt cắt ngang hình thang cân		
4	Hệ số mái dốc	m		1	
5	Chiều rộng đáy kênh	b	m	20,5	
6	Kết cấu				Bê tông
7	Hệ số nhám Manning (Bề mặt không nhẵn[2] [60])	n		0,018	Bê tông
8	Độ nhám tuyệt đối [2]	e	mm	5	Bê tông

3.6.3 Tính toán thông số hình học của nước nhảy trong công trình tiêu năng sau đập tràn Nà Sản

3.6.3.1 Tính độ sâu sau nước nhảy

Tính nước nhảy sau đập tại chân đập tràn, độ sâu dòng chảy co hẹp tại chân đập là độ sâu trước nước nhảy: $h_c = y_1$

Các thông số cơ bản tại chân đập được xác định theo bảng sau:

Bảng 3.32 Các thông số thủy lực của dòng chảy trước nước nhảy

Q (m ³ /s)	b (m)	m	y ₁ (m)	A ₁ (m ²)	M ₁	Fr ₁	Fr _{D1}
426.3	20.5	1	0.84	17.926	0.041	8.29	8.45

Với giá trị $Fr_{D1} = 8,45$ như vậy nước nhảy sau đập trên kênh lắng trụ hình thang cân đáy bằng là nước nhảy hoàn chỉnh (nước nhảy ổn định).

Sử dụng các phương pháp tính độ sâu sau nước nhảy bằng phương pháp liệt kê tại Bảng 3.27. Do $M_1 = 0,041 < 0,2$ nên khi tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy sẽ tra Bảng 3.9. Kết quả tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy theo các phương án như Bảng 3.33 sau:

Bảng 3.33 Các giá trị độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

Q	b	y ₁	Phương pháp lý thuyết		Công thức thực nghiệm		Ứng dụng mô hình Học Máy	
(m ³ /s)	(m)	(m)	(y _r /y ₁)	y _r (m)	(y _r /y ₁)	y _r (m)	(y _r /y ₁)	y _r (m)
426.3	20.5	0.84	10.18	8.55	10.18	8.55	9.4	7.9

Trong 03 phương án tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, công thức thực nghiệm và phương pháp lý thuyết có kết quả tính toán tương đương nhau, phương pháp lý thuyết cho kết quả tính toán lớn nhất. Mô hình học máy có kết quả sai lệch lớn (7,7%) so với phương pháp lý thuyết, điều này do dữ liệu Học máy đầu vào đáp ứng công trình lớn còn hạn chế.

Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy là: $y_r = 8,55$ (m)

3.6.3.2 Tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy

Từ các giá trị độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy đã tính ở trên, áp dụng các phương pháp nghiên cứu, công thức để xác chiều dài dòng chảy khu xoáy, kết quả các trường hợp nghiên cứu, tính toán được thể hiện tại Bảng 3.34 như sau:

Bảng 3.34 Tính chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy

Q	y ₁	Fr ₁	Chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy (m)						
			Công thức bán thực nghiệm			Công thức thực nghiệm		Phương pháp Học máy	
			Ln(Mn)	L _r /y ₁	L _r (m)	L _r /y ₁	L _r (m)	L _r /y ₁	L _r (m)
(m ³ /s)	(m)								
426.3	0.84	8.29	10.35	39.21	32.9	39.78	33.42	39.52	33.2

Kết quả tính toán theo các công thức bán thực nghiệm, công thức thực nghiệm và mô hình Học máy (Kết quả tính toán trình bày ở phụ lục 4) tương đương nhau. Nhưng kết quả tính toán của công thức bán thực nghiệm có giá trị lớn nhất.

Bên cạnh đó lại có: $e/y_1 = 5 / (1000 \times 0,84) = 0,006$, tỷ lệ này thỏa mãn điều kiện (3.54) để áp dụng công thức thực nghiệm (3.53). Nên chiều dài nước nhảy được xác định để thiết kế công trình sẽ lấy kết quả theo công thức bán thực nghiệm (giá trị tính toán bất lợi nhất cho công trình).

Chiều dài tính toán dòng chảy khu xoáy: $L_r \approx 34(m)$

So sánh với kết quả tính toán các trường hợp khác cho công trình Nhà Sản - Sơn La như sau:

Bảng 3.35 Các trường tính toán chiều dài khu xoáy của nước nhảy khác

Q	y_1	Chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy (m)							
		Thí nghiệm của Đ.T.H Huệ [7]		Trường hợp kênh chữ nhật			Trường hợp kênh hình thang		
(m ³ /s)	(m)	y_2 (m)	L_n (m)	Fr_1	y_2 (m)	αL_j (m)	Fr_1	y_r (m)	L_r (m)
426.3	0.84	8.4	39	8.29	9.44	37.7	8.29	8.55	34.0

Ghi chú: Đối với kênh chữ nhật được giữ nguyên chiều rộng đáy kênh và y_2 được tính theo công thức (1.20) và chiều dài nước nhảy cho thiết kế được tính theo công thức phổ biến như sau:

$$L_j = 5.y_2 (m) \quad (4.1)$$

với $\alpha \approx 0,8$ là hệ số xác định khoảng cách chiều dài bể tiêu năng

Chiều dài khu xoáy của nước nhảy để thiết kế công trình công trình tiêu năng ở hạ lưu đập tràn được chọn: $L_r = 34,0m$.

Như vậy, chiều dài khu xoáy của nước nhảy của công trình có thể giảm bớt, nếu bố trí các móng nhám lớn để hỗ trợ tiêu năng, đặc biệt bố trí dạng móng nhám ở đầu và cuối công trình tiêu năng như các công trình thường được thiết kế hiện nay, điều này sẽ làm giảm chi phí đầu tư công trình và đảm bảo an toàn hơn cho hạ lưu.

3.6.3.3 Tiêu năng của công trình

Nước nhảy sau đập có hiệu quả tiêu năng, làm cho dòng chảy ổn định và an toàn hơn hạ lưu đập, với giá trị $Fr_{D1} = 8,45$ thì nước nhảy ở chân đập tràn thuộc loại

nước nhảy ổn định (Bảng 1.1). Năng lượng tiêu năng bằng nước nhảy trên kênh hình thang cân (mái dốc $m = 1$) được xác định như Bảng 3.36 sau:

Bảng 3.36 Bảng tính tiêu năng cho nước nhảy sau đập

Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	Fr _{D1}	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	E ₁ (m)	E ₂ (m)	ΔE% (%)
426.3	0.84	8.55	8.45	23.782	1.701	29.666	8.707	70.6

Nước nhảy ổn định sau đập có hiệu suất tiêu năng khá lớn đạt tới 70,6%, điều này đảm bảo hạ lưu công trình ổn định. Mức tiêu hao năng lượng này nằm trong phân loại dành cho nước nhảy mạnh Bảng 1.1.

3.7 Kết luận Chương III

Từ cơ sở lý thuyết và dữ liệu thực nghiệm, các nội dung nghiên cứu cơ bản đạt được như sau:

① Từ phương vi phân cơ bản Navier-Stokes đã tiến hành tích phân và ứng dụng cho kênh hình thang, từ đó xây dựng được công thức lý thuyết (3.36) về xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy.

② Kết hợp với dữ liệu thực nghiệm, đã xác định được hệ số tỷ lệ động năng khu xoáy ($k = 0,92$), giúp cho công thức lý thuyết (3.36) cho kết quả tốt hơn. Đồng thời đề xuất phương pháp xử lý các vấn đề không phù hợp của công thức lý thuyết bằng Bảng 3.9 hoặc Hình 3.5.

③ Căn cứ vào phương trình cân bằng năng lượng và dữ liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý, đã xây dựng được công thức bán thực nghiệm (3.50) về xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy.

④ Dựa trên dữ liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý nước nhảy ổn định trên kênh hình thang cân, đáy bằng có mái dốc $m = 1$, đã xây dựng được công thức thực nghiệm về xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy (3.39) và công thức xác định chiều dài khu xoáy (3.53) với điều kiện áp dụng theo (3.54).

⑤ Áp dụng các công thức đã đề xuất, tính toán thiết kế công trình tiêu năng cho đập tràn ở hệ thống công trình thủy lợi Nà Sản – Sơn La với lưu lượng thiết kế $Q_{TK} = 426,3 \text{ m}^3/\text{s}$, chiều cao đập 34m, sử dụng kênh tiêu năng sau đập tràn là kênh có mặt cắt ngang hình thang cân, hệ số mái dốc $m = 1$, chiều rộng đáy lòng dẫn tiêu năng

$b = 20,5\text{m}$, đã tính toán được độ sâu dòng chảy sau khu xoáy $y_r = 8,55\text{m}$ và phạm vi chiều dài khu xoáy của nước nhảy là $L_r = 34,0\text{m}$.

⑥ Kết quả tính toán công trình tiêu năng của hệ thống công trình thủy lợi Nà Sản – Sơn La là nước nhảy ổn định (với $Fr_{D1} = 8,45$), nhưng hiệu quả tiêu năng rất cao (70,6%) nằm trong phạm vi tiêu năng của nước nhảy mạnh ($Fr_{D1} > 9$) theo tiêu chuẩn phân loại về hiệu quả tiêu năng của các loại nước nhảy Bảng 1.1.

⑦ Xây dựng mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên” trên phần mềm Matlab 2020b, ứng dụng mô hình đó vào phân tích độ sâu dòng chảy sau khu xoáy và chiều dài khu xoáy của nước nhảy, đồng thời áp dụng phân tích cho công trình tiêu năng hồ Nà Sản - Sơn La, kết quả tính toán tương đương với các phương pháp khác. Điều này minh chứng hiệu quả ứng dụng mô hình Học máy vào nghiên cứu nước nhảy.

⑧ Mô hình học máy là một phương pháp phân tích hiện đại được sử dụng trong nhiều lĩnh vực, bước đầu áp dụng cho nghiên cứu nước nhảy trong phạm vi nhỏ đã thể hiện được hiệu quả của phương pháp tính. Điều này, cho thấy Học máy là phương pháp phù hợp cho nghiên cứu và phát triển lâu dài đối với các bài toán thủy lực công trình.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Các kết quả đạt được của luận án

+ Đã phân tích, xây dựng được mối quan hệ định tính giữa các đặc trưng hình học nước nhảy trong kênh lắng trụ với các yếu tố ảnh hưởng trong phạm vi nghiên cứu.

+ Ứng dụng các lý thuyết tương tự, lý thuyết phân tích thứ nguyên, lý thuyết Π của Buckingham để xây dựng định lượng phương trình nghiên cứu các đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình thang, xác định được các yếu tố cần thu thập trên mô hình thí nghiệm vật lý.

+ Đã giải hệ phương trình Navier-Stokes, xác định được công thức lý thuyết (3.36) về tính độ sâu sau khu xoáy (y_r) và công thức (3.27) về xác định tỷ lệ hệ số động lượng của nước nhảy (k) đối với nước nhảy trong kênh lắng trụ.

+ Nghiên cứu thực nghiệm cho nước nhảy trong kênh hình thang cân, đáy bằng, mái dốc $m = 1$: Xác định được giá trị tỷ lệ hệ số động lượng khu xoáy của nước nhảy $k = 0,92$. Với độ sâu sau khu xoáy, nếu hệ số $M_1 \geq 0,2$ thì áp dụng công thức tổng quát (3.36) hoặc Bảng 3.9 hoặc Hình 3.5, nếu $M_1 < 0,2$ thì sử dụng Bảng 3.9 hoặc biểu đồ Hình 3.5 (chương trình tính độ sâu dòng chảy sau khu xoáy được xây dựng trên nền của Excel tại Phụ lục 3).

+ Xây dựng được công thức bán thực nghiệm (3.50) về xác định chiều dài khu xoáy của nước nhảy ổn định trong kênh lắng trụ mặt cắt ngang hình thang cân, đáy bằng có mái dốc kênh $m = 1$.

Kết quả kiểm nghiệm công thức (3.50), cho thấy các chỉ tiêu đánh giá hồi quy rất mạnh và thể hiện sự chính xác của công thức đề xuất (có $R^2 = 0,96$ và sai số trung bình tuyệt đối $MAPE = 4,4\%$).

+ Nghiên cứu đã xây dựng 02 công thức thực nghiệm mới về tính độ sâu sau khu xoáy (3.39) và chiều dài khu xoáy (3.53) của nước nhảy trong kênh hình thang cân đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

Kết hợp các công thức thực nghiệm với các công thức lý thuyết và bán thực nghiệm để có cơ sở so sánh lựa chọn các thông số trong thiết kế công trình có ứng dụng nước nhảy.

+ Các kết quả nghiên cứu bước đầu của mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên”, đã cho kết quả tương đương với các phương pháp nghiên cứu khác, điều này thể hiện khả năng áp dụng của mô hình “Học máy” trong nghiên cứu.

Nhưng hạn chế của phương pháp là sẽ xuất hiện sai số lớn nếu giá trị dự báo nằm ngoài phạm vi chuỗi dữ liệu nghiên cứu.

Đây mới chỉ là nghiên cứu bước đầu trong ứng dụng công nghệ “Trí tuệ nhân tạo” vào nước nhảy trong kênh hình thang, còn cần nhiều nghiên cứu mới và bổ sung cơ sở dữ liệu phong phú hơn để có thể đáp ứng được nhu cầu sản xuất trong thực tế.

+ Xây dựng quy trình sử dụng các công thức để xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy trên kênh hình thang, và áp dụng quy trình với các công thức mới đề xuất vào tính toán các thông số hình học của nước nhảy trong thiết kế công trình tiêu năng sau đập tràn.

Các công thức đề xuất đảm bảo tính chính xác và khoa học đối với phân tích công trình tiêu năng của dòng chảy sau công trình trong kênh hình thang cân, đáy bằng và mái dốc $m = 1$.

2. Kiến nghị về các đóng góp của luận án

+ Sử dụng các Bảng 3.9, Hình 3.5, công thức lý thuyết (3.36) và công thức thực nghiệm (3.39) để xác định độ sâu dòng chảy sau khu xoáy của nước nhảy, từ đó xác định được các kích thước hình học của công trình tiêu năng (đáy bằng, mặt cắt ngang hình thang) bằng nước nhảy ổn định ($Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$) sau đập tràn.

+ Sử dụng hệ số tỷ lệ động lượng dòng chảy khu xoáy $k = 0,92$ cho kênh hình thang, đáy bằng có mái dốc $m = 1$.

+ Sử dụng công thức bán thực nghiệm (3.50) và công thức thực nghiệm (3.53) để tính chiều dài khu xoáy của nước nhảy ổn định ($Fr_{D1} = 4,0 \div 9,0$) trong kênh hình thang cân đáy bằng, mái dốc $m = 1$, từ đó phân tích lựa chọn chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy phù hợp đối với công trình thực tế.

+ Áp dụng công nghệ của lĩnh vực “Trí tuệ nhân tạo”, “Học Máy”, “Học sâu” vào nghiên cứu nước nhảy, cần có sự chia sẻ dữ liệu nghiên cứu của các nhà khoa học để đảm bảo dữ liệu đầy đủ và tránh được các sai số chủ quan.

3. Tồn tại và hạn chế

+ Nghiên cứu mới chỉ được tiến hành trên một kiểu mô hình vật lý có hệ số mái dốc $m = 1$ và đáy bằng, nên các kết quả tính toán về giá trị tỷ lệ hệ số động lượng khu xoáy k vẫn còn những giới hạn.

+ Nghiên cứu mới chỉ giải quyết vấn đề ban đầu về đặc trưng hình học của nước nhảy, nên các chỉ dẫn và quy trình về xác định kích thước công trình thực tế mới chỉ bước định hướng ban đầu, chưa hình thành hoàn chỉnh toàn bộ quá trình tính toán và thiết kế kỹ thuật cho công trình trong thực tế.

+ Cơ sở dữ liệu nghiên cứu về mô hình Học máy ‘Rừng ngẫu nhiên’ có dữ liệu chưa đủ lớn, chưa bao trùm hết các trường hợp nghiên cứu của nước nhảy, nên phạm vi áp dụng còn hạn chế, trong luận án mới chỉ đánh dấu là một phương pháp nghiên cứu mới và phù hợp trong dự báo các đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh hình thang.

4. Định hướng nghiên cứu tiếp theo

+ Nghiên cứu tiếp theo sẽ tăng cường nhiều hơn cho các dạng mô hình vật lý hình thang cân với chiều rộng đáy, hệ số mái dốc kênh khác nhau. Để xác định hệ số k và các công thức phù hợp cho mọi loại kênh hình thang cân.

+ Nghiên cứu các mối quan hệ giữa độ sâu sau khu xoáy, chiều dài khu xoáy (L_r) với độ sâu liên hiệp của nước nhảy và chiều dài nước nhảy (L_j).

+ Mở rộng nghiên cứu trong trường hợp đáy kênh có độ dốc âm, dương.

+ Nghiên cứu trường hợp khi có mô nhám lớn, phân tích rõ ràng hơn kết quả tính toán về chiều dài dòng chảy khu xoáy của nước nhảy và tiêu năng.

+ Ứng dụng mở rộng giải thuật học máy (Machine Learning) vào nghiên cứu tính toán xác định các đặc trưng hình học của nước nhảy, đặc biệt xây dựng bộ dữ liệu nghiên cứu đầy đủ về các đặc trưng hình học của nước nhảy.

+ Xây dựng hoàn chỉnh các chỉ dẫn thiết kế công trình thực tế có áp dụng nước nhảy trong lòng dẫn lắng trụ có mặt cắt ngang hình thang cân.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Văn Nghi, **Nguyễn Minh Ngọc** (2019). *Nghiên cứu xác định chiều dài nước nhảy trong mô hình kênh dẫn mặt cắt hình thang cân*. Hội nghị khoa học Cơ thủy khí toàn quốc lần thứ 22. NXB Thanh Niên. ISBN 978-604-979-703-3, trang 606-617.
2. **Nguyen Minh Ngoc**, Le Van Nghi, Pham Hong Cuong (2020). *Application correlation algorithm to create a new critical depth equation for gradually varied flow in trapezoidal channel using teaching-learning and studying*. J. Hydraul. Struct., 2020; 6(2):80-94. DOI: 10.22055/jhs.2020.34372.1141 (thuộc trong hệ thống Publons.com).
3. Phạm Hồng Cường, **Nguyễn Minh Ngọc**, Lê Quang Hưng (2020). *Nước nhảy và các yếu tố ảnh hưởng đến đặc trưng hình học của nước nhảy tự do trên lòng dẫn lăng trụ*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Thủy Lợi. Số 62, trang 70 – 76.
4. **Nguyễn Minh Ngọc** (2021). *Phân tích xác định độ sâu phân giới của kênh hở mặt cắt ngang hình thang cân*. Tạp chí khoa học Kiến trúc và Xây dựng. Số 42 – 08.2021, trang 45 – 51.
5. **Ngoc, N. M.**, Cuong, P. H., Son, T. T, Nam, N. V., Phong, N. T. (2022). *Experimental study of the hydraulic jump length in a smooth trapezoidal channel*. Scientific Review Engineering and Environmental Sciences. Vol 31 (1), p.63–76; <https://doi.org/10.22630/srees.2334> (Warsaw University of Life Sciences, Poland – Scopus, IF 0.9, Q4).
6. **Nguyen Minh Ngoc**, Pham Hong Cuong, Bui Hai Phong (2022). *Predictionn of the conjugate depth of the hydraulic jump in the trapezoidal channel using Random Forest regression*. Journal of Military Science and Technology (JMST) – Đã được chấp nhận đăng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

I - Tiếng việt

- [1]. Hoàng Tư An (2012). *Thủy lực công trình*. NXB Nông nghiệp, Hà Nội.
- [2]. Nguyễn Cảnh Cầm, Hoàng Văn Quý (2005). *Bài tập thủy lực – Tập 1*. NXB Xây Dựng. Hà Nội.
- [3]. Nguyễn Văn Dự, Nguyễn Đăng Bình (2011). *Quy hoạch thực nghiệm trong kỹ thuật*. NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [4]. Nguyễn Văn Đăng (1987). *Nghiên cứu nước nhảy theo lý thuyết lớp biên và một số ứng dụng*. Luận án phó Tiến sĩ kỹ thuật. ĐH Bách khoa TP Hồ Chí Minh.
- [5]. Lê Mạnh Hà (2016). *Thủy lực đại cương*. NXB Xây Dựng, Hà Nội.
- [6]. Lê Thị Việt Hà (2018). *Nghiên cứu xác lập công thức tính toán một số thông số nước nhảy đáy trên kênh dốc thuận có lòng dẫn mở rộng dần*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường ĐH Thủy Lợi, Hà Nội.
- [7]. Đặng Thị Hồng Huệ (2018). *Xây dựng và thí nghiệm mô hình thủy lực tràn xả lũ hồ chứa nước Chiềng Dong*. Phòng TNTĐ quốc gia về động lực học sông biển. Viện Khoa học thủy lợi Việt Nam.
- [8]. Hoàng Xuân Huân (2015). *Giáo trình Học máy*. Trường ĐH Công nghệ, ĐH Quốc gia Hà Nội.
- [9]. Hồ Việt Hùng, Lê Xuân Hiền (2017). *Xác lập các công thức tính toán chiều dài bể tiêu năng định hình theo mẫu của Cục Khai hoang Hoa Kỳ (USBR)*. *Tuyển tập Công trình Hội nghị khoa học - Cơ học Thủy khí toàn quốc lần thứ 2017*.
- [10]. Hồ Việt Hùng (2016). *Thiết lập các công thức tính toán cao trình đáy bể tiêu năng và các độ sâu nước nhảy trong bể*. *Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường*, số 52 (3/2016), trang 64 - 68.
- [11]. Lưu Như Phú, Nguyễn Văn Toàn (2013). *Xác định các độ sâu nước nhảy tự do trong cống có mặt cắt chữ nhật, bán tròn*. *Tuyển tập Khoa học - Công nghệ giai đoạn 2008 -2013*, pp. 487-491, 2013.
- [12]. Tiêu chuẩn Quốc gia (TCVN 8214:2009). *Thí nghiệm mô hình thủy lực công trình thủy lợi, thủy điện* ([Http://www.cviwr.vn](http://www.cviwr.vn)).

II - Tiếng anh

- [13]. Abolfazl Nazari Giglou (2013). *Analytical Analysis of the Hydraulic Jump*

Artur Radecki-Pawlik, Stefano Pagliara, Jan Hradecký (2017). Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology. *CRC Press*. ISBN 978-1-4987-4799-8 . P517.

[14]. A. Mammadov (2017). Hydraulic jump on smooth and uneven bottom. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. Vol-4, Issue-11, p188-198. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.11.28>.

[15]. Akram Abbaspour (2013). Estimation of hydraulic jump on corrugated bed using artificial neural networks and genetic programming. *Water Science and Engineering*. Vol 6(2): pp. 189-198. Doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.02.007.

[16]. B.S. Thandaveswara (2018). *Hydraulics*. Online course of Indian Institute of Technology Madras. Website: www.nptel.ac.in

[17]. Bambang Sulistiono, Lalu Makrup (2017). Study of Hydraulic Jump Length Coefficient with the Leap Generation by Canal Gate Model. *American Journal of Civil Engineering* 2017; 5(3): p.148-154. ISSN: 2330-8737 (Online).

[18]. Bahador Fatehi Nobarian, Hooman Hajikandi, Yousef Hassanzadeh, Saeed Jamali (2019). Experimental and analytical investigation of secondary current cells effects on hydraulic jump characteristics in trapezoidal channels. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 190-218. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-08.

[19]. Bradley, J.N.; Peterka, A.J (1957). Hydraulic Design of Stilling Basins. *J. Hydraul. Div. ASCE* 1957, 83, p.1401–1406.

[20]. Breiman, L (2001). Random Forests. *Machine Learning*. Vol. 45, pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

[21]. Busch, F. (1981). The Length of the Free Plane Hydraulic Jump on a Horizontal Floor in Regard to F. Rand 6//; *XIX IAHR-Congress, New Delhi, India, Subject D(b)*, Paper Nr. 15, pp. 299-306.

[22]. Chanson H. (2004). *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows*. Elsevier Ltd. ISBN 978-0-7506-6165-2.P331-347.

[23]. Chanson, H (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2004; ISBN 978-0750659789.

- [24]. Chris Smith, Mark Koning (2017). *Decision Trees and Random Forests: A Visual Introduction For Beginners: A Simple Guide to Machine Learning with Decision Trees*. Blue Windmill Media. <https://www.amazon.com/>
- [25]. Darren George, Paul Mallery (2019). *IBM SPSS Statistics 26 Step by Step: A Simple Guide and Reference*. 6th edition. Published November 29, 2019 by Routledge. ISBN 978-0367174347.
- [26]. Ead, S.A., và Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraul. Eng.*, 128(7), p.656-663.
- [27]. Frank M. White (2016). *Fluid Mechanics*. 8th edition. McGraw-Hill Education, New York, pages 864. ISBN 978-0-07-339827-3.
- [28]. Farzin Salmasi (2020). Critical Depth of Trapezoidal Open Channel Using Explicit Formula and ANN Approach. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 44, pp1023–1029 (2020). DOI:10.1007/s40996-020-00416-7.
- [29]. Fatehi Nobarian B, Hajikandi H, Hassanzadeh Y, Jamali S. (2018). Numerical Modeling Investigation of Secondary Current Cells in Trapezoidal Channels and their Effect on Hydraulic Jump's Properties. *Dam and Hydroelectric Powerplant*. 2018; 5 (17) :p.25-38.
- [30]. Hager, W.H. (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 0-7923-1508-1
- [31]. Hager W. H. , R. Bremen & N. Kawagoshi (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, 28:5, pp.591-608, DOI: 10.1080/00221689009499048.
- [32]. Hang Wang (2014). *Turbulence and Air Entrainment in Hydraulic Jumps*. Doctor of Philosophy at The University of Queensland in 2014.
- [33]. Harry Edmar Schulz, Juliana Dorn Nóbrega, André Luiz Andrade Simões, Henry Schulz and Rodrigo de Melo Porto (2015). *Chapter 4: Details of Hydraulic Jumps for Design Criteria of Hydraulic Structures ("Hydrodynamics - Concepts and Experiments" được biên soạn bởi Harry Edmar Schulz - ISBN: 978-953-51-2034-6)*. <http://dx.doi.org/10.5772/58963>.
- [34]. H. Arvanaghi, Gh. Mahtabi, M. Rashidi (2015) . New solutions for estimation

of critical depth in trapezoidal cross section channel. *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (9) 2453-2460.

[35]. Hamed Azimi, Hossein Bonakdari, Isa Ebtehaj, David G. Michelson (2016). A combined adaptive neuro-fuzzy inference system–firefly algorithm model for predicting the roller length of a hydraulic jump on a rough channel bed. *Neural Computing and Applications*, 29(6), pp 249-258. DOI:10.1007/s00521-016-2560-9

[36]. Kiyomars Roushangar và Farzin Homayounfar (2019). Prediction Characteristics of Free and Submerged Hydraulic Jumps on Horizontal and Sloping Beds using SVM Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol 23, p4696–4709. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1070-6>.

[37]. Kartha A. (2016). *Module – 4 (Hydraulics Jumps) of Advanced Hydraulics's lesson*. Indian Institute of Technology, Guwahati.

[38]. Larbi Houichi, Nouredine Dechemi, Salim Heddami và Bachir Achour (2016). An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel. *Journal of Hydroinformatics*, 15.1 (2013). P 147-154. DOI: 10.2166/hydro.2012.138.

[39]. Leo Breiman, Jerome Friedman, Charles J. Stone và Richard A. Olshen (2017). *Classification and Regression Trees (1st Edition)*. Chapman and Hall/CRC (hardcover). ISBN-13 : 978-1138469525.

[40]. Mahdi Naseri, Faridah Othman (2012). Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software*, 48 (2012) 27–31. Doi:10.1016/j.advengsoft.2012.01.003.

[41]. Mohamed F. Sauda (2016). Prediction of hydraulic jump length downstream of multi-vent regulators using Artificial Neural Networks. *Ain Shams Engineering Journal*, 7, p819–826. DOI: 10.1016/j.asej.2015.12.005.

[42]. Mahmoud Ali R. Eltoukhy (2016). Hydraulic jump characteristics for different open channel and stilling basin layouts. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 7, Issue 2, March-April 2016, pp. 290–301

[43]. Marques MG, Drapeau J, Verrette JL (1997). Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 1997; Vol 2, pp45-52.

[44]. Mahmoud Ali R. Eltoukhy (2016). Hydraulic jump characteristics for different

open channel and stilling basin layouts. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 7, Issue 2, pp 290–301.

[45]. M. Hanif Chaudhry (2008). *Open-Channel Flow*. Second Edition. Publisher: Springer US. ISBN-13: 978-0387301747.

[46]. Moore, D. S., Notz, W. I. & Flinger, M. A. (2013). *The basic practice of statistics (6th ed.)*. New York, NY: W. H. Freeman and Company. ISBN 9781464102547.

[47]. Melhem H.G. và Nagaraja S. (1996). Machine learning and its application to civil engineering systems. *Civil Engineering Systems*, 13:4, p259-279, P 259 – 279. <https://doi.org/10.1080/02630259608970203>.

[48]. Mundo-Molina, M. và Pérez, J.L.D. (2019). Proposed Equation to Estimate the Length of a Hydraulic Jump in a Rectangular Open Channel Hydraulic with Variable Slope, and Its Comparison with Seven Theoretical Equations of Specialized Literature. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol 11, pp1481-1488. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.1112086>.

[49]. Masoud Karbasi và H. Md. Azamathulla. GEP to Predict Characteristics of a Hydraulic Jump Over a Rough Bed. *KSCE Journal of Civil Engineering (2016)*, 20(7): pp.3006-3011.DOI 10.1007/s12205-016-0821-x

[50]. Noor afzal; A. Bushra (2002). Structure of the turbulent hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of hydraulic research*, vol. 40, , no. 2.

[51]. Nasrin Hassanpour, Ali Hosseinzadeh Dalir, Davod Farsadizadeh và Carlo Gualtieri (2017). An Experimental Study of Hydraulic Jump in a Gradually Expanding Rectangular Stilling Basin with Roughened Bed. *Water* 2017, 9, p945; doi:10.3390/w9120945

[52]. Pagliara, S., Palermo, M. (2015). Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds. *J. Hydraul. Res.*, 53(2), p243–252.

[53]. Pietrkowski, J. (1932). Beitrag zur Kenntnis des Wechselsprunges (Contribution to the Knowledge on Hydraulic Jumps). *Die Wasserwirtschaft*, Nr. 25, pp. 356-358; Nr. 26, pp. 370-372; Nr. 27, pp. 377-379; Nr. 28, pp. 397-400.

[54]. Peterka (1984). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. A

water resources technical publication. Denver, Colorado, US.

[55]. Posey, C. J. và Hsing, P. S (1938)., Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Engineering News Record*, Vol. 121, Dec. 22nd, , pp. 797-798.

[56]. P. Khosravinaei, H. Sanikhani và Ch. Abdi (2018). Predicting Hydraulic Jump Length on Rough Beds Using Data-Driven Models. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6-2 (2018) pp.139-153. DOI: 10.22075/JRCE.2017.11047.1180

[57]. Rajaratnam, N., Subramanya, K. (1968). Profile of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division. ASCE*, 94(HY3), p663- 673.

[58]. Robert Wanoschek and Will Hager (1989). Hydraulic jump in trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 27:3, 429-446, DOI: 10.1080/00221688909499175.

[59]. Ohtsu, I. (1976). Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. *Trans. JSCE*, Vol. 8, , pp. 122-125.

[60]. Oregon Department Of Transportation (2014). *Hydraulics design manual*. Prepared by Engineering And Asset Management Unit Geo-Environmental Section (<https://www.oregon.gov>).

[61]. Timothy C. Au (2018). Random Forests, Decision Trees, and Categorical Predictors: The "Absent Levels" Problem. *Journal of Machine Learning Research*, 19 (2018) pp 1-30.

[62]. Tiejie Cheng, Jun Wang, Jueyi Sui (2018). Calculation of critical flow depth using method of algebraic inequality. *J. Hydrol. Hydromech.* p316–322.

[63]. Sarma, K. V. N. và Newnham, D. A. (1973). Surface Profiles of Hydraulic Jump for Froude Numbers less than Four. *Water Power*, April, pp. 139-142.

[64]. Safranez, K. (1929). Untersuchung iiber den Wechselsprung (Investigation on the Hydraulic Jump). *Der Bauingenieur*, Vol. 10, Heft 37, pp. 649-651.

[65]. Silvester, R. (1964). Hydraulic jump in all shapes of horizontal channel. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 90(HY1), p23-55.

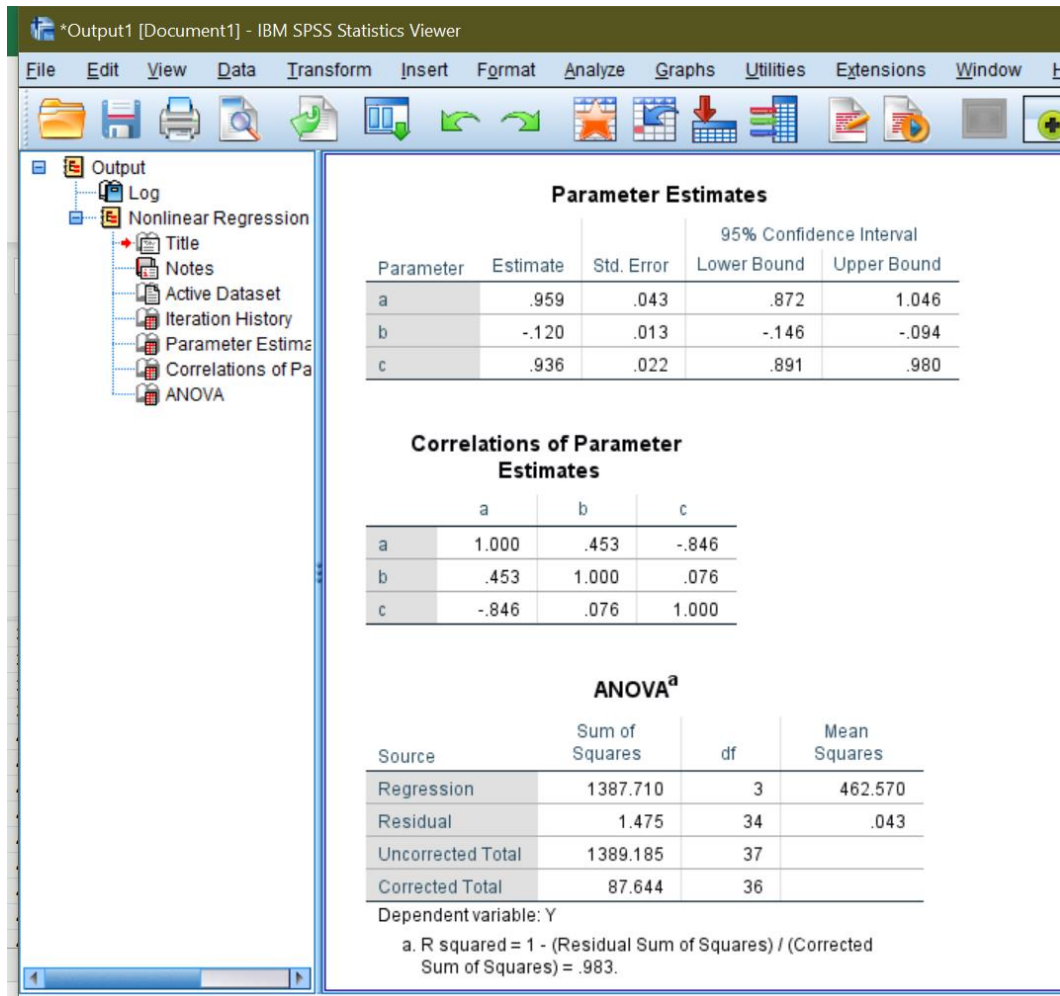
[66]. Swamee, P. K. (1993). Critical depth equations for irrigation canals. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 119(2), p 400–409.

- [67]. Sadiq Salman Muhsun (2012). Characteristics of the Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel Section. *Journal of Environmental Studies [JES]* . 9: pp53-63.
- [68]. Samir kateb, Mahmoud Debabeche, Ferhat Riguet (2015). Hydraulic jump in a sloped trapezoidal channel. *Energy Procedia*, 74, pp251 – 257.
- [69]. Saneie, M., Sheikh K. J. và Azhdary M. M. (2016). Scale Effects on the Discharge Coefficient of Ogee Spillway with an Arc in Plan and Converging Training Walls. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 49(2): pp.361 – 374.
- [70]. Samir Kateb (2014). *Theoretical and experimental study of some types of hydraulic jumps in a trapezoidal channel*. PhD thesis of University Mohamed Khider Biskra (Université de Biskra), Algeria. <http://thesis.univ-biskra.dz/>
- [71]. SIAD, Rafik (2018). *Hydraulic jump in a sharply widened trapezoidal channel*. Doctoral thesis, University Mohamed Khider Biskra (Université de Biskra), Algeria. <http://thesis.univ-biskra.dz/>
- [72]. Shahin S.A, Othman K.M và Alan A.G (2018). Experimental Study of Hydraulic Jump Characteristics in Trapezoidal Channels. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences (The official scientific journal of Salahaddin University-Erbil)*. *ZJPAS (2018)*, 30(s1),pp70-s75. <http://dx.doi.org/10.21271/ZJPAS.30.s1.8>.
- [73]. Simões ALA (2008). *Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento*. MSc thesis. University of São Paulo.
- [74]. Sergio Montes (1998). *Hydraulics of Open Channel Flow*. Amer Society of Civil Engineers (ASCE) Press. ISBN-13: 978-0784403570
- [75]. Sanjeev Kumar Gupta, R. C. Mehta, V. K. Dwivedi (2013). Modeling of relative length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel. *Procedia Engineering*, 51, p 529 – 537. Doi: 10.1016/j.proeng. 2013.01.075.
- [76]. Sonia Cherhabil và Mahmoud Debabeche (2016). Experimental Study of Sequent Depths Ratio of Hydraulic Jump in Sloped Trapezoidal Channel. In B. Crookston & B. Tullis (Eds.), *Hydraulic Structures and Water System Management. 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, OR, 27-30 June* (pp.353-358). doi:10.15142/T3610628160853 (ISBN 978-1-884575-75-4).

- [77]. Scott Hartshorn (2016). *Machine Learning With Random Forests And Decision Trees: A Visual Guide For Beginners*. <https://www.amazon.com/>
- [78]. Sanjeev Kumar Gupta, R. C. Mehta, Piyush Singhal (2019). Experimental Evaluation and Empirical Formulation of Hydraulic Jump Characteristics in Sloping Prismatic Channel. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. Volume-8 Issue-4, pp 288-292.
- [79]. Seyed Asadollah Mohseni Movahed, Javad Mozaffari¹, Davood Davoodmaghami, Mahmood Akbari (2018). A Semi-Analytical Equation to Estimate Hydraulic Jump Length. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 62(4), pp. 1001–1006, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPci.11257>.
- [80]. Steven L. B., Bernd R. N., and Petros K. (2020). Machine Learning for Fluid Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2020. 52:477–508.
- [81]. Valero, D.; Fullana, O.; Gacía-Bartual, R.; Andrés-Domenech, I.; Valles, F (2014). *Analytical formulation for the aerated hydraulic jump and physical modeling comparison*. In Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress, Porto, Portugal.
- [82]. Ven Te Chow (2009). *Open Channel hydraulic*. The Blackburn Press; Illustrated edition (January 1, 2009), ISBN-13: 978-1932846188.
- [83]. Vatankhah A. R., Easa S., (2011). Explicit solutions for critical and normal depths in channels with different shapes. *Flow Measurement and Instrumentation*. 22 p. 43–49. Doi:10.1016/j.flowmeasinst.2010.12.003.
- [84]. Vatankhah A. R., (2013). Explicit solutions for critical and normal depths in trapezoidal and parabolic open channels. *Ain Shams Engineering Journal*. 4, p. 17–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2012.05.002>.
- [85]. Willmott, Cort J.; Matsuura, Kenji (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 30: p.79–82.
- [86]. Zhengzhong Wang (1998). Formula for calculating critical depth of trapezoidal open channel. *J. Hydraul. Eng.* 1998.124: pp.90-91.

PHỤ LỤC

Phụ Lục 1. Kết quả phân tích công thức thực nghiệm độ sâu liên hiệp nước nhảy bằng phần mềm IBM SPSS 26.

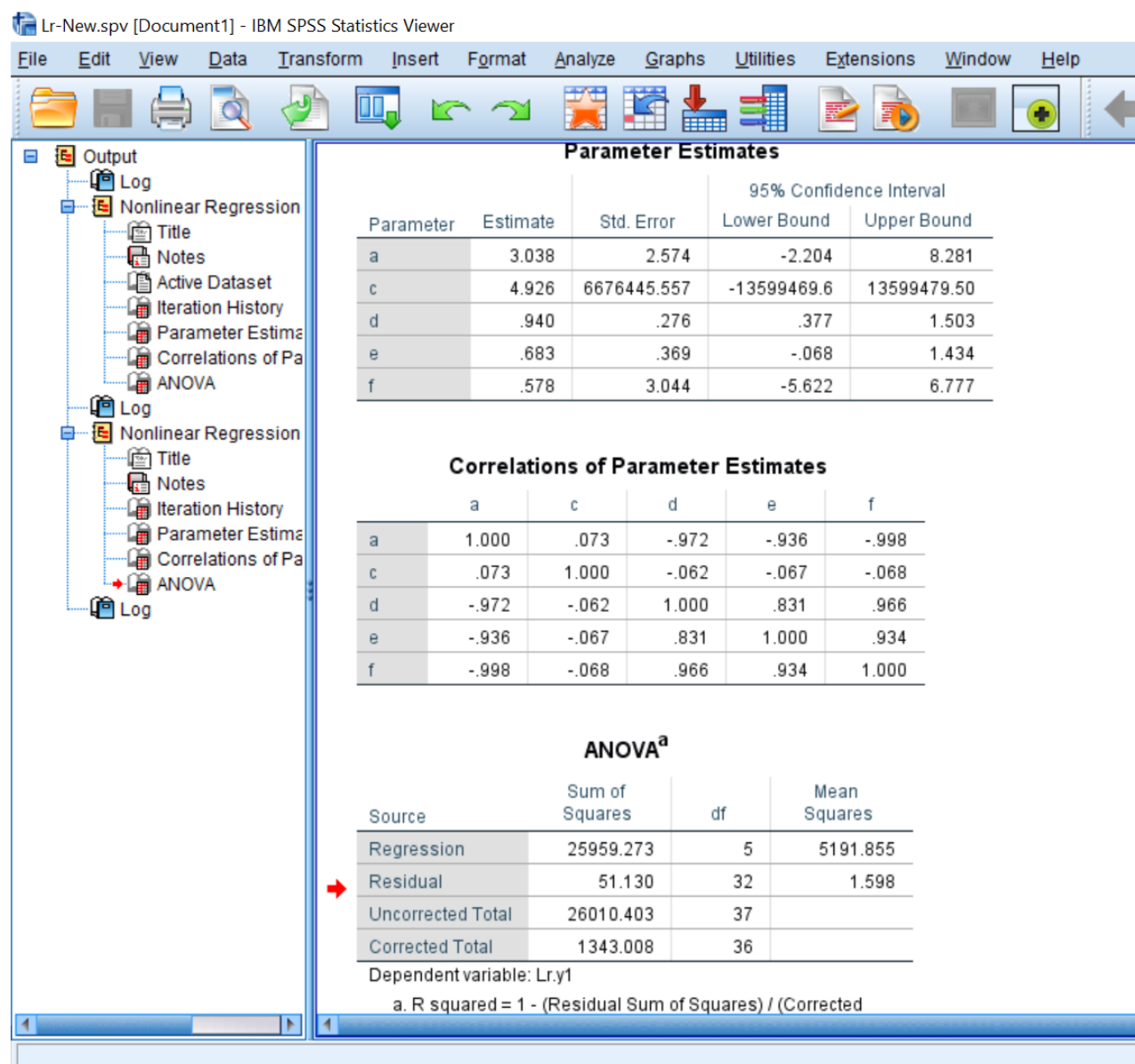


Hình 1 Kết quả phân tích công thức thực nghiệm tỷ lệ sâu sau khu xoáy

* Công thức mô tả tính độ sâu liên hiệp nước nhảy

$$\frac{y_r}{y_1} = 0,9591M_1^{-0,12}Fr_1^{0,936}$$

Phụ lục 2. Kết quả xây dựng công thức tính chiều dài nước nhảy bằng phần mềm IBM SPSS 26.

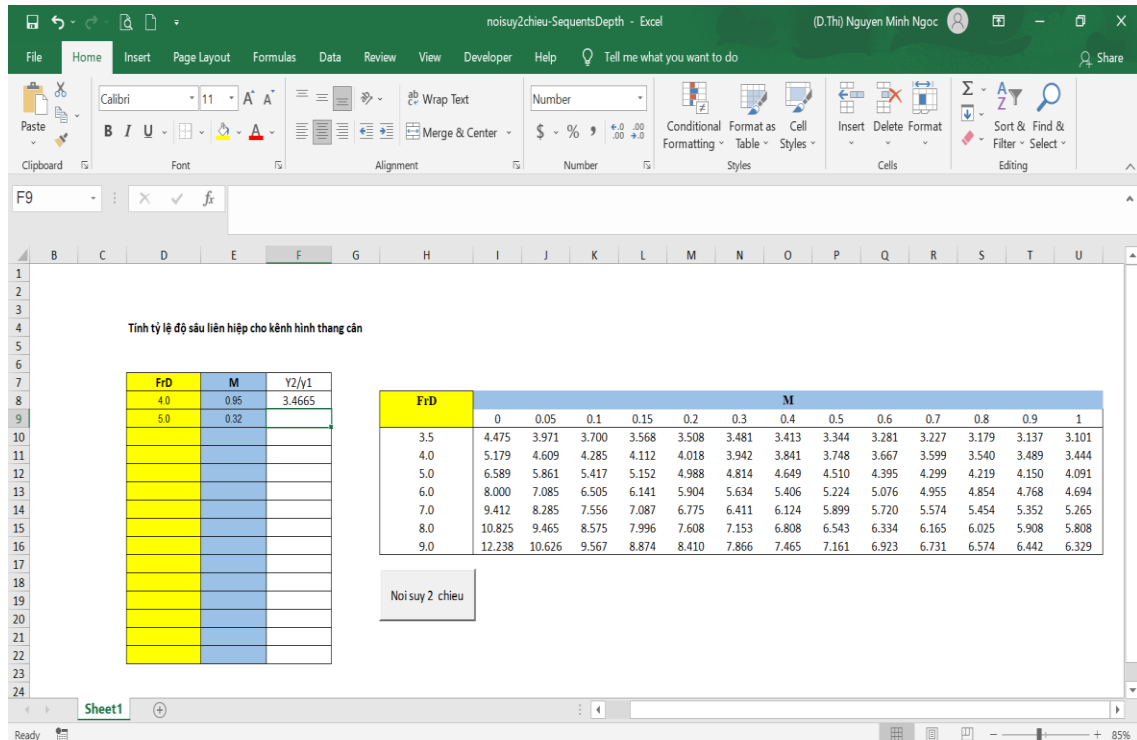


Hình 2 Kết quả phân tích hệ số cho công thức chiều dài khu xoáy

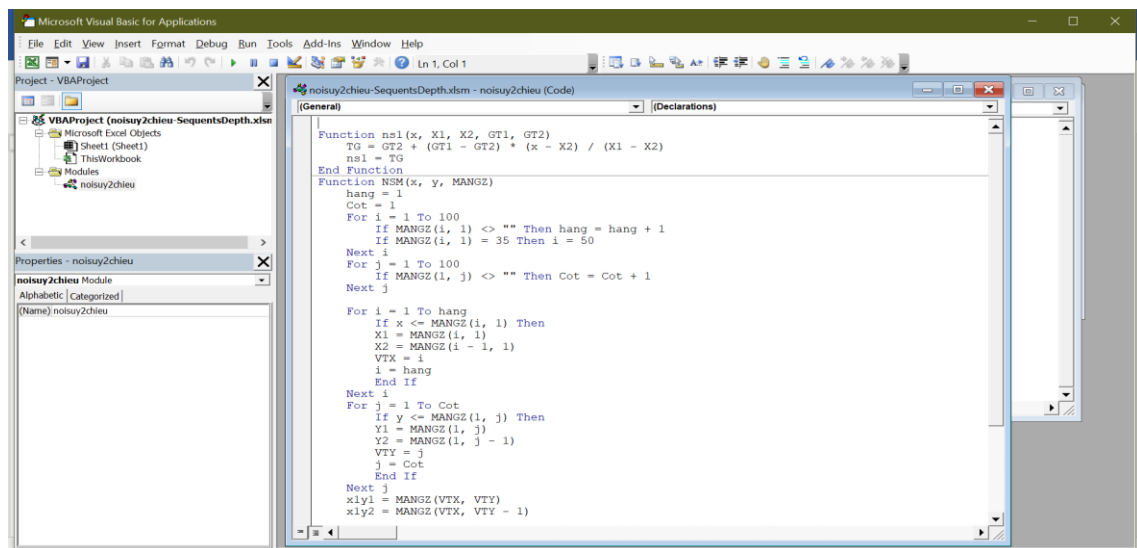
* Công thức mô tả:

$$\frac{L_r}{y_1} = \left[3,038 - \left(\frac{e}{y_1} \right)^{4,926} \right] \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^{0,94} + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^{0,683} + 0,578 \right]$$

Phụ lục 3. Tính tỷ lệ độ sâu liên hiệp của nước nhảy trên Excel 2019



Hình 3 Giao diện tra độ sâu liên hiệp nước nhảy trên Excel



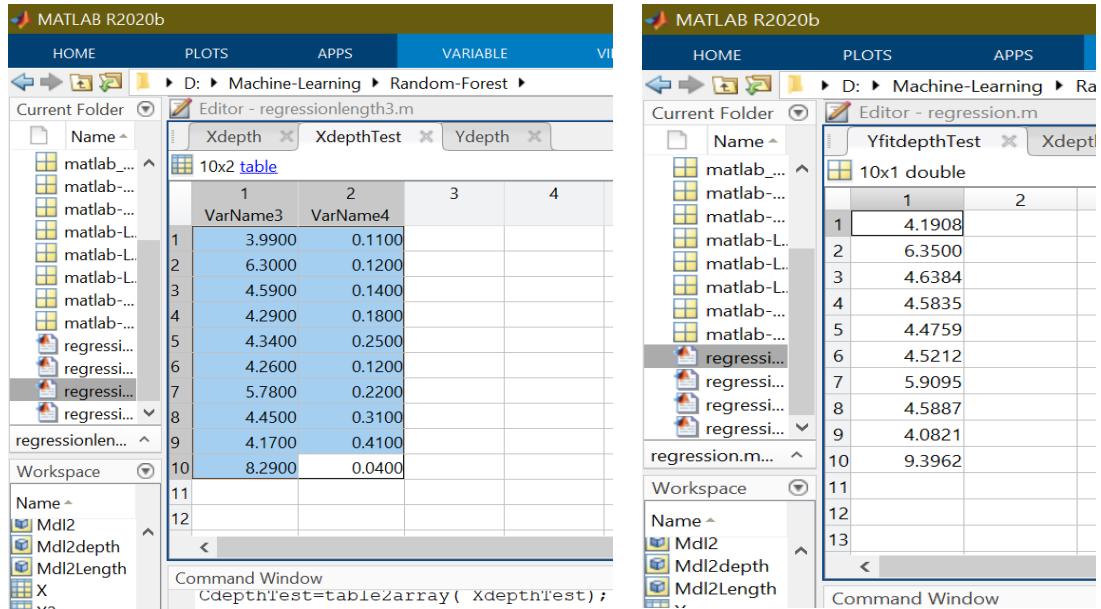
Hình 4 Mã lệnh thực hiện phân tích xác định độ sâu liên hiệp nước nhảy

Xác định tỷ lệ độ sâu dòng chảy sau khu xoáy được xây dựng nền cơ sở của mã lệnh nội suy 2 chiều (tham khảo câu lệnh bên ngoài).

Nhập giá trị Fr_D và M vào các cột tương ứng, sau đó Nút lệnh thực thi “Noi suy 2 chiều”, sẽ xác định được giá trị tỷ lệ độ sâu liên hiệp nước nhảy (y_2/y_1).

Phụ lục 4. Phân tích mô hình Học máy “Rừng ngẫu nhiên” cho công trình Nhà Sản – Sơn La

4.1 Kết quả phân tích cho độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

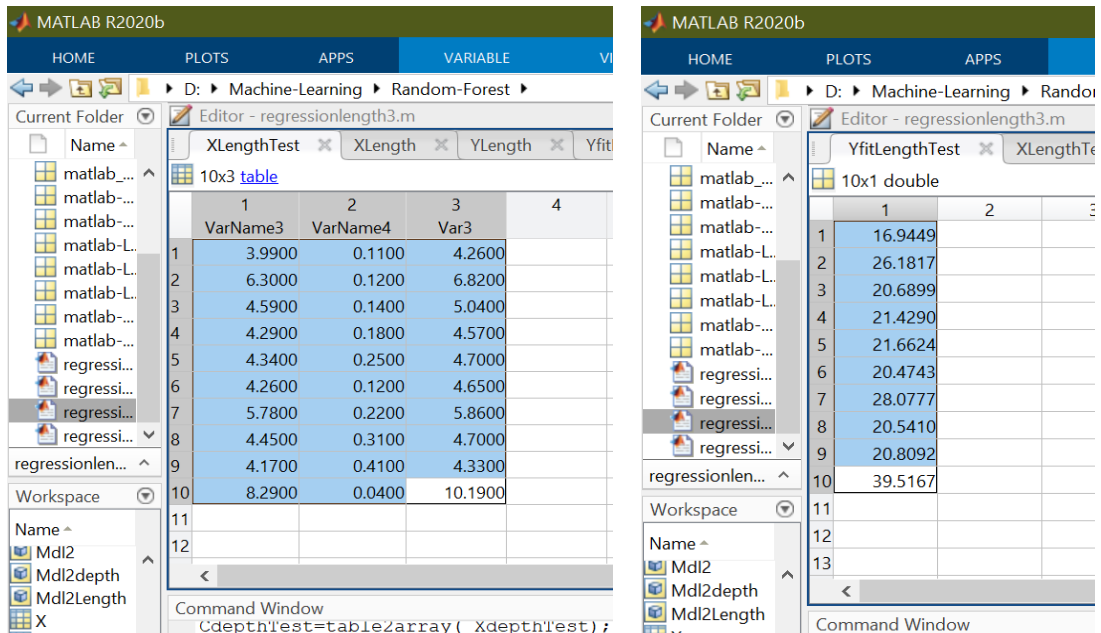


a. Bổ sung dữ liệu về độ sâu khu

b. Kết quả về độ sâu sau khu xoáy

Hình 5 Phụ lục tính toán độ sâu dòng chảy sau khu xoáy cho công trình Nhà Sản – Sơn La

4.2 Kết quả phân tích chiều dài nước nhảy



a. Bổ sung dữ liệu về chiều dài nước nhảy

b. Kết quả chiều dài nước nhảy

Hình 6 Phụ lục tính toán chiều dài nước nhảy cho công trình Nhà Sản – Sơn La

Phụ Lục 5. Kết quả đo thí nghiệm trên mô hình vật lý

5.1 Kết quả thí nghiệm mô hình

5.1.1 Số liệu đo độ sâu dòng chảy

Trường hợp 1: $Z_{\text{máng lường}} = 39,73 \text{ cm}$ ứng lưu lượng $Q = 0,118 \text{ m}^3/\text{s}$

Bảng 1. Số liệu thực đo từ công trình bằng Mía và máy thủy bình

TT	Ký hiệu mặt cắt	Khoảng cách	Số đọc mĩa CT mực nước tại các điểm đo (m)		
			TT1(P)	TT2(G)	TT3(T)
1	MC1	0.00	45.10	45.70	45.40
2	MC2	30.00	53.20	52.60	53.10
3	MC3	60.00	58.70	57.10	57.40
4	MC4	90.00	62.40	62.80	61.80
5	MC5	120.00	62.70	62.90	62.60
6	MC6	150.00	62.10	62.20	62.30
7	MC7	180.00	61.70	61.40	61.50
8	MC8	210.00	62.40	62.80	62.50
9	MC9	240.00	62.70	63.50	62.80
10	MC10	270.00	61.10	62.40	62.30

Bảng 2 Kết quả đo đường mực nước

Khu vực	Tên mặt cắt	Cao trình mực nước tại các điểm đo (m)			TB	Độ sâu (m)	Khoảng cách (cm)
		TT1	TT2	TT3			
Kênh	MC1	-0.694	-0.688	-0.691	-0.691	0.069	0
	MC2	-0.613	-0.619	-0.614	-0.615	0.145	30
	MC3	-0.558	-0.574	-0.571	-0.568	0.192	60
	MC4	-0.521	-0.517	-0.527	-0.522	0.238	90
	MC5	-0.518	-0.516	-0.519	-0.518	0.242	120
	MC6	-0.524	-0.523	-0.522	-0.523	0.237	150
	MC7	-0.528	-0.531	-0.530	-0.530	0.230	180
	MC8	-0.521	-0.517	-0.520	-0.519	0.241	210
	MC9	-0.518	-0.510	-0.517	-0.515	0.245	240
	MC10	-0.534	-0.521	-0.522	-0.526	0.234	270

Trường hợp 2. $Z_{\text{máng lườn}} = 34,68 \text{ cm}$ ứng lưu lượng $Q = 0,073 \text{ m}^3/\text{s}$

Bảng 3 Số liệu thực đo từ công trình bằng Mía và máy thủy bình

TT	Mặt cắt	Số đọc mia CT mực nước tại các điểm đo (m)		
		P	G	T
1	0.00	43.20	43.50	43.30
2	50.00	50.80	50.30	50.60
3	100.00	54.90	55.60	55.90
4	150.00	54.40	55.50	54.20
5	200.00	55.60	56.60	55.70
6	250.00	54.30	55.60	55.30
7	300.00	54.60	56.30	56.40
8	350.00	55.10	55.60	55.80

Bảng 4 Kết quả đo đường mực nước

Khu vực	Tên mặt cắt	Cao trình mực nước tại các điểm đo (m)			TB	Độ sâu (m)	Khoảng cách (cm)
		TT1	TT2	TT3			
Kênh	MC1	-0.713	-0.710	-0.712	-0.712	0.042	0
	MC2	-0.637	-0.642	-0.639	-0.639	0.131	50
	MC3	-0.596	-0.589	-0.586	-0.590	0.215	100
	MC4	-0.601	-0.590	-0.603	-0.598	0.212	150
	MC5	-0.589	-0.579	-0.588	-0.585	0.218	200
	MC6	-0.602	-0.589	-0.592	-0.594	0.220	250
	MC7	-0.599	-0.582	-0.581	-0.587	0.213	300
	MC8	-0.594	-0.589	-0.587	-0.590	0.220	350

Trường hợp 3. $Z_{\text{máng lườn}} = 30.22 \text{ cm}$ ứng lưu lượng $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$

Bảng 5 Số liệu thực đo từ công trình bằng Mía và máy thủy bình

TT	Tên mặt cắt	Mặt cắt	Số đọc mia CT mực nước tại các điểm đo (m)		
			P	G	T
1	MC1	0.00	43.30	45.50	45.80
2	MC2	20.00	49.50	49.30	50.20

TT	Tên mặt cắt	Mặt cắt	Số đọc mia CT mực nước tại các điểm đo (m)		
			P	G	T
3	MC3	40.00	55.15	55.40	54.40
4	MC4	60.00	57.65	58.50	57.40
5	MC5	80.00	56.60	57.80	57.50
6	MC6	100.00	57.50	58.90	57.60
7	MC7	120.00	57.10	57.20	57.10
8	MC8	140.00	57.60	57.90	57.80
9	MC9	160.00	57.10	57.50	57.30
10	MC10	180.00	57.60	57.80	58.20
11	MC11	200.00	57.80	57.50	58.20
12	MC12	220.00	57.30	57.50	57.40
13	MC13	240.00	57.40	58.20	57.70
14	MC14	260.00	57.70	57.60	58.10

Bảng 6 Kết quả đo đường mực nước

Khu vực	Tên mặt cắt	Cao trình mực nước tại các điểm đo (m)			TB	Độ sâu	Khoảng cách (cm)
		P	G	T			
Kênh	MC1	-0.712	-0.690	-0.687	-0.696	0.034	0
	MC2	-0.650	-0.652	-0.643	-0.648	0.092	20
	MC3	-0.594	-0.591	-0.601	-0.595	0.135	40
	MC4	-0.569	-0.560	-0.571	-0.567	0.144	60
	MC5	-0.579	-0.567	-0.570	-0.572	0.148	80
	MC6	-0.570	-0.556	-0.569	-0.565	0.145	100
	MC7	-0.574	-0.573	-0.574	-0.574	0.146	120
	MC8	-0.569	-0.566	-0.567	-0.567	0.143	140
	MC9	-0.574	-0.570	-0.572	-0.572	0.148	160
	MC10	-0.569	-0.567	-0.563	-0.566	0.144	180
	MC11	-0.567	-0.570	-0.563	-0.567	0.143	200
	MC12	-0.572	-0.570	-0.571	-0.571	0.149	220
	MC13	-0.571	-0.563	-0.568	-0.567	0.143	240
	MC14	-0.568	-0.569	-0.564	-0.567	0.143	260

5.1.2 Kết quả thí nghiệm mô hình (Bảng 2.5)

Bảng 7 Tổng hợp số liệu đo đặc đặc trưng nước nhảy theo các cấp lưu lượng

TT	Kim đo máng lường (cm)	Lưu lượng (m ³ /s)	b (m)	Đặc trưng hình học nước nhảy		
				y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)
1	39.75	0.118	0.55	0.056	0.3	1.3
2	39.75	0.118	0.55	0.062	0.264	1.1
3	47.55	0.201	0.55	0.065	0.443	1.8
4	47.55	0.201	0.55	0.079	0.398	1.7
5	38.2	0.104	0.55	0.056	0.25	1.1
6	38.2	0.104	0.55	0.041	0.332	1.3
7	38.2	0.104	0.55	0.052	0.268	1.1
8	33	0.06	0.55	0.04	0.182	0.8
9	43.4	0.155	0.55	0.048	0.451	1.9
10	44.35	0.165	0.55	0.071	0.329	1.5
11	46.82	0.193	0.55	0.081	0.36	1.7
12	34.65	0.073	0.55	0.04	0.223	0.9
13	46.82	0.193	0.55	0.055	0.488	2
14	35.25	0.078	0.335	0.057	0.286	1.2
15	35.25	0.078	0.335	0.041	0.353	1.4
16	35.25	0.078	0.335	0.06	0.274	1.3
17	40.85	0.129	0.335	0.058	0.457	2
18	40.85	0.129	0.335	0.068	0.405	1.9
19	38.65	0.108	0.335	0.069	0.346	1.5
20	43.66	0.158	0.335	0.088	0.428	2.1
21	43.66	0.158	0.335	0.092	0.418	2
22	43.66	0.158	0.335	0.079	0.448	2.1
23	30.22	0.04	0.335	0.042	0.185	0.8
24	30.22	0.04	0.335	0.04	0.186	0.8
25	41.5	0.136	0.335	0.083	0.39	1.8
26	37.95	0.101	0.335	0.056	0.373	1.6
27	37.95	0.101	0.335	0.061	0.355	1.7
28	41.5	0.136	0.335	0.086	0.379	1.7
29	41.5	0.136	0.335	0.065	0.434	2
30	36.8	0.091	0.335	0.049	0.362	1.5
31	36.8	0.091	0.335	0.054	0.347	1.5
32	36.8	0.091	0.335	0.067	0.295	1.4

TT	Kim đo máng lường (cm)	Lưu lượng (m ³ /s)	b (m)	Đặc trưng hình học nước nhảy		
				y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)
33	42.85	0.149	0.335	0.083	0.402	1.9
Max	47.55	0.201	0.55	0.092	0.488	2.1
Min	30.22	0.04	0.335	0.04	0.182	0.8

5.2 Phân tích các đặc trưng thủy động của nước nhảy (Bảng 2.6)

Bảng 8 Các thông số về đặc trưng hình học của nước nhảy

TT	F _{r1}	Fr _{D1}	M ₁	$\frac{L_r}{y_1}$	$\frac{L_r}{y_r}$	$\frac{y_r}{y_1}$	Re ₁	ΔE/y ₁
1	4.652	4.848	0.095	21.154	4.104	5.154	147717	6.444
2	4.691	4.903	0.102	23.214	4.333	5.357	164925	6.452
3	3.988	4.185	0.113	17.742	4.167	4.258	161067	4.444
4	6.297	6.621	0.118	27.692	4.063	6.815	271187	13.845
5	4.595	4.875	0.144	21.519	4.271	5.038	257303	6.335
6	4.135	4.322	0.102	19.643	4.400	4.464	145358	4.837
7	6.768	6.998	0.075	31.707	3.916	8.098	154618	15.646
8	4.059	4.194	0.073	20.000	4.396	4.550	89583	4.428
9	7.869	8.179	0.087	39.583	4.213	9.396	223787	22.442
10	4.484	4.733	0.129	21.127	4.559	4.634	217584	6.186
11	4.236	4.500	0.147	20.988	4.722	4.444	245268	5.309
12	4.938	5.103	0.073	22.500	4.036	5.575	108993	7.388
13	7.896	8.247	0.100	36.364	4.098	8.873	270832	23.168
14	4.668	4.996	0.170	21.053	4.196	5.018	155632	6.707
15	7.978	8.402	0.122	34.146	3.966	8.610	171250	24.087
16	4.290	4.604	0.179	21.667	4.745	4.567	153015	5.449
17	7.503	8.037	0.173	34.483	4.376	7.879	255932	21.155
18	5.764	6.231	0.203	27.941	4.691	5.956	242205	11.514
19	4.709	5.095	0.206	21.739	4.335	5.014	201695	6.918
20	4.568	5.021	0.263	23.864	4.907	4.864	267914	6.436
21	4.234	4.667	0.275	21.739	4.785	4.543	262822	5.279
22	5.488	5.988	0.236	26.582	4.688	5.671	280127	10.255
23	3.936	4.149	0.125	19.048	4.324	4.405	87273	4.130
24	4.257	4.478	0.119	20.000	4.301	4.650	88375	5.194
25	4.344	4.756	0.248	21.687	4.615	4.699	236334	5.595

TT	F_{r1}	Fr_{D1}	M_1	$\frac{L_r}{y_1}$	$\frac{L_r}{y_r}$	$\frac{y_r}{y_1}$	Re_1	$\Delta E/y_1$
26	6.223	6.654	0.167	28.571	4.290	6.661	202679	13.572
27	5.405	5.806	0.182	27.869	4.789	5.820	197031	9.645
28	4.090	4.488	0.257	19.767	4.485	4.407	232866	4.806
29	6.550	7.063	0.194	30.769	4.608	6.677	259524	15.647
30	6.976	7.407	0.146	30.612	4.144	7.388	190246	17.806
31	5.952	6.352	0.161	27.778	4.323	6.426	184729	12.148
32	4.167	4.501	0.200	20.896	4.746	4.403	171779	5.098
33	4.759	5.211	0.248	22.892	4.726	4.843	258925	7.328
34	5.778	6.279	0.221	27.027	4.608	5.865	271034	11.691
Max	7.978	8.402	0.275	39.583	4.907	9.396	280127	24.087
Min	3.936	4.149	0.073	17.742	3.916	4.258	87273	4.130

Phụ lục 6. Chi tiết các bảng tính toán trong luận án

6.1 Bảng tính độ sâu phân giới

Bảng 9 Tính toán độ sâu phân giới của kênh hình thang theo công thức đề xuất

Giá trị mẫu thử					Tính toán độ sâu phân giới y_c (m)				
Q (m^3/s)	b (m)	m	y_c theo (3.1) (m)	y_{cCN} (m)	M_c	CT (3.8)	ε (%)	CT (3.9)	ε (%)
1	1	1	0.405	0.467	0.385	0.404	0.18	0.406	0.36
1	2	1	0.28	0.294	0.192	0.279	0.26	0.278	0.79
1	3	0.5	0.222	0.225	0.064	0.221	0.26	0.218	1.67
2	1	1.25	0.58	0.742	0.481	0.58	0.02	0.610	5.14
2	2	1.5	0.418	0.467	0.288	0.417	0.24	0.431	3.11
2	3	2	0.33	0.356	0.256	0.329	0.37	0.335	1.58
5	1	1	0.988	1.366	0.385	0.989	0.14	0.973	1.48
5	2	1	0.754	0.86	0.192	0.752	0.29	0.755	0.18
5	3	0.5	0.633	0.657	0.064	0.631	0.30	0.611	3.49
10	1	1.25	1.328	2.168	0.481	1.325	0.25	1.363	2.63
10	2	1.5	1.048	1.366	0.288	1.049	0.07	1.148	9.54

Giá trị mẫu thử					Tính toán độ sâu phân giới y_c (m)				
Q (m ³ /s)	b (m)	m	y_c theo (3.1) (m)	y_{cCN} (m)	M_c	CT (3.8)	ε (%)	CT (3.9)	ε (%)
10	3	2	0.856	1.042	0.256	0.855	0.12	0.946	10.53
20	2	1	1.645	2.168	0.192	1.647	0.11	1.638	0.43
20	3	0.5	1.514	1.655	0.064	1.509	0.35	1.404	7.27
50	5	1.25	1.845	2.168	0.096	1.842	0.16	1.909	3.45
50	2	1.5	2.38	3.994	0.288	2.372	0.36	2.661	11.80
50	4	1.25	2.024	2.516	0.12	2.024	0.01	2.119	4.71
60	3	1.5	2.364	3.442	0.192	2.366	0.07	2.648	12.02
60	5	2	1.895	2.448	0.154	1.896	0.03	2.174	14.75
70	5	1	2.309	2.713	0.077	2.305	0.18	2.318	0.39
80	4	1	2.727	3.442	0.096	2.727	0.00	2.731	0.15
100	10	0.5	2.092	2.168	0.019	2.085	0.35	2.017	3.58

6.2 Dữ liệu phân tích độ sâu sau khu xoáy

Bảng 10 Dữ liệu thực nghiệm nghiên cứu về độ sâu dòng chảy sau khu xoáy

TT	Q (l/s)	b (cm)	y_1 (m)	y_r (m)	Fr_{D1}	M_1	$Y_{td} = y_r/y_1$
1	0.129	33.5	0.068	0.405	6.231	0.203	5.956
2	0.108	33.5	0.069	0.346	5.095	0.206	5.014
3	0.158	33.5	0.088	0.428	5.021	0.263	4.864
4	0.158	33.5	0.092	0.418	4.667	0.275	4.543
5	0.158	33.5	0.079	0.448	5.988	0.236	5.671
6	0.136	33.5	0.083	0.39	4.756	0.248	4.699
7	0.136	33.5	0.086	0.379	4.488	0.257	4.407
8	0.091	33.5	0.067	0.295	4.501	0.200	4.403
9	0.149	33.5	0.083	0.402	5.211	0.248	4.843
10	0.149	33.5	0.074	0.434	6.279	0.221	5.865
11	0.065	33.5	0.061	0.328	5.862	0.305	5.377
12	0.096	20	0.0609	0.441	8.681	0.305	7.241
13	0.049	20	0.0409	0.324	8.492	0.205	7.922
14	0.083	20	0.0606	0.395	7.568	0.303	6.518
15	0.091	20	0.0811	0.372	5.080	0.406	4.587
16	0.0393	20	0.0408	0.266	6.838	0.204	6.520

TT	Q (l/s)	b (cm)	y_1 (m)	y_r (m)	Fr_{D1}	M_1	$Y_{td} = y_r/y_1$
17	0.0293	20	0.0409	0.208	5.078	0.205	5.086
18	0.074	20	0.0811	0.312	4.131	0.406	3.847
19	0.085	20	0.0812	0.352	4.735	0.406	4.335
20	0.065	20	0.081	0.288	3.636	0.405	3.556
21	0.055	20	0.0611	0.287	4.947	0.306	4.697
22	0.0242	20	0.0405	0.17	4.261	0.203	4.198
Max	0.158	33.5	0.092	0.448	8.681	0.406	7.922
Min	0.0242	20	0.0405	0.17	3.636	0.2	3.556

6.3 Một số bảng tính Y theo công thức (3.36) với các giá trị k

Bảng 11 Giá trị tính toán độ sâu sau khu xoáy theo công thức (3.36) với các giá trị k

k = 0.97									
Fr_{D1}	M_1								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.976	3.911	3.816	3.726	3.648	3.581	3.523	3.473	3.430
5	4.945	4.783	4.623	4.488	4.375	4.281	4.202	4.134	4.075
6	5.860	5.601	5.380	5.201	5.055	4.936	4.836	4.751	4.678
7	6.730	6.378	6.096	5.875	5.699	5.555	5.436	5.335	5.249
8	7.562	7.119	6.780	6.519	6.313	6.145	6.007	5.891	5.792
9	8.363	7.831	7.437	7.136	6.901	6.711	6.555	6.424	6.313
10	9.136	8.518	8.069	7.732	7.468	7.257	7.083	6.938	6.814
k = 0.95									
Fr_{D1}	M_1								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.948	3.891	3.799	3.712	3.635	3.569	3.512	3.463	3.420
5	4.916	4.761	4.605	4.472	4.361	4.269	4.190	4.123	4.065
6	5.830	5.579	5.362	5.185	5.041	4.923	4.824	4.740	4.668
7	6.699	6.355	6.078	5.860	5.685	5.542	5.423	5.323	5.238
8	7.096	6.761	6.503	6.298	6.132	5.995	5.879	5.781	5.781
9	7.808	7.418	7.120	6.886	6.698	6.543	6.412	6.301	6.301
10	9.105	8.495	8.050	7.715	7.453	7.243	7.070	6.926	6.803

k = 0.94									
Fr_{D1}	M₁								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.934	3.881	3.790	3.704	3.628	3.563	3.506	3.457	3.415
5	4.902	4.751	4.597	4.465	4.355	4.262	4.184	4.117	4.060
6	5.815	5.568	5.353	5.177	5.034	4.917	4.818	4.734	4.663
7	6.684	6.344	6.069	5.851	5.678	5.535	5.417	5.318	5.232
8	7.516	7.085	6.752	6.495	6.291	6.125	5.989	5.873	5.775
9	8.316	7.796	7.408	7.112	6.879	6.691	6.536	6.406	6.296
10	9.088	8.483	8.040	7.707	7.446	7.236	7.064	6.920	6.797
k = 0.93									
Fr_{D1}	M₁								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.919	3.870	3.782	3.697	3.622	3.557	3.501	3.452	3.410
5	4.887	4.740	4.588	4.457	4.348	4.256	4.178	4.112	4.054
6	5.800	5.557	5.343	5.169	5.027	4.910	4.812	4.729	4.657
7	6.668	6.332	6.059	5.843	5.670	5.529	5.411	5.312	5.227
8	7.500	7.073	6.743	6.486	6.283	6.119	5.982	5.868	5.770
9	8.300	7.785	7.398	7.103	6.871	6.684	6.530	6.400	6.290
10	9.072	8.471	8.031	7.698	7.438	7.229	7.058	6.914	6.792
k = 0.91									
Fr_{D1}	M₁								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.890	3.849	3.765	3.682	3.608	3.544	3.489	3.441	3.399
5	4.857	4.718	4.570	4.442	4.334	4.243	4.167	4.101	4.044
6	5.769	5.535	5.325	5.153	5.013	4.897	4.800	4.717	4.646
7	6.637	6.309	6.041	5.827	5.656	5.516	5.399	5.300	5.216
8	7.468	7.050	6.723	6.470	6.269	6.105	5.970	5.856	5.759
9	8.268	7.761	7.379	7.087	6.857	6.671	6.517	6.389	6.279
10	9.040	8.447	8.011	7.681	7.423	7.215	7.045	6.902	6.780

k = 0.9									
Fr_{D1}	M₁								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
4	3.875	3.838	3.756	3.674	3.602	3.538	3.484	3.436	3.394
5	4.841	4.707	4.561	4.434	4.327	4.237	4.161	4.095	4.039
6	5.754	5.523	5.316	5.145	5.006	4.891	4.794	4.712	4.641
7	6.621	6.298	6.031	5.819	5.649	5.509	5.393	5.295	5.210
8	7.452	7.038	6.714	6.462	6.261	6.098	5.964	5.850	5.753
9	8.251	7.749	7.369	7.078	6.849	6.664	6.511	6.383	6.273
10	9.023	8.435	8.001	7.673	7.416	7.209	7.038	6.896	6.774

Bảng 12 Tính toán độ sâu sau khu xoáy theo công thức (3.36) với dữ liệu nghiên cứu

TT	Fr _{D1}	M ₁	Y _{td}	k = 1		k = 0.93		k = 0.92		k = 0.91	
				Y _{tt}	ε %	Y _{tt}	ε %	Y _{tt}	ε %	Y _{tt}	ε %
1	6.231	0.203	5.956	6.096	2.4	5.992	0.6	5.977	0.4	5.962	0.1
2	5.095	0.206	5.014	5.064	1.0	4.964	1.0	4.950	1.3	4.935	1.6
3	5.021	0.263	4.864	4.897	0.7	4.813	1.1	4.800	1.3	4.788	1.6
4	4.667	0.275	4.543	4.560	0.4	4.480	1.4	4.468	1.7	4.456	1.9
5	5.988	0.236	5.671	5.797	2.2	5.703	0.6	5.689	0.3	5.675	0.1
6	4.756	0.248	4.699	4.680	0.4	4.592	2.3	4.579	2.6	4.566	2.8
7	4.488	0.257	4.407	4.421	0.3	4.336	1.6	4.324	1.9	4.311	2.2
8	4.501	0.200	4.403	4.504	2.3	4.404	0.0	4.390	0.3	4.375	0.6
9	5.211	0.248	4.843	5.088	5.1	4.999	3.2	4.986	2.9	4.973	2.7
10	6.279	0.221	5.865	6.085	3.8	5.986	2.1	5.971	1.8	5.957	1.6
11	5.862	0.305	5.377	5.510	2.5	5.434	1.1	5.423	0.9	5.412	0.6
12	8.681	0.305	7.241	7.622	5.3	7.541	4.1	7.530	4.0	7.518	3.8
13	8.492	0.205	7.922	7.980	0.7	7.872	0.6	7.856	0.8	7.840	1.0
14	7.568	0.303	6.518	6.823	4.7	6.744	3.5	6.732	3.3	6.721	3.1
15	5.080	0.406	4.587	4.702	2.5	4.641	1.2	4.632	1.0	4.623	0.8
16	6.838	0.204	6.520	6.620	1.5	6.514	0.1	6.499	0.3	6.484	0.6
17	5.078	0.205	5.086	5.051	0.7	4.951	2.7	4.936	2.9	4.921	3.2
18	4.131	0.406	3.847	3.941	2.4	3.882	0.9	3.874	0.7	3.865	0.5
19	4.735	0.406	4.335	4.427	2.1	4.367	0.7	4.358	0.5	4.350	0.3
20	3.636	0.405	3.556	3.524	0.9	3.471	2.4	3.463	2.6	3.455	2.8
21	4.947	0.306	4.697	4.759	1.3	4.685	0.3	4.674	0.5	4.664	0.7
22	4.261	0.203	4.198	4.268	1.7	4.170	0.7	4.155	1.0	4.140	1.4

TT	F_{rD1}	M_1	Y_{td}	k = 1		k = 0.93		k = 0.92		k = 0.91	
				Y_{tt}	ε %	Y_{tt}	ε %	Y_{tt}	ε %	Y_{tt}	ε %
Max	8.681	0.406	7.922	7.980	5.3	7.872	4.1	7.856	4.0	7.840	3.8
Min	3.636	0.200	3.556	3.524	0.3	3.471	0.0	3.463	0.3	3.455	0.1

6.4 Tính giá trị độ sâu sau khu xoáy theo phương pháp lý thuyết với k = 0,92

Bảng 13 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo phương pháp lý thuyết

TT	Giá trị thực đo					Giá trị tính toán			b (cm)
	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	F_{rD1}	M_1	Y_{tt}	y _r (m)	ε (%)	
1	0.104	0.052	0.268	4.848	0.095	5.178	0.269	0.5	55
2	0.118	0.056	0.3	4.903	0.102	5.180	0.290	3.3	
3	0.118	0.062	0.264	4.185	0.113	4.328	0.268	1.7	
4	0.201	0.065	0.443	6.621	0.118	6.877	0.447	0.9	
5	0.201	0.079	0.398	4.875	0.144	4.931	0.390	2.1	
6	0.104	0.056	0.25	4.322	0.102	4.525	0.253	1.4	
7	0.104	0.041	0.332	6.998	0.075	7.820	0.321	3.4	
8	0.06	0.04	0.182	4.194	0.073	4.597	0.184	1.0	
9	0.155	0.048	0.451	8.179	0.087	8.869	0.426	5.6	
10	0.165	0.071	0.329	4.733	0.129	4.854	0.345	4.8	
11	0.193	0.081	0.36	4.500	0.147	4.521	0.366	1.7	
12	0.073	0.04	0.223	5.103	0.073	5.679	0.227	1.9	
13	0.193	0.055	0.488	8.247	0.100	8.694	0.478	2.0	
14	0.078	0.057	0.286	4.996	0.170	4.961	0.283	1.1	33.5
15	0.078	0.041	0.353	8.402	0.122	8.564	0.351	0.5	
16	0.078	0.06	0.274	4.604	0.179	4.543	0.273	0.5	
17	0.129	0.058	0.457	8.037	0.173	7.719	0.448	2.0	
18	0.129	0.068	0.405	6.231	0.203	5.977	0.406	0.4	
19	0.108	0.069	0.346	5.095	0.206	4.950	0.342	1.3	
20	0.158	0.088	0.428	5.021	0.263	4.800	0.422	1.3	
21	0.158	0.092	0.418	4.667	0.275	4.468	0.411	1.7	
22	0.158	0.079	0.448	5.988	0.236	5.689	0.449	0.3	
23	0.04	0.042	0.185	4.149	0.125	4.240	0.178	3.7	
24	0.04	0.04	0.186	4.478	0.119	4.623	0.185	0.6	
25	0.136	0.083	0.39	4.756	0.248	4.579	0.380	2.6	
26	0.101	0.056	0.373	6.654	0.167	6.535	0.366	1.9	

TT	Giá trị thực đo					Giá trị tính toán			b (cm)
	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	Fr _{D1}	M ₁	Y _{tt}	y _r (m)	ε (%)	
27	0.101	0.061	0.355	5.806	0.182	5.685	0.347	2.3	
28	0.136	0.086	0.379	4.488	0.257	4.324	0.372	1.9	
29	0.136	0.065	0.434	7.063	0.194	6.742	0.438	1.0	
30	0.091	0.049	0.362	7.407	0.146	7.365	0.361	0.3	
31	0.091	0.054	0.347	6.352	0.161	6.288	0.340	2.1	
32	0.091	0.067	0.295	4.501	0.200	4.390	0.294	0.3	
33	0.149	0.083	0.402	5.211	0.248	4.986	0.414	2.9	
34	0.149	0.074	0.434	6.279	0.221	5.971	0.442	1.8	
35	0.065	0.061	0.328	5.862	0.305	5.423	0.331	0.9	20
36	0.096	0.0609	0.441	8.681	0.305	7.530	0.459	4.0	
37	0.049	0.0409	0.324	8.492	0.205	7.856	0.321	0.8	
38	0.083	0.0606	0.395	7.568	0.303	6.732	0.408	3.3	
39	0.091	0.0811	0.372	5.080	0.406	4.632	0.376	1.0	
40	0.0393	0.0408	0.266	6.838	0.204	6.499	0.265	0.3	
41	0.0293	0.0409	0.208	5.078	0.205	4.936	0.202	2.9	
42	0.074	0.0811	0.312	4.131	0.406	3.874	0.314	0.7	
43	0.085	0.0812	0.352	4.735	0.406	4.358	0.354	0.5	
44	0.065	0.081	0.288	3.636	0.405	3.463	0.281	2.6	
45	0.055	0.0611	0.287	4.947	0.306	4.674	0.286	0.5	
46	0.0242	0.0405	0.17	4.261	0.203	4.155	0.168	1.0	
Max	0.201	0.092	0.488	8.681	0.406	8.869	0.478	5.6	55
Min	0.0242	0.04	0.170	3.636	0.073	3.463	0.168	0.3	20

6.5 Dữ liệu phân tích về xây dựng công thức thực nghiệm độ sâu sau khu xoáy

Bảng 14 Dữ liệu nghiên cứu xây dựng công thức thực nghiệm

TT	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)	M ₁	Fr ₁	Fr _{D1}	b (m)
1	0.104	0.052	0.268	1.1	0.095	4.652	4.848	0.55
2	0.118	0.056	0.3	1.3	0.102	4.691	4.903	0.55
3	0.104	0.056	0.25	1.1	0.102	4.135	4.322	0.55
4	0.104	0.041	0.332	1.3	0.075	6.768	6.998	0.55
5	0.06	0.04	0.182	0.8	0.073	4.059	4.194	0.55
6	0.155	0.048	0.451	1.8	0.087	7.869	8.179	0.55
7	0.165	0.071	0.331	1.5	0.129	4.484	4.733	0.55

TT	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	L _r (m)	M ₁	Fr ₁	Fr _{D1}	b (m)
8	0.193	0.081	0.36	1.8	0.147	4.236	4.500	0.55
9	0.073	0.04	0.223	0.9	0.073	4.938	5.103	0.55
10	0.193	0.055	0.488	2.1	0.100	7.896	8.247	0.55
11	0.078	0.057	0.286	1.2	0.170	4.668	4.996	0.335
12	0.078	0.041	0.353	1.4	0.122	7.978	8.402	0.335
13	0.129	0.058	0.457	2	0.173	7.503	8.037	0.335
14	0.129	0.068	0.405	1.9	0.203	5.764	6.231	0.335
15	0.108	0.069	0.346	1.5	0.206	4.709	5.095	0.335
16	0.158	0.088	0.428	2.1	0.263	4.568	5.021	0.335
17	0.158	0.092	0.418	2	0.275	4.234	4.667	0.335
18	0.158	0.079	0.448	2.1	0.236	5.488	5.988	0.335
19	0.04	0.042	0.185	0.8	0.125	3.936	4.149	0.335
20	0.101	0.056	0.373	1.6	0.167	6.223	6.654	0.335
21	0.101	0.061	0.355	1.7	0.182	5.405	5.806	0.335
22	0.136	0.086	0.379	1.7	0.257	4.090	4.488	0.335
23	0.136	0.065	0.434	2	0.194	6.550	7.063	0.335
24	0.091	0.049	0.362	1.5	0.146	6.976	7.407	0.335
25	0.091	0.054	0.347	1.5	0.161	5.952	6.352	0.335
26	0.091	0.067	0.295	1.4	0.200	4.167	4.501	0.335
27	0.149	0.083	0.402	1.9	0.248	4.759	5.211	0.335
28	0.065	0.061	0.328	1.4	0.305	5.278	5.862	0.2
29	0.096	0.0609	0.441	2	0.305	7.817	8.681	0.2
30	0.049	0.0409	0.324	1.3	0.205	7.851	8.492	0.2
31	0.083	0.0606	0.395	1.7	0.303	6.816	7.568	0.2
32	0.091	0.0811	0.372	1.7	0.406	4.475	5.080	0.2
33	0.0393	0.0408	0.266	1.1	0.204	6.323	6.838	0.2
34	0.0293	0.0409	0.208	0.9	0.205	4.695	5.078	0.2
35	0.074	0.0811	0.312	1.4	0.406	3.639	4.131	0.2
36	0.0242	0.0405	0.17	0.7	0.203	3.942	4.261	0.2
37	0.0579	0.0408	0.367	1.6	0.204	9.315	10.074	0.2
Max	0.193	0.092	0.488	2.1	0.406	9.315	10.074	0.55
Min	0.0242	0.04	0.17	0.7	0.073	3.639	4.131	0.2

6.6 Tính toán độ sâu sau khu xoáy theo công thức thực nghiệm

Bảng 15 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy nước nhảy theo công thức thực nghiệm

TT	Giá trị thực đo					Giá trị tính toán		
	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	Fr ₁	M ₁	Y _{tt}	y _r (m)	ε (%)
1	0.104	0.052	0.268	4.652	0.095	5.366	0.279	4.1
2	0.118	0.056	0.3	4.691	0.102	5.361	0.300	0.1
3	0.104	0.056	0.25	4.135	0.102	4.763	0.267	6.7
4	0.104	0.041	0.332	6.768	0.075	7.842	0.322	3.2
5	0.06	0.04	0.182	4.059	0.073	4.874	0.195	7.1
6	0.155	0.048	0.451	7.869	0.087	8.862	0.425	5.7
7	0.165	0.071	0.331	4.484	0.129	4.994	0.355	7.1
8	0.193	0.081	0.36	4.236	0.147	4.661	0.378	4.9
9	0.073	0.04	0.223	4.938	0.073	5.856	0.234	5.0
10	0.193	0.055	0.488	7.896	0.100	8.746	0.481	1.4
11	0.078	0.057	0.286	4.668	0.170	5.017	0.286	0.0
12	0.078	0.041	0.353	7.978	0.122	8.619	0.353	0.1
13	0.129	0.058	0.457	7.503	0.173	7.806	0.453	0.9
14	0.129	0.068	0.405	5.764	0.203	5.983	0.407	0.5
15	0.108	0.069	0.346	4.709	0.206	4.943	0.341	1.4
16	0.158	0.088	0.428	4.568	0.263	4.667	0.411	4.0
17	0.158	0.092	0.418	4.234	0.275	4.323	0.398	4.9
18	0.158	0.079	0.448	5.488	0.236	5.613	0.443	1.0
19	0.04	0.042	0.185	3.936	0.125	4.436	0.186	0.7
20	0.101	0.056	0.373	6.223	0.167	6.580	0.369	1.2
21	0.101	0.061	0.355	5.405	0.182	5.708	0.348	1.9
22	0.136	0.086	0.379	4.090	0.257	4.219	0.363	4.3
23	0.136	0.065	0.434	6.550	0.194	6.781	0.441	1.6
24	0.091	0.049	0.362	6.976	0.146	7.440	0.365	0.7
25	0.091	0.054	0.347	5.952	0.161	6.339	0.342	1.4
26	0.091	0.067	0.295	4.167	0.200	4.425	0.296	0.5
27	0.149	0.083	0.402	4.759	0.248	4.883	0.405	0.8
28	0.065	0.061	0.328	5.278	0.305	5.247	0.320	2.4
29	0.096	0.0609	0.441	7.817	0.305	7.580	0.462	4.7
30	0.049	0.0409	0.324	7.851	0.205	7.984	0.327	0.8
31	0.083	0.0606	0.395	6.816	0.303	6.672	0.404	2.4
32	0.091	0.0811	0.372	4.475	0.406	4.345	0.352	5.3
33	0.0393	0.0408	0.266	6.323	0.204	6.521	0.266	0.0
34	0.0293	0.0409	0.208	4.695	0.205	4.934	0.202	3.0
35	0.074	0.0811	0.312	3.639	0.406	3.581	0.290	6.9

TT	Giá trị thực đo					Giá trị tính toán		
	Q (m ³ /s)	y ₁ (m)	y _r (m)	Fr ₁	M ₁	Y _{tt}	y _r (m)	ε (%)
36	0.0242	0.0405	0.17	3.942	0.203	4.194	0.170	0.1
37	0.0579	0.0408	0.367	9.315	0.204	9.372	0.382	4.2
Max	0.193	0.092	0.488	9.315	0.406	9.372	0.481	7.1
Min	0.0242	0.04	0.17	3.639	0.073	3.581	0.170	0.0

6.7 Tính độ sâu sau khu xoáy theo A.N. Rakhmanov (1930)

Bảng 16 Độ sâu dòng chảy sau khu xoáy theo A.N. Rakhmanov (1930)

TT	Giá trị thực đo				Giá trị tính toán		
	Q	b	y ₁	y _r	y _c	y _r	ε
	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(%)
1	0.104	0.55	0.052	0.268	0.141	0.297	11.0
2	0.118	0.55	0.056	0.3	0.152	0.321	7.0
3	0.118	0.55	0.062	0.264	0.152	0.300	13.7
4	0.201	0.55	0.065	0.443	0.209	0.491	10.8
5	0.201	0.55	0.079	0.398	0.209	0.434	9.0
6	0.104	0.55	0.056	0.25	0.141	0.283	13.3
7	0.104	0.55	0.041	0.332	0.141	0.345	3.8
8	0.06	0.55	0.04	0.182	0.1	0.200	9.9
9	0.155	0.55	0.048	0.451	0.179	0.459	1.7
10	0.165	0.55	0.071	0.329	0.186	0.384	16.6
11	0.193	0.55	0.081	0.36	0.204	0.410	13.9
12	0.073	0.55	0.04	0.223	0.113	0.245	9.8
13	0.193	0.55	0.055	0.488	0.204	0.521	6.8
14	0.078	0.335	0.057	0.286	0.151	0.314	9.7
15	0.078	0.335	0.041	0.353	0.151	0.384	8.9
16	0.078	0.335	0.06	0.274	0.151	0.303	10.7
17	0.129	0.335	0.058	0.457	0.201	0.494	8.0
18	0.129	0.335	0.068	0.405	0.201	0.448	10.6
19	0.108	0.335	0.069	0.346	0.182	0.377	9.0
20	0.158	0.335	0.088	0.428	0.225	0.457	6.7
21	0.158	0.335	0.092	0.418	0.225	0.443	6.1
22	0.158	0.335	0.079	0.448	0.225	0.490	9.4
23	0.04	0.335	0.042	0.185	0.102	0.200	8.1

TT	Giá trị thực đo				Giá trị tính toán		
	Q	b	y ₁	y _r	y _c	y _r	ε
	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(%)
24	0.04	0.335	0.04	0.186	0.102	0.207	11.1
25	0.136	0.335	0.083	0.39	0.207	0.413	6.0
26	0.101	0.335	0.056	0.373	0.175	0.404	8.3
27	0.101	0.335	0.061	0.355	0.175	0.383	7.8
28	0.136	0.335	0.086	0.379	0.207	0.404	6.5
29	0.136	0.335	0.065	0.434	0.207	0.483	11.4
30	0.091	0.335	0.049	0.362	0.165	0.398	10.1
31	0.091	0.335	0.054	0.347	0.165	0.376	8.2
32	0.091	0.335	0.067	0.295	0.165	0.327	10.7
33	0.149	0.335	0.083	0.402	0.218	0.450	12.1
34	0.149	0.335	0.074	0.434	0.218	0.485	11.7
35	0.065	0.2	0.061	0.328	0.167	0.355	8.1
36	0.096	0.2	0.0609	0.441	0.205	0.495	12.2
37	0.049	0.2	0.0409	0.324	0.143	0.353	9.0
38	0.083	0.2	0.0606	0.395	0.19	0.439	11.2
39	0.091	0.2	0.0811	0.372	0.199	0.393	5.7
40	0.0393	0.2	0.0408	0.266	0.127	0.292	9.9
41	0.0293	0.2	0.0409	0.208	0.108	0.224	7.7
42	0.074	0.2	0.0811	0.312	0.179	0.329	5.4
43	0.085	0.2	0.0812	0.352	0.192	0.370	5.1
44	0.065	0.2	0.081	0.288	0.167	0.293	1.6
45	0.055	0.2	0.0611	0.287	0.153	0.306	6.7
46	0.0242	0.2	0.0405	0.17	0.097	0.188	10.9
Max	0.201	0.55	0.092	0.488	0.225	0.521	16.6
Min	0.0242	0.2	0.04	0.17	0.097	0.188	1.6

6.8 Dữ liệu thí nghiệm phân tích chiều dài khu xoáy

Bảng 17 Phân tích dữ liệu thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

TT	Q (m ³ /s)	b (m)	y ₁ (m)	L _r (m)	L _r /y ₁ đo	K _{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	Ln(Mn)
1	0.104	0.55	0.052	1.1	21.154	2.6601	0.335	3821	8.248
2	0.118	0.55	0.056	1.3	23.214	3.2051	0.361	4342	8.376
3	0.104	0.55	0.056	1.1	19.643	2.4610	0.271	2380	7.775
4	0.104	0.55	0.041	1.3	31.707	3.4792	0.641	16839	9.731

TT	Q (m ³ /s)	b (m)	y ₁ (m)	Lr (m)	Lr/y ₁ đo	K _{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	Ln(Mn)
5	0.06	0.55	0.04	0.8	20.000	1.4176	0.177	2149	7.673
6	0.155	0.55	0.048	1.9	39.583	5.8509	1.077	31176	10.347
7	0.165	0.55	0.071	1.5	21.127	3.9716	0.437	3212	8.075
8	0.193	0.55	0.081	1.7	20.988	4.6839	0.430	2786	7.933
9	0.073	0.55	0.04	0.9	22.500	1.8946	0.296	4552	8.423
10	0.193	0.55	0.055	2	36.364	6.8240	1.274	28207	10.247
11	0.078	0.335	0.057	1.2	21.053	1.9446	0.382	3826	8.250
12	0.078	0.335	0.041	1.4	34.146	2.5137	0.988	24389	10.102
13	0.129	0.335	0.058	2	34.483	4.1815	1.227	21648	9.983
14	0.129	0.335	0.068	1.9	27.941	3.5504	0.783	8295	9.023
15	0.108	0.335	0.069	1.5	21.739	2.7706	0.477	4205	8.344
16	0.158	0.335	0.088	2.1	23.864	4.1972	0.566	4199	8.343
17	0.158	0.335	0.092	2	21.739	4.1034	0.486	3245	8.085
18	0.158	0.335	0.079	2.1	26.582	4.3723	0.810	7446	8.915
19	0.04	0.335	0.042	0.8	19.048	0.9261	0.173	1933	7.567
20	0.101	0.335	0.056	1.6	28.571	2.9493	0.760	11093	9.314
21	0.101	0.335	0.061	1.7	27.869	2.7832	0.588	6912	8.841
22	0.136	0.335	0.086	1.7	19.767	3.4366	0.413	2767	7.925
23	0.136	0.335	0.065	2	30.769	3.9344	1.017	12610	9.442
24	0.091	0.335	0.049	1.5	30.612	2.7206	0.873	15382	9.641
25	0.091	0.335	0.054	1.5	27.778	2.5979	0.656	9442	9.153
26	0.091	0.335	0.067	1.4	20.896	2.1477	0.342	2546	7.842
27	0.149	0.335	0.083	1.9	22.892	3.7249	0.608	4241	8.353
28	0.065	0.2	0.061	1.4	22.951	1.6782	0.575	5958	8.693
29	0.096	0.2	0.0609	2	32.841	2.8199	1.475	20430	9.925
30	0.049	0.2	0.0409	1.3	31.785	1.4776	0.973	21144	9.959
31	0.083	0.2	0.0606	1.7	28.053	2.3102	1.067	13231	9.490
32	0.091	0.2	0.0811	1.7	20.962	2.2844	0.512	3698	8.215
33	0.0393	0.2	0.0408	1.1	26.961	1.0523	0.585	9885	9.199
34	0.0293	0.2	0.0409	0.9	22.005	0.7062	0.278	3645	8.201
35	0.074	0.2	0.0811	1.4	17.263	1.7138	0.295	1729	7.455
36	0.0242	0.2	0.0405	0.7	17.284	0.5170	0.178	1768	7.478
37	0.0579	0.2	0.0408	1.6	39.216	1.8449	1.440	35267	10.471
Max	0.193	0.55	0.092	2.1	39.583	6.824	1.475	35267	10.471
Min	0.0242	0.2	0.04	0.7	17.263	0.517	0.173	1729	7.455

6.9 Bảng tính chiều dài khu xoáy theo công thức bán thực nghiệm

Bảng 18 Chiều dài khu xoáy của nước nhảy theo công thức bán thực nghiệm

Giá trị thực đo						Giá trị tính toán		
TT	Lr (m)	K _{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	Ln(Mn)	Lr/y ₁	Lr (m)	ε (%)
1	1.1	2.66	0.335	3821	8.248	21.928	1.140	3.7
2	1.3	3.21	0.361	4342	8.376	22.625	1.267	2.5
3	1.1	2.46	0.271	2380	7.775	19.617	1.099	0.1
4	1.3	3.48	0.641	16839	9.731	31.947	1.310	0.8
5	0.8	1.42	0.177	2149	7.673	19.176	0.767	4.1
6	1.9	5.85	1.077	31176	10.347	37.347	1.793	5.7
7	1.5	3.97	0.437	3212	8.075	21.030	1.493	0.5
8	1.7	4.68	0.430	2786	7.933	20.339	1.647	3.1
9	0.9	1.89	0.296	4552	8.423	22.892	0.916	1.7
10	2	6.82	1.274	28207	10.247	36.420	2.003	0.2
11	1.2	1.94	0.382	3826	8.250	21.935	1.250	4.2
12	1.4	2.51	0.988	24389	10.102	35.107	1.439	2.8
13	2	4.18	1.227	21648	9.983	34.062	1.976	1.2
14	1.9	3.55	0.783	8295	9.023	26.639	1.811	4.7
15	1.5	2.77	0.477	4205	8.344	22.448	1.549	3.3
16	2.1	4.20	0.566	4199	8.343	22.440	1.975	6.0
17	2	4.10	0.486	3245	8.085	21.081	1.939	3.0
18	2.1	4.37	0.810	7446	8.915	25.913	2.047	2.5
19	0.8	0.93	0.173	1933	7.567	18.738	0.787	1.6
20	1.6	2.95	0.760	11093	9.314	28.702	1.607	0.5
21	1.7	2.78	0.588	6912	8.841	25.427	1.551	8.8
22	1.7	3.44	0.413	2767	7.925	20.305	1.746	2.7
23	2	3.93	1.017	12610	9.442	29.663	1.928	3.6
24	1.5	2.72	0.873	15382	9.641	31.215	1.530	2.0
25	1.5	2.60	0.656	9442	9.153	27.538	1.487	0.9
26	1.4	2.15	0.342	2546	7.842	19.919	1.335	4.7
27	1.9	3.72	0.608	4241	8.353	22.495	1.867	1.7
28	1.4	1.68	0.575	5958	8.693	24.487	1.494	6.7
29	2	2.82	1.475	20430	9.925	33.563	2.044	2.2
30	1.3	1.48	0.973	21144	9.959	33.858	1.385	6.5
31	1.7	2.31	1.067	13231	9.490	30.032	1.820	7.1
32	1.7	2.28	0.512	3698	8.215	21.754	1.764	3.8
33	1.1	1.05	0.585	9885	9.199	27.864	1.137	3.4

Giá trị thực đo						Giá trị tính toán		
TT	Lr (m)	K _{tb} (m ³ /s)	ΔE (m)	Mn	Ln(Mn)	Lr/y ₁	Lr (m)	ε (%)
34	0.9	0.71	0.278	3645	8.201	21.678	0.887	1.5
35	1.4	1.71	0.295	1729	7.455	18.300	1.484	6.0
36	0.7	0.52	0.178	1768	7.478	18.386	0.745	6.4
37	1.6	1.84	1.440	35267	10.471	38.515	1.571	1.8
Max	2.1	6.82	1.475	35267	10.471	38.515	2.047	8.8
Min	0.7	0.52	0.173	1729	7.455	18.300	0.745	0.1

6.10 Tính toán chiều dài khu xoáy theo công thức thực nghiệm

Bảng 19 Kết quả tính toán phân tích dữ liệu chiều dài khu xoáy của nước nhảy

TT	Giá trị thực đo						Giá trị phân tích		
	e/y ₁	y _r /y ₁	Fr ₁	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	Lr (m)	Lr/y ₁	Lr (m)	ε (%)
1	0.00962	5.154	4.652	0.031	0.219	1.1	22.325	1.161	5.5
2	0.00893	5.357	4.691	0.034	0.255	1.3	23.034	1.290	0.8
3	0.00893	4.464	4.135	0.034	0.200	1.1	19.676	1.102	0.2
4	0.01220	8.098	6.768	0.024	0.293	1.3	32.890	1.348	3.7
5	0.01250	4.550	4.059	0.024	0.133	0.8	19.733	0.789	1.3
6	0.01042	9.396	7.869	0.029	0.451	1.9	37.611	1.805	5.0
7	0.00704	4.662	4.484	0.044	0.292	1.5	20.769	1.475	1.7
8	0.00617	4.444	4.236	0.051	0.328	1.7	19.903	1.612	5.2
9	0.01250	5.575	4.938	0.024	0.172	0.9	23.770	0.951	5.6
10	0.00909	8.873	7.896	0.033	0.507	2.0	36.279	1.995	0.2
11	0.00877	5.018	4.668	0.022	0.178	1.2	22.243	1.268	5.7
12	0.01220	8.610	7.978	0.015	0.243	1.4	35.749	1.466	4.7
13	0.00862	7.879	7.503	0.023	0.362	2.0	33.470	1.941	2.9
14	0.00735	5.956	5.764	0.027	0.300	1.9	26.308	1.789	5.8
15	0.00725	5.014	4.709	0.028	0.236	1.5	22.390	1.545	3.0
16	0.00568	4.864	4.568	0.037	0.327	2.1	21.925	1.929	8.1
17	0.00543	4.543	4.234	0.039	0.315	2.0	20.596	1.895	5.3
18	0.00633	5.671	5.488	0.033	0.351	2.1	25.271	1.996	4.9
19	0.01190	4.405	3.936	0.016	0.096	0.8	19.403	0.815	1.9
20	0.00893	6.661	6.223	0.022	0.264	1.6	28.722	1.608	0.5
21	0.00820	5.820	5.405	0.024	0.245	1.7	25.478	1.554	8.6
22	0.00581	4.407	4.090	0.036	0.271	1.7	19.969	1.717	1.0
23	0.00769	6.677	6.550	0.026	0.334	2.0	29.182	1.897	5.2

TT	Giá trị thực đo						Giá trị phân tích		
	e/y_1	y_r/y_1	Fr_1	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	L_r (m)	L_r/y_1	L_r (m)	ε (%)
24	0.01020	7.388	6.976	0.019	0.252	1.5	31.467	1.542	2.8
25	0.00926	6.426	5.952	0.021	0.237	1.5	27.746	1.498	0.1
26	0.00746	4.403	4.167	0.027	0.186	1.4	19.882	1.332	4.9
27	0.00602	4.843	4.759	0.035	0.296	1.9	22.015	1.827	3.8
28	0.00820	5.377	5.278	0.016	0.173	1.4	24.326	1.484	6.0
29	0.00821	7.241	7.817	0.016	0.283	2.0	32.314	1.968	1.6
30	0.01222	7.922	7.851	0.010	0.170	1.3	34.025	1.392	7.0
31	0.00825	6.518	6.816	0.016	0.235	1.7	29.258	1.773	4.3
32	0.00617	4.587	4.475	0.023	0.213	1.7	21.214	1.720	1.2
33	0.01225	6.520	6.323	0.010	0.124	1.1	28.531	1.164	5.8
34	0.01222	5.086	4.695	0.010	0.085	0.9	22.595	0.924	2.7
35	0.00617	3.847	3.639	0.023	0.160	1.4	17.931	1.454	3.9
36	0.01235	4.198	3.942	0.010	0.063	0.7	18.994	0.769	9.9
37	0.01225	8.995	9.315	0.010	0.208	1.6	38.372	1.566	2.2
Max	0.00543	9.396	9.315	0.051	0.507	2.100	38.372	1.996	9.9
Min	0.01250	3.847	3.639	0.010	0.063	0.700	17.931	0.769	0.1

Phụ lục 7. Các công thức thực nghiệm trong nghiên cứu về đặc trưng hình học của nước nhảy trong kênh lắng trụ hình thang cân

Dựa trên các tổ hợp nghiên cứu, nghiên cứu đã đề xuất các công thức khác nhau về các đặc trưng hình học của nước nhảy.

7.1 Các công thức thực nghiệm về độ sâu sau khu xoáy của nước nhảy

Ký hiệu	Công thức	R ²	Đặc điểm
Y ₁	$\frac{y_r}{y_1} = 0.31Fr_1^{1.494} + 1.768$	0.942	Samir Kateb (2014), Samir Kateb et al. (2015), S. Cherhabil et al. (2016), SIAD, Rafik (2018), Bahador F.N et al. (2019) etc.
Y ₂	$\frac{y_r}{y_1} = 0.195M_1^{-0.192}Fr_D^{1.456} + 1.919$	0.951	Wanoschek R. & Hager W. (1989), Sadiq S.M (2012), Shahin S.A et al.(2018)
Y ₃	$\frac{y_r}{y_1} = 0.137M_1^{-0.18}(Fr_{D1} + 1)^{1.576} + 1.591$	0.952	-
Y ₄	$\frac{y_r}{y_1} = 0.269M_1^{-0.21}(Fr_{D1} - 1)^{1.334} + 2.307$	0.950	Ohtsu and Yasuda (1991), Carollo et al. (2009), Carollo et al. (2013) etc
Y ₅	$\frac{y_r}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 5.329Fr_{D1}^2} - 1 \right]$	0.938	Bélanger (1828), etc.
Y ₆	$\frac{y_r}{y_1} = 0,959M_1^{-0,12}Fr_1^{0,936}$	0.978	

7.2 Các công thức thực nghiệm về chiều dài khu xoáy của nước nhảy

Ký hiệu	Công thức	R ²	Đặc điểm
Lr ₁	$\frac{Lr}{y_1} = 2.285 + 2.956 Fr_1 + 1.896 \frac{y_2 - y_1}{y_1} - 0.142 \frac{\Delta E}{y_1}$	0.957	Tuyến tính
Lr ₂	$Lr = 1.850(1.716 + 10.872M)(y_2 - y_1)$	0.903	Silvester, R (1964)
Lr ₃	$\frac{Lr}{y_1} = 4.952Fr_1^{0.986} + 1.679$	0.942	Rajaratnam et al. (1968), Kateb S. (2014), SIAD R. (2018) etc
Lr ₄	$\frac{Lr}{y_1} = 6.607 \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^{0.276} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_{D1}^{0.484}$	0.960	Phi tuyển
Lr ₅	$\frac{Lr}{y_1} = 3,038 \left[\left(\frac{y_r}{y_1} \right)^{0.94} + \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) Fr_1^{0.683} + 0,578 \right]$	0.966	Rút gọn công thức bán thực nghiệm