

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP & PTNT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

ĐOÀN THỊ MINH YẾN

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO
KHI KỂ ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA MỰC NƯỚC HẠ LƯU**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2018

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

ĐOÀN THỊ MINH YẾN

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO
KHI KỂ ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA MỰC NƯỚC HẠ LƯU**

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình thủy

Mã số : 62-58-02-02

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. LÊ VĂN NGHỊ
2. PGS.TS. ĐẶNG HOÀNG THANH

HÀ NỘI - 2018

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các kết quả nghiên cứu được trình bày trong luận án là trung thực, khách quan và chưa từng được bảo vệ ở bất kỳ học vị nào.

Tôi xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện luận án đã được cảm ơn, các thông tin trích dẫn trong luận án này đều được chỉ rõ nguồn gốc.

Hà Nội, ngày 08 tháng 6 năm 2018

Tác giả luận án

Đoàn Thị Minh Yến

LỜI CẢM ƠN

L luận án này được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

Để thực hiện luận án này, tôi đã nhận được sự chỉ bảo, giúp đỡ, động viên rất nhiều từ các thầy hướng dẫn, đơn vị công tác, cơ sở đào tạo, các nhà khoa học và những người thân, bạn bè, đồng nghiệp.

Lời đầu tiên tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến các thầy hướng dẫn khoa học là GS. Trần Đình Hợi, PGS.TS. Đặng Hoàng Thanh và đặc biệt là PGS.TS Lê Văn Nghị, đã tận tình giảng dạy, chỉ bảo, động viên, khích lệ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn lãnh đạo, các cán bộ khoa học, Trung tâm Nghiên cứu Thủy lực; Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển; Ban Tổ chức - Hành chính; Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã hỗ trợ, động viên và tạo điều kiện cho tôi hoàn thành nghiên cứu của luận án này.

Tôi xin chân thành cảm ơn các nhà khoa học thuộc các Bộ, Ngành, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Hội Đập lớn Việt Nam, Trường Đại học Thủy lợi, Trường Đại học Bách khoa TP Hồ Chí Minh, các quý thầy cô trong các hội đồng, đã nhiệt tình chỉ bảo, cung cấp các tài liệu, đóng góp nhiều ý kiến quý báu để tôi hoàn thiện luận án.

Đặc biệt tôi xin cảm ơn gia đình, người thân, bạn bè, đồng nghiệp đã ủng hộ, động viên, khích lệ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu để tôi hoàn thành luận án tiến sĩ kỹ thuật này.

Hà Nội, ngày 08 tháng 06 năm 2018

Tác giả luận án

Đoàn Thị Minh Yến

MỤC LỤC

| | |
|---|------|
| LỜI CAM ĐOAN | i |
| LỜI CẢM ƠN | ii |
| MỤC LỤC | iii |
| DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU | vii |
| DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ..... | viii |
| CÁC KÝ HIỆU, TỪ VIẾT TẮT DÙNG TRONG LUẬN ÁN | xiii |
| MỞ ĐẦU 1 | |
| 1. Tính cấp thiết | 1 |
| 2. Mục đích nghiên cứu | 2 |
| 3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu | 2 |
| 4. Nội dung nghiên cứu | 3 |
| 5. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu..... | 3 |
| 6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn | 4 |
| 7. Các đóng góp mới của luận án | 4 |
| 8. Bố cục của luận án..... | 5 |
| Chương 1 TỔNG QUAN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU TRÀN PIANO | 6 |
| 1.1 GIỚI THIỆU VỀ TRÀN PIANO..... | 6 |
| 1.1.1 Sự ra đời và phát triển..... | 6 |
| 1.1.2 Phân loại tràn | 7 |
| 1.1.3 Thành tựu ứng dụng..... | 9 |
| 1.1.4 Quá trình hoàn thiện cấu tạo tràn piano..... | 12 |
| 1.2 CÁC ĐẶC TRƯNG ẢNH HƯỞNG TỚI KHẢ NĂNG THÁO QUÁ TRÀN PIANO | 16 |
| 1.2.1 Dòng chảy ép sát qua tràn..... | 16 |
| 1.2.2 Tràn chảy tự do – đơn vị tràn tiêu chuẩn | 17 |
| 1.2.3 Tràn chảy ngập..... | 22 |
| 1.3 CÁC CÔNG THỨC TÍNH KHẢ NĂNG THÁO QUÁ TRÀN PIANO | 25 |
| 1.3.1 Dạng công thức | 25 |
| 1.3.2 Đối tượng nghiên cứu trong xác định hệ số tháo của tràn piano, C_d .. | 26 |
| 1.3.3 Công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano..... | 26 |

| | | |
|---|--|----|
| 1.3.3.1 | Tràn chảy tự do..... | 27 |
| 1.3.3.2 | Tràn chảy ngập | 30 |
| 1.4 | LUẬN BÀN | 33 |
| 1.5 | KẾT LUẬN CHƯƠNG 1 | 35 |
| Chương 2 CƠ SỞ KHOA HỌC NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO | | |
| QUA TRÀN PIANO..... | | 37 |
| 2.1 | PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN..... | 37 |
| 2.1.1 | Đặc điểm dòng chảy qua tràn piano..... | 37 |
| 2.1.2 | Dạng công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano..... | 39 |
| 2.1.2.1 | Tràn piano làm việc như đập tràn thành mỏng..... | 39 |
| 2.1.2.2 | Tràn piano làm việc như đập tràn thực dụng | 40 |
| 2.1.3 | Phương pháp xác định hệ số tháo trong luận án | 40 |
| 2.2 | LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM MÔ HÌNH..... | 42 |
| 2.2.1 | Lý thuyết tương tự để thiết lập mô hình nghiên cứu | 42 |
| 2.2.2 | Tiêu chuẩn tương tự..... | 42 |
| 2.2.3 | Lý thuyết thứ nguyên, định lý hàm Pi | 44 |
| 2.2.4 | Quy hoạch thực nghiệm | 45 |
| 2.2.4.1 | Cơ sở khoa học xây dựng công thức thực nghiệm | 45 |
| 2.2.4.2 | Đánh giá và kiểm định sự phù hợp của công thức thực nghiệm.... | 47 |
| 2.3 | LẬP PHƯƠNG TRÌNH NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM..... | 48 |
| 2.4 | MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU | 53 |
| 2.4.1 | Mô hình vật lý..... | 53 |
| 2.4.1.1 | Thiết kế, xây dựng mô hình | 53 |
| 2.4.1.2 | Thiết bị đo đạc..... | 55 |
| 2.4.1.3 | Sai số mô hình..... | 56 |
| 2.4.1.4 | Điều kiện áp dụng trong thực tế..... | 57 |
| 2.4.1.5 | Các trường hợp thí nghiệm..... | 58 |
| 2.4.1.6 | Đánh giá sự phù hợp của số liệu thực nghiệm | 59 |
| 2.4.2 | Mô hình toán | 62 |
| 2.4.2.1 | Phạm vi mô phỏng, lưới tính toán..... | 62 |
| 2.4.2.2 | Kiểm nghiệm, hiệu chỉnh mô hình..... | 63 |
| 2.5 | KẾT LUẬN CHƯƠNG 2 | 64 |

| | |
|---|-----|
| Chương 3 ĐẶC TRƯNG KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO | 66 |
| 3.1 ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG HỌC, SỰ CHUYỂN ĐỔI CÁC TRẠNG THÁI VÀ NỐI TIẾP DÒNG CHẢY QUA TRÀN PIANO..... | 66 |
| 3.1.1 Dòng chảy trên phím nước vào..... | 66 |
| 3.1.2 Dòng chảy trên phím nước ra | 68 |
| 3.1.3 Nối tiếp dòng chảy ở hạ lưu..... | 71 |
| 3.1.4 Ảnh hưởng của xoáy cuộn hạ lưu tới khả năng tháo qua tràn piano ... | 75 |
| 3.2 RANH GIỚI CÁC TRẠNG THÁI CHẢY QUA TRÀN PIANO | 77 |
| 3.2.1 Ranh giới “chảy đầy phím ra” | 77 |
| 3.2.2 Ranh giới chảy ngập | 80 |
| 3.2.3 Ranh giới ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu..... | 82 |
| 3.2.4 Phân tích ảnh hưởng của trạng thái chảy tới khả năng tháo qua tràn .. | 84 |
| 3.3 XÂY DỰNG CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO | 86 |
| 3.3.1 Điều kiện, các trường hợp xây dựng công thức..... | 86 |
| 3.3.2 Công thức xác định khả năng tháo khi tràn chảy tự do | 88 |
| 3.3.2.1 Khi khả năng tháo không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu | 88 |
| 3.3.2.2 Khi khả năng tháo có ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu..... | 92 |
| 3.3.3 Công thức xác định khả năng tháo khi tràn chảy ngập..... | 93 |
| 3.4 Đánh giá sự phù hợp của công thức thực nghiệm..... | 94 |
| 3.4.1 Trường hợp chảy tự do | 94 |
| 3.4.2 Trường hợp chảy ngập | 99 |
| 3.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3 | 100 |
| Chương 4 LỰA CHỌN KÍCH THƯỚC HỢP LÝ, TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG THÁO CHO CÔNG TRÌNH THỰC TẾ KIỂU PHÍM PIANO | 102 |
| 4.1 ĐẶT VẤN ĐỀ | 102 |
| 4.2 CÁC BƯỚC TÍNH TOÁN, LỰA CHỌN TRÀN PIANO HỢP LÝ.... | 103 |
| 4.2.1 Lựa chọn hình thức tràn piano | 103 |
| 4.2.2 Lựa chọn thông số cấu tạo tràn piano | 103 |
| 4.2.3 Tính toán xác định khả năng tháo qua tràn piano | 107 |
| 4.2.3.1 Trường hợp chảy tự do..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.3.2 Trường hợp chảy ngập | 108 |
| 4.3 ỨNG DỤNG CHO CÔNG TRÌNH THỰC TẾ | 108 |
| 4.3.1 Ứng dụng trong công trình cột nước thấp, đáy kênh hạ lưu hạ thấp . | 108 |
| 4.3.1.1 Giới thiệu và tính toán thông số công trình..... | 108 |
| 4.3.1.2 Tính toán lưu lượng tháo qua tràn Xuân Minh | 109 |
| 4.3.2 Ứng dụng cho công trình có đáy kênh hạ lưu bằng chân phím ra | 114 |
| 4.3.2.1 Giới thiệu về công trình..... | 114 |
| 4.3.2.2 Tính toán lưu lượng..... | 115 |
| 4.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4 | 118 |
| KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ..... | 119 |
| I. KẾT LUẬN..... | 119 |
| II. TỒN TẠI VÀ HẠN CHẾ | 121 |
| III. KIẾN NGHỊ | 122 |
| IV. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO..... | 122 |
| DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ..... | 123 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO..... | 124 |
| Phụ lục 1. CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO CỦA O. MACHIELS VÀ CS | 1 |
| Phụ lục 2. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM KHẢ NĂNG THÁO TRÀN PIANO..... | 2 |
| Phụ lục 3. KHẢO SÁT CÁC DẠNG HÀM CỦA PHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM (3.6) KHI $H_0/W_0 > 0,5$ | 5 |
| Phụ lục 4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN SAI SỐ CHI TIẾT | 8 |

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Bảng 1.1 | Một số công trình ứng dụng tràn piano | 11 |
| Bảng 1.2 | Phạm vi áp dụng của các công thức đã có tính khả năng tháo qua PKW ... | 32 |
| Bảng 2.1 | Các đại lượng ảnh hưởng tới khả năng tháo | 49 |
| Bảng 2.2 | Các trường hợp thí nghiệm khả năng tháo qua tràn | 58 |
| Bảng 2.3 | Tổng hợp các nghiên cứu để kiểm chứng công thức luận án | 59 |
| Bảng 2.4 | Giá trị lưu tốc trung bình mặt cắt của dòng chảy trên phím vào H/P=0,4 64 | |
| Bảng 3.1 | Giá trị lưu tốc dòng đáy ở hạ lưu tràn, dọc theo các phím | 73 |
| Bảng 3.2 | Kết quả thí nghiệm và tính toán cột nước phân giới | 82 |
| Bảng 3.3 | Mức độ giảm khả năng tháo khi kênh hạ lưu PKW thấp/cao | 84 |
| Bảng 3.4 | Các bộ số liệu để xây dựng và kiểm nghiệm công thức | 87 |
| Bảng 3.5 | Hệ số hàm thực nghiệm theo 02 bộ số liệu xây dựng công thức | 90 |
| Bảng 3.6 | Sai số (%) khi tính khả năng tháo theo công thức so với số liệu thực nghiệm của tập xây dựng và tập kiểm định | 90 |
| Bảng 4.1 | Bảng thông số công trình | 109 |
| Bảng 4.2 | Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua tràn Xuân Minh chảy tự do | 110 |
| Bảng 4.3 | Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua tràn Xuân Minh chảy ngập | 112 |
| Bảng 4.4 | Bảng thông số công trình | 115 |
| Bảng 4.5 | Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua PKW Ngàn Trươi chảy tự do | 117 |
| Bảng 4.6 | Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua PKW Ngàn Trươi chảy ngập | 117 |

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

| | | |
|------------------|---|----|
| <i>Hình 1.1</i> | Một số kiểu tràn tuyến cong, tuyến zic zắc tiền thân của PKW..... | 7 |
| <i>Hình 1.2</i> | Các kiểu tràn piano..... | 8 |
| <i>Hình 1.3</i> | Kết cấu tràn piano..... | 8 |
| <i>Hình 1.4</i> | Một số công trình xả lũ ứng dụng tràn piano | 10 |
| <i>Hình 1.5</i> | Mô hình tiêu chuẩn [34] | 13 |
| <i>Hình 1.6</i> | Cấu tạo tràn piano..... | 14 |
| <i>Hình 1.7</i> | Cấu tạo đơn vị tràn tràn piano | 15 |
| <i>Hình 1.8</i> | Hình dạng làn nước qua tràn piano khi cột nước tràn nhỏ | 17 |
| <i>Hình 1.9</i> | Ảnh hưởng hình thức tràn kiểu A & B [43]. | 19 |
| <i>Hình 1.10</i> | Ảnh hưởng của hệ số chiều dài tràn $N=4; 6$ [43]. | 19 |
| <i>Hình 1.11</i> | Ảnh hưởng của $N=L/W$ [36] | 20 |
| <i>Hình 1.12</i> | Ảnh hưởng của W_i/W_o [43]..... | 20 |
| <i>Hình 1.13</i> | Quan hệ $r \sim H/P$, xét ảnh hưởng của P/W_u tới khả năng tháo [27] | 21 |
| <i>Hình 1.14</i> | Ảnh hưởng của H, P đến hiệu quả tháo $\Delta Q\%$ [35]..... | 22 |
| <i>Hình 1.15</i> | Quan hệ giữa $C_{d,n} \sim h_n/H_{n0}$ ứng với các cấp Q , [18]..... | 23 |
| <i>Hình 1.16</i> | Quan hệ giữa $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$, [19] | 23 |
| <i>Hình 1.17</i> | Cấu tạo, kết quả thí nghiệm hệ số ngập đập dâng Văn Phong [5] | 24 |
| <i>Hình 1.18</i> | PKW Ngàn Trươi, $\sigma_n=0,998$ khi $h_n/H = -0,17$ [10]..... | 25 |
| <i>Hình 2.1</i> | Hình dạng làn nước qua đập tràn thành mỏng [1]..... | 38 |
| <i>Hình 2.2</i> | Sơ đồ phương pháp kiểm định công thức thực nghiệm..... | 48 |
| <i>Hình 2.3</i> | Sơ đồ bố trí thí nghiệm..... | 54 |
| <i>Hình 2.4</i> | Mô hình thí nghiệm trong máng kính..... | 54 |
| <i>Hình 2.5</i> | Chi tiết khu vực bố trí tràn piano..... | 54 |
| <i>Hình 2.6</i> | Mặt bằng mô hình thí nghiệm tràn piano | 55 |
| <i>Hình 2.7</i> | So sánh số liệu thực nghiệm của luận án với các nghiên cứu khác..... | 60 |
| <i>Hình 2.8</i> | Sự phù hợp giữa kết quả thí nghiệm của luận án với các tác giả khác..... | 61 |
| <i>Hình 2.9</i> | Sự phù hợp kết quả thí nghiệm σ_n của luận án với các tác giả khác.... | 61 |
| <i>Hình 2.10</i> | Phạm vi mô phỏng, miền lưới tính toán | 63 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Hình 2.11 | Chi tiết lưới tính toán khu vực tràn piano | 63 |
| Hình 2.12 | Kết quả kiểm nghiệm, hiệu chỉnh mô hình | 64 |
| Hình 3.1 | Các thành phần dòng chảy qua PKW | 66 |
| Hình 3.2 | Quá trình thay đổi hình dạng đường mặt nước dọc phím nước vào.... | 67 |
| Hình 3.3 | Đường mặt nước dọc công trình khi tăng cột nước tràn | 68 |
| Hình 3.4 | Lưu hướng và phân bố lưu tốc trên phím vào khi tăng cột nước tràn. | 68 |
| Hình 3.5 | Dòng chảy trên phím nước ra | 69 |
| Hình 3.6 | Đặc điểm dòng chảy trên phím ra khi tăng mực nước thượng lưu..... | 69 |
| Hình 3.7 | Phân bố giá trị lưu tốc trung bình mặt cắt dọc theo tường bên | 70 |
| Hình 3.8 | Lưu hướng dòng chảy và phân bố lưu tốc trên phím ra khi tăng H | 70 |
| Hình 3.9 | Quá trình giảm mức lượn sóng khi tăng mực nước hạ lưu..... | 71 |
| Hình 3.10 | Nối tiếp hạ lưu tràn khi cột nước H nhỏ..... | 72 |
| Hình 3.11 | Nối tiếp hạ lưu tràn khi cột nước H lớn, mực nước hạ lưu thấp/cao. | 72 |
| Hình 3.12 | Giá trị, phân bố lưu tốc dòng đáy ở hạ lưu tràn, dọc theo các phím . | 74 |
| Hình 3.13 | Lưu hướng dòng quần sau tràn nhìn từ hạ lưu | 74 |
| Hình 3.14 | Nối tiếp hạ lưu phím nước vào | 74 |
| Hình 3.15 | Nối tiếp hạ lưu phím nước ra..... | 74 |
| Hình 3.16 | Tràn piano có kênh hạ lưu cao ngang chân phím nước ra..... | 75 |
| Hình 3.17 | Dòng chảy ở hạ lưu PKW khi đáy kênh hạ lưu cao | 76 |
| Hình 3.18 | Dòng chảy ở hạ lưu tràn piano khi $H_0/P_H=0,2$ | 76 |
| Hình 3.19 | Dòng chảy ở hạ lưu tràn khi $H_0/P_H=0,7$ | 76 |
| Hình 3.20 | Dòng chảy ở hạ lưu tràn khi $H_0/P_H=1,0$ | 76 |
| Hình 3.21 | Đường mặt nước trên phím ra, phím vào khi $H/W_0=0,43; 0,5$ | 78 |
| Hình 3.22 | Quan hệ thực nghiệm hệ số tháo $C_d \sim H_0/W_u$ theo vùng H_0/W_0 | 79 |
| Hình 3.23 | Quan hệ $C_d \sim h_n/H_n$ ứng với các trường hợp thí nghiệm..... | 81 |
| Hình 3.24 | Lưu lượng đơn vị qua PKW khi kênh hạ lưu thấp/cao - $P/W_u=0,5$.. | 83 |
| Hình 3.25 | Lưu lượng tháo qua PKW | 83 |
| Hình 3.26 | Quan hệ $C_{d0} \sim H_0/P$ theo số liệu thí nghiệm..... | 89 |
| Hình 3.27 | Quan hệ giữa hệ số ngập và tỷ lệ cột nước $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$ | 93 |

| | | |
|------------------|--|-----|
| Hình 3.28 | Quan hệ giữa hệ số tháo $C_{d,n}$ và tỷ lệ cột nước h_n/H_n ứng với các trường hợp P và H_n/P , khi tràn chảy ngập..... | 94 |
| Hình 3.29 | So sánh kết quả tính theo (3.10), (3.11) và số liệu thực nghiệm..... | 96 |
| Hình 3.30 | So sánh kết quả tính q_{tt} theo (3.8) và số liệu thực nghiệm của luận án, q_{tn} | 96 |
| Hình 3.31 | Kết quả tính q_{tt} theo công thức (3.8) và số liệu thực nghiệm của nghiên cứu khác, q_{tn} | 96 |
| Hình 3.32 | Kết quả tính q_{tt} theo công thức (3.8) và số liệu thực nghiệm của [41], đường nét đứt sai số 10% | 96 |
| Hình 3.33 | So sánh kết quả tính q_{tt} theo (3.8) và số liệu thực nghiệm của [30].. | 97 |
| Hình 3.34 | So sánh công thức (3.8) và kết quả thực nghiệm của [4], [43] và [30] cho PKW loại B..... | 97 |
| Hình 3.35 | Quan hệ $r \sim H/P$ của PKW so với tràn truyền thống | 98 |
| Hình 3.36 | Quan hệ $m_p \sim H/P$ của tràn piano | 99 |
| Hình 3.37 | So sánh kết quả tính hệ số ngập σ_n theo công thức (3.15) và kết quả thí nghiệm của luận án..... | 99 |
| Hình 3.38 | Quan hệ $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$ tính theo công thức (3.15) và (1.18)..... | 100 |
| Hình 4.1 | Tỷ trọng ảnh hưởng của các thông số trong công thức (3.10), (3.11) | 103 |
| Hình 4.2 | Khái quát sơ đồ lựa chọn, tính toán khả năng tháo qua tràn piano ... | 105 |
| Hình 4.3 | Sơ đồ chi tiết lựa chọn, tính toán khả năng tháo qua tràn piano | 106 |
| Hình 4.4 | Cấu tạo tràn piano của thủy điện Xuân Minh, [13]..... | 109 |
| Hình 4.5 | So sánh kết quả (KQ) tính theo công thức (3.9) với kết quả theo thiết kế, thí nghiệm công trình và công thức (1.14), (1.15), tràn chảy tự do | 111 |
| Hình 4.6 | So sánh $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$ giữa kết quả tính theo công thức (3.15) với (1.19) và kết quả thí nghiệm công trình..... | 112 |
| Hình 4.7 | Cấu tạo tràn piano Ngàn Trươi [10]..... | 115 |
| Hình 4.8 | So sánh giữa kết quả thí nghiệm công trình, kết quả tính theo các công thức (3.9) - (3.15) khi tràn chảy tự do và chảy ngập | 116 |
| Hình 4.9 | So sánh với kết quả tính theo công thức (1.12), (1.13), (1.18)..... | 116 |

CÁC ĐỊNH NGHĨA DÙNG TRONG LUẬN ÁN

Tràn piano: là công trình tháo nước có hình dạng giống đàn Piano, đỉnh hình zic zắc, tạo nên các phím nước vào và phím nước ra.

Phím nước vào: là khoang (ô) đón dòng chảy vào từ thượng lưu, gồm hai tường bên và một tường hạ lưu, không có tường ngăn thượng lưu.

Phím nước ra: là khoang (ô) thoát dòng chảy ra hạ lưu, gồm hai tường bên và một tường thượng lưu, không có tường ngăn hạ lưu.

Đơn vị tràn hoặc đơn phím: gồm một phím nước vào và một phím nước ra.

Hốc phím: là phần nhô ra phía thượng lưu hoặc phía hạ lưu so với chân tràn.

Chiều rộng phím: là chiều rộng theo phương vuông góc với chiều dòng chảy tổng thể từ thượng lưu về hạ lưu, tính tới tim tường ngăn giữa các phím (tường bên của phím).

Chiều dài phím: Là chiều dài từ đầu thượng lưu tới đầu hạ lưu phím, theo phương dọc chiều dòng chảy tổng thể.

Chiều rộng tràn: là chiều rộng thoát nước của công trình theo phương vuông góc với dòng chảy tổng thể.

Chiều dài đường tràn: là chiều dài đỉnh tràn theo đường zic zắc.

Chiều dài chân tràn: là chiều dài từ thượng lưu đến hạ lưu phần chân (đế) tràn piano theo phương dọc chiều dòng chảy.

Tràn piano tiêu chuẩn: là tràn có mặt cắt tiêu chuẩn, trong đó tỷ lệ các thông số hình học của tràn nằm trong phạm vi cho tối ưu về khả năng tháo và kinh tế.

Hệ số tháo của tràn piano: là hệ số lưu lượng tính với chiều rộng của tuyến tràn piano. Hay là đại lượng tích hợp của hệ số lưu lượng tính theo chiều dài đường tràn và hệ số chiều dài đường tràn ($C_d=m*N$)

Lưu lượng tháo qua tràn piano: Là tổng lưu lượng từ thượng lưu chảy về hạ lưu qua tràn piano.

Lưu lượng đơn vị thành phần: là lưu lượng tính trung bình cho một đơn vị chiều dài tràn nước của mỗi thành phần tường tràn piano (tường thượng lưu, tường hạ lưu và tường bên).

Chảy đầy phím ra: Khi vị trí điểm giao của hai làn nước chảy qua tường bên từ ô vào đổ sang ô ra nằm phía trên ngưỡng tràn (ở vị trí cao hơn đỉnh tường bên).

Chảy không đầy phím ra: Khi vị trí điểm giao của hai làn nước chảy qua tường bên đổ xuống phím ra nằm phía dưới ngưỡng tràn (ở vị trí thấp hơn đỉnh tường bên).

CÁC KÝ HIỆU, TỪ VIẾT TẮT DÙNG TRONG LUẬN ÁN

- B_L : Chiều rộng máng lườn đo lưu lượng (m);
- B_{mk} : Chiều rộng máng kính (m);
- B : Chiều dài phím tràn (m);
- B_i : Chiều dài hốc thượng lưu phím (m);
- B_o : Chiều dài hốc hạ lưu phím (m);
- C_d : hệ số tháo của tràn piano; $C_d=N.m$; (discharge coefficient);
- C_{d0} : Hệ số tháo của tràn chảy tự do, không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu;
- $C_{d,n}$: Hệ số tháo của tràn piano chảy ngập;
- cs : Cộng sự;
- h_e : Cột nước tính toán qua đập lườn: $h_e = h_L + 0,0011m$;
- h_L : Cột nước trên đỉnh đập lườn, (m);
- H : Cột nước tràn *tự do*, là cột nước trên tràn khi dòng chảy qua tràn ở trạng thái chảy tự do, xác định bởi độ chênh giữa cao trình mực nước thượng lưu với cao trình ngưỡng tràn (m);
- H_0 : Cột nước tràn *tự do* có kể tới lưu tốc tới gần (m);
- H_n : Cột nước tràn *chảy ngập*, là cột nước trên tràn khi dòng chảy qua tràn ở trạng thái chảy ngập (m);
- H_{n0} : Cột nước tràn *chảy ngập* có kể tới lưu tốc tới gần;
- h_n : Độ ngập, là độ chênh giữa cao trình mực nước hạ lưu với cao trình ngưỡng tràn khi dòng chảy qua tràn ở trạng thái chảy ngập (m);
- k_H : Hệ số do ảnh hưởng địa hình hạ lưu (-);
- L : Chiều dài đường tràn zic zắc (m);
- L_u : Chiều dài đường tràn zic zắc cho một đơn vị tràn (m);
- m : Hệ số lưu lượng tính theo chiều dài tràn L (-);
- N : Hệ số chiều dài đường tràn, bằng tỷ lệ giữa chiều dài zic zắc và chiều rộng tràn, $N=L/W=L_u/W_u$;
- P_m : chiều cao đập phía thượng lưu đập lườn.
- PKW: Tràn piano (Piano Key Weir);
- P_p : Chiều cao phím, là chiều cao từ đỉnh ngưỡng tràn đến điểm giao của đường đáy dốc hai phím (m);

- P_i : Chiều cao phím nước vào, là chiều cao từ đỉnh ngưỡng tràn đến chân đáy phím nước vào (m);
- P_o : Chiều cao phím nước ra, là chiều cao từ đỉnh ngưỡng tràn đến chân đáy phím nước ra (m);
- P_T : Chiều cao thượng lưu tràn, là chiều cao từ đỉnh ngưỡng tràn đến đáy kênh thượng lưu (m);
- P_H : Chiều cao hạ lưu tràn, là chiều cao từ đỉnh ngưỡng tràn đến đáy kênh hạ lưu (m);
- P : Chiều cao tràn piano, $P=P_i$ (m);
- Q : Lưu lượng tháo (m^3/s);
- Q_o : Lưu lượng tháo qua tràn mặt cong truyền thống (tràn thực dụng) (m^3/s);
- Q_{TD} : Lưu lượng tháo qua tràn chảy tự do (m^3/s);
- Q_n : Lưu lượng tháo qua tràn chảy ngập (m^3/s);
- q_m : Lưu lượng đơn vị trên mô hình, (m^3/s)/m;
- q_n : Lưu lượng đơn vị trên nguyên hình, (m^3/s)/m
- $q_P(q)$: Lưu lượng đơn vị qua tràn piano, là lưu lượng tính trung bình cho một đơn vị chiều rộng của tràn, $q=Q/W$ ($(m^3/s)/m$ hoặc m^2/s);
- q_{TN} : Lưu lượng đơn vị thí nghiệm, (m^2/s);
- q_{TT} : Lưu lượng đơn vị tính toán, (m^2/s);
- q_d : Lưu lượng đơn vị qua tường hạ lưu phím, (m^2/s);
- q_s : Lưu lượng đơn vị qua tường bên của phím, (m^2/s);
- q_u : Lưu lượng đơn vị qua tường thượng lưu phím, (m^2/s);
- r : Hệ số hiệu quả tháo, là tỷ lệ giữa lưu lượng qua tràn piano và lưu lượng qua tràn thực dụng khi có cùng chiều rộng tháo nước, $r=Q_P/Q_o$ (-);
- Re : số Reynold;
- Re_{gh} : số Reynold giới hạn;
- Re_m : số Reynold trên mô hình;
- S_i : Độ dốc đáy phím nước vào, là tỷ lệ giữa chiều cao tràn P_w và độ dài phím nước vào theo phương ngang; $S_i=P_w/(B-B_o)$ (-).
- S_o : Độ dốc đáy phím nước ra, là tỷ lệ giữa chiều cao tràn P và độ dài phím nước ra theo phương ngang; $S_o=P/(B-B_i)$ (-).
- W_i : Chiều rộng phím nước vào, tính tới tim thành bên của phím (m);
- W_o : Chiều rộng phím nước ra, tính tới tim thành bên của phím (m);
- W_u : Chiều rộng đơn vị tràn, $W_u=W_i+W_o$ (m);

- W : Chiều rộng tràn, bằng tổng chiều rộng các phím nước vào và phím nước ra,
 $W = \sum W_i + \sum W_o$ (m);
- W_e : hệ số Veber;
- Z_{TL} : Cao trình mực nước thượng lưu (m)
- Z_{hl} : Cao trình mực nước hạ lưu (m)
- Z_{ng} : Cao trình ngưỡng tràn (m)
- $Z_{đkTL}$: Cao trình đáy kênh thượng lưu (m)
- $Z_{đkHL}$: Cao trình đáy kênh hạ lưu (m)
- Z : Chênh lệch cao trình mực nước thượng lưu và hạ lưu, (m);
- Δ_b : Sai số tuyệt đối tính theo chiều ngang, (mm);
- Δ_h : Sai số tuyệt đối tính theo chiều đứng, (mm);
- Δ_L : Sai số tuyệt đối do xây dựng máng lườn, (mm);
- Δ_m : Sai số tuyệt đối do chế tạo đầu mối, (mm);
- Δ_{mk} : Sai số tuyệt đối do xây dựng, lắp đặt máng kính, (mm);
- Δ_Z : Sai số tuyệt đối do xây dựng địa hình kênh dẫn thượng, hạ lưu (mm);
- v_m : Hệ số nhớt động học của nước trên mô hình (m^2/s);
- λ : Tỷ lệ mô hình
- σ_n : Hệ số ngập (-).

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Trong tình hình biến đổi khí hậu toàn cầu ngày càng phức tạp, dòng chảy lũ tăng đột biến, đặt áp lực lớn cho vấn đề an toàn của các hồ chứa và ngập lụt hạ du. Các công trình tháo xây mới và nâng cấp cần đảm bảo khả năng thoát lũ lớn hơn bởi dòng chảy tự nhiên tăng hoặc do nâng cấp công trình đảm bảo an toàn theo các quy chuẩn trong tình hình mới (QCVN-04-05:2012). Một trong những giải pháp công trình tháo lũ tiên bộ được nghiên cứu, ứng dụng trong công trình thủy lợi, thủy điện trên thế giới và Việt Nam là tràn xả lũ kiểu phím piano (PKW).

Tràn piano có khả năng tăng lưu lượng tháo tới 4~5 lần so với tràn thực dụng khi cùng điều kiện mặt bằng và cột nước, tuy nhiên cấu tạo và chế độ thủy lực phức tạp. Trong gần 20 năm qua, các nghiên cứu không ngừng tìm tòi nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng tới khả năng tháo của tràn và đã đạt được nhiều thành tựu đáng kể trong việc xác định hình thức, kết cấu hình học tràn tối ưu. Các nghiên cứu về ổn định, biện pháp thi công hay tiêu năng hạ lưu công trình đang tiếp tục được hướng đến. Các hội thảo Quốc tế tràn piano liên tục được tổ chức trong thời gian gần đây như ở Bỉ năm 2011, ở Pháp năm 2013 và ở Việt Nam vào tháng 2/2017, cho thấy tràn kiểu phím piano nói chung và khả năng tháo của nó vẫn đang rất được quan tâm.

Khả năng tháo qua tràn piano bao gồm khả năng tháo qua tràn khi chảy tự do, chảy ngập, đặc tính thủy lực và các giới hạn thủy lực vẫn còn là vấn đề phức tạp, lý thú. Đặc biệt khi mực nước hạ lưu thay đổi tương tác với dòng đến từ thượng lưu, khả năng tháo và các trạng thái chảy qua PKW bị ảnh hưởng rõ rệt, các đặc trưng thủy lực qua tràn có nhiều khác biệt so với tràn truyền thống mà chưa được nghiên cứu đánh giá cụ thể. Các nghiên cứu về tràn piano chảy ngập còn khá ít và rời rạc. Việc xác định ảnh hưởng của mực nước hạ lưu tới lưu lượng qua tràn mới chỉ tập trung trong vùng độ ngập lớn $h_n > 0,65$ hoặc cho công trình có hình dạng mặt cắt cụ thể, có thứ nguyên, khó áp dụng đại trà. Ranh giới giữa chế độ chảy tự do và chảy ngập do ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu chưa được đề cập.

Đối với tràn piano chảy tự do, cho đến nay, các kiểu tràn cơ bản với tỷ lệ hình học tối ưu cho thủy lực và kinh tế đã được đúc kết. Tuy nhiên, chưa có công bố nào tổng hợp, khái quát về mặt cắt, đơn vị tràn chuẩn của PKW đáp ứng cơ bản cho thiết kế. Các công thức xác định khả năng tháo đã có chưa phân tích trên cơ sở các đặc trưng thủy động lực học của dòng qua tràn nên phạm vi áp dụng còn hẹp, cụ thể cho từng nghiên cứu, từng công trình, ít có khả năng nhân rộng, hoặc khó ứng dụng và tính toán, cho sai số còn lớn khi tính cho các công trình khác dù có miền phù hợp.

Với thực tiễn hiện nay, ngày càng nhiều công trình ngăn sông dạng tràn tự do không cửa van điều tiết có điều kiện ứng dụng kiểu tràn piano bởi vừa tăng khả năng tháo khi lũ lớn, lũ nhanh, vừa đảm bảo an toàn, chủ động trong vận hành. Do đó, việc “*Nghiên cứu khả năng tháo qua tràn piano khi kể đến ảnh hưởng của mực nước hạ lưu*” là một đòi hỏi của sự phát triển, không chỉ cho thiết kế xây dựng mới mà cả trong đảm bảo an toàn, phát huy hiệu quả các công trình đã xây dựng. Bởi vậy, đề tài luận án là cấp thiết.

2. Mục đích nghiên cứu

- Xác định ranh giới các trạng thái chảy ảnh hưởng đến khả năng tháo trên cơ sở xác định đặc trưng dòng qua tràn và nối tiếp hạ lưu tràn piano.

- Xây dựng công thức, đồ thị xác định khả năng tháo qua tràn piano có đơn vị tràn tiêu chuẩn, trong điều kiện chảy tự do và khi có ảnh hưởng của điều kiện hạ lưu gồm ảnh hưởng bởi cao độ đáy đáy kênh và mực nước hạ lưu.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là khả năng tháo của tràn piano có đơn vị tràn tiêu chuẩn, đỉnh tường tràn cong hình bán nguyệt.

Phạm vi nghiên cứu của luận án:

- Bài toán phẳng, dòng chảy ổn định không đều;
- Tỷ lệ cột nước và chiều cao tràn: $H_0/P=0,17\div 2,50$;
- Độ ngập $h_n/H_n = -0,2\div 0,98$;
- Đơn vị tràn có tỷ lệ kích thước hình học:

$$P/W_u=0,5\div 1,3; W_i/W_o=1,2\div 1,5; N=L_u/W_u=4\div 6.$$

4. Nội dung nghiên cứu

Phân tích, tổng quan các nghiên cứu đã có ở trong và ngoài nước. Đánh giá các thành công, hạn chế và xác định vấn đề nghiên cứu của luận án.

Phân tích cơ sở lý thuyết, sử dụng phương pháp nghiên cứu bằng mô hình thực nghiệm; lập phương trình thực nghiệm; lựa chọn những thông số chính ảnh hưởng đến khả năng tháo của tràn, lập sê ri thí nghiệm; tổng hợp, đánh giá số liệu.

Nghiên cứu đặc điểm dòng chảy qua tràn piano nhằm xác định ranh giới các trạng thái chảy. Xác định ranh giới và ảnh hưởng của điều kiện hạ lưu (đáy kênh, mực nước hạ lưu) tới khả năng tháo.

Xây dựng công thức, đồ thị thực nghiệm nhằm xác định khả năng tháo khi tràn chảy tự do, chảy ngập.

Ứng dụng tính toán, lựa chọn kích thước hợp lý và xác định lưu lượng tháo qua tràn piano khi chảy tự do và chảy ngập cho công trình cụ thể.

5. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

5.1. Cách tiếp cận

Luận án tiếp cận theo phương pháp xây dựng công thức tính khả năng tháo của tràn truyền thống. Thiết lập công thức xác định khả năng tháo của tràn piano chảy tự do có cấu tạo đơn vị tràn cho tối ưu về khả năng tháo và kinh tế, từ đó, mở rộng công thức cho các trường hợp khác nhau của tràn, theo từng chế độ chảy và điều kiện ảnh hưởng.

5.2. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp nghiên cứu tổng quan: Nghiên cứu những kết quả đã đạt được, tổng quan các yếu tố, mức độ ảnh hưởng tới khả năng tháo của tràn piano, từ đó xác định đơn vị tràn tiêu chuẩn và mở rộng các điều kiện ảnh hưởng khác.

- Phương pháp thực nghiệm: Sử dụng mô hình vật lý để thí nghiệm, xác định các thông số dòng chảy qua tràn như: lưu lượng, mực nước, hình dạng dòng chảy, phân bố lưu tốc ...Sử dụng mô hình toán 3D để mô phỏng chi tiết phân bố

vận tốc, lưu hướng dòng chảy trên phím nước vào, phím nước ra và nối tiếp hạ lưu, nhằm bổ sung hình ảnh trực quan cho mô hình vật lý.

- Phương pháp phân tích số liệu thực nghiệm: Sử dụng các phần mềm chuyên dụng về xử lý số liệu nhằm thiết lập các quan hệ thực nghiệm từ số liệu nghiên cứu.

- Phương pháp phân tích thứ nguyên: ứng dụng phương pháp Buckingham để xác định các số ri thí nghiệm và phương pháp phân tích thứ nguyên để thiết lập các quan hệ thực nghiệm.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

6.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án đã làm sáng tỏ và lý giải một số đặc trưng, chế độ thủy lực của tràn piano; đã xác định, lượng hóa được ranh giới trạng thái chảy đầy phím nước ra, trạng thái ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu, chế độ chảy ngập qua tràn; xây dựng công thức xác định khả năng tháo theo các chế độ chảy. Các kết quả góp phần hoàn thiện và phong phú hơn các nghiên cứu về tràn piano, là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu các vấn đề khác có liên quan về kiểu tràn này.

6.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu của luận án đã làm sáng tỏ mặt cắt, đơn vị tràn piano hiệu quả về kinh tế và kỹ thuật, các công thức và sơ đồ tính toán khả năng tháo là công cụ hữu hiệu giúp giảm bớt thời gian, công sức cho tính toán thiết kế tràn piano, tạo điều kiện ứng dụng thuận lợi loại công trình này trong thực tế. Các chế độ thủy lực được xác định giúp lựa chọn vùng làm việc hiệu quả, giảm thiểu các rủi ro trong thiết kế và vận hành tràn piano.

7. Các đóng góp mới của luận án

(1). Luận án đã xác định được ranh giới các trạng thái phân định chế độ chảy của dòng qua tràn piano gồm: + Ranh giới trạng thái chảy đầy phím ra và không đầy phím ra là $H_0/W_0=0,5$; + Ranh giới dòng chảy qua tràn có ảnh hưởng và không ảnh hưởng bởi điều kiện hạ lưu (đáy kênh hạ lưu nâng cao) là $H_0/P_H=0,7$;

+ Ranh giới của trạng thái quá độ giữa chảy tự do hoàn toàn và chảy ngập hoàn toàn là $h_n/H = -0,2 \div 0$.

(2). Luận án đã xây dựng được công thức xác định hệ số tháo qua tràn piano tính theo (3.4) là công thức (3.10), (3.11); hệ số ảnh hưởng bởi địa hình hạ lưu tính theo công thức (3.13); hệ số ngập tính theo công thức (3.15); giá trị cột nước phân giới nối tiếp nước nhảy ngập sau tràn tính theo công thức (3.2).

8. Bộ cục của luận án

Luận án gồm phần Mở đầu, Kết luận và kiến nghị, Phụ lục và 4 chương nội dung:

Chương 1: Tổng quan kết quả nghiên cứu tràn piano

Chương 2: Cơ sở khoa học nghiên cứu xác định khả năng tháo qua tràn piano

Chương 3: Đặc trưng khả năng tháo qua tràn piano

Chương 4: Lựa chọn kích thước hợp lý, tính toán khả năng tháo cho công trình thực tế kiểu phím piano.

Chương 1 TỔNG QUAN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU TRÀN PIANO

Tràn piano (PKW) là công trình tháo có tuyến zic zắc tạo nên các ô đón nước vào và ô thoát nước ra tựa các phím đàn. Trong gần 20 năm trở lại đây, các nghiên cứu, ứng dụng tràn piano rất phong phú, đạt được nhiều thành tựu nổi bật, nhất là về khả năng tháo. Chương 1 sẽ tập trung phân tích các kết quả nổi bật này, từ đó xác định hình dạng mặt cắt, đơn vị tràn tiêu chuẩn, xác định các hạn chế, tồn tại và đề xuất hướng nghiên cứu của luận án.

1.1 GIỚI THIỆU VỀ TRÀN PIANO

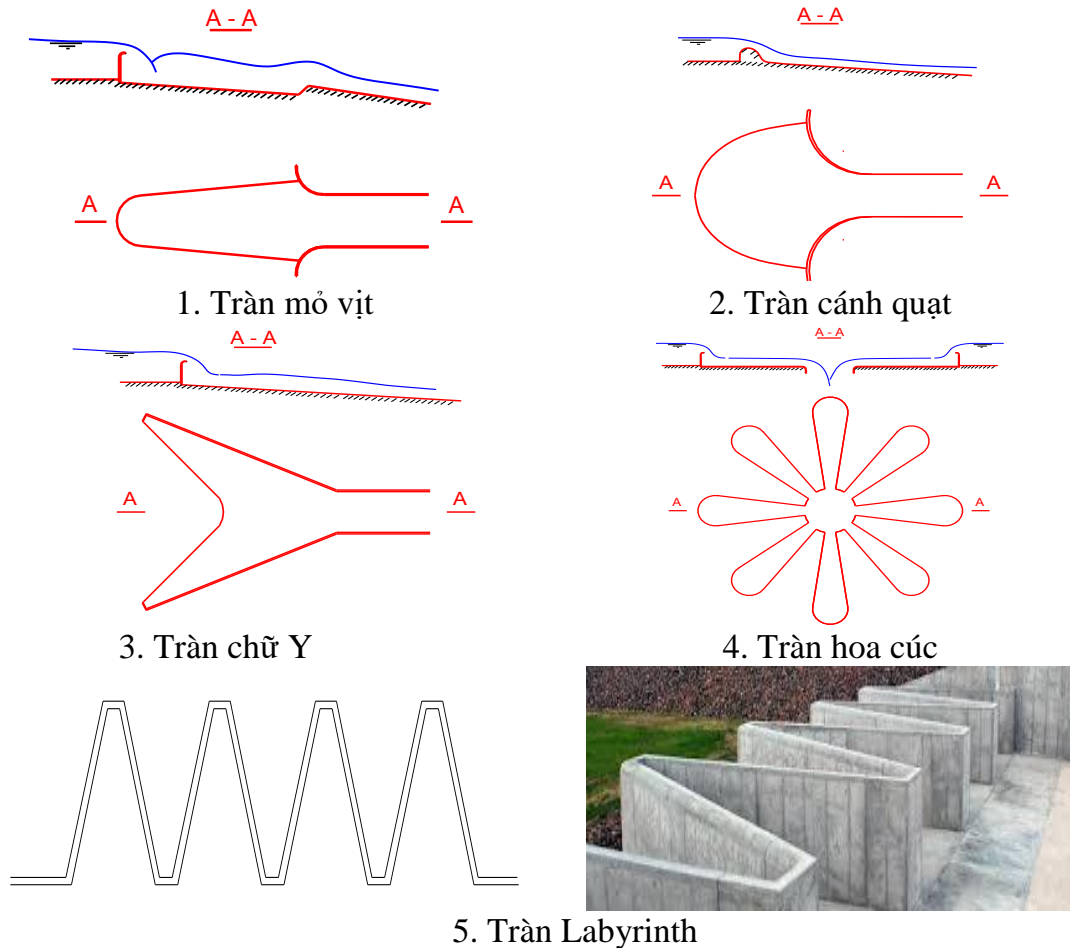
1.1.1 Sự ra đời và phát triển

Tràn piano tiền thân là tràn Labyrinth kiểu cung đã phát triển từ những năm 30 của thế kỷ trước. Tràn Labyrinth được cải tiến từ tràn truyền thống chảy tự do, dựa trên nguyên lý tăng chiều dài đường tràn để tăng khả năng tháo cho công trình trong điều kiện địa hình chật hẹp, theo đó tuyến tràn từ dạng thẳng cải tiến thành dạng cong và phát triển theo đường zic zắc với tường thượng lưu, tường hạ lưu tràn dạng thẳng đứng, đáy khu vực nước vào, nước ra nằm ngang (đáy phẳng), chiều dài chân tràn bằng chiều dài đỉnh theo trục dòng chảy. Một số kiểu tràn tuyến cong như tràn mỏ vịt, tràn cánh quạt, tràn chữ Y, tràn hoa cúc và tràn tuyến zic zắc, Labyrinth thể hiện trên Hình 1.1.

Xuất phát từ nhu cầu thực tiễn, cần cải tạo, nâng cấp khả năng xả lũ cho hồ chứa hiện hành. Nhiều công trình bố trí tràn tự do kiểu zic zắc trên đỉnh tràn thực dụng hiện hữu, trong điều kiện mặt bằng xây dựng chật hẹp. Các nhà khoa học đã cải tiến tràn Labyrinth từ dạng tường thượng lưu, hạ lưu thẳng đứng thành tường nghiêng khúc khuỷu, đáy các ô nước ra và ô nước vào từ dạng nằm ngang thành có mái dốc, hình thành nên các hốc phím, gọi là tràn piano. Các nghiên cứu đi đầu trong lĩnh vực này là nhóm HydroCoop, Điện lực Pháp, Đại học Biskra (An giê ri), Đại học Roorkee (Ấn Độ) từ những năm 1999÷2002.

Các nghiên cứu và cải tiến này không chỉ cải thiện chế độ thủy lực mà phần chân tràn piano được giảm nhỏ, còn 2/3 so với tràn Labyrinth, đã đem lại hiệu quả

về kinh tế. Do đó tràn piano được coi là giải pháp ưu việt cho bài toán kỹ thuật, kinh tế, được định nghĩa như một “giải pháp hiệu quả về giá thành cho tràn xả lũ” [46], [40].

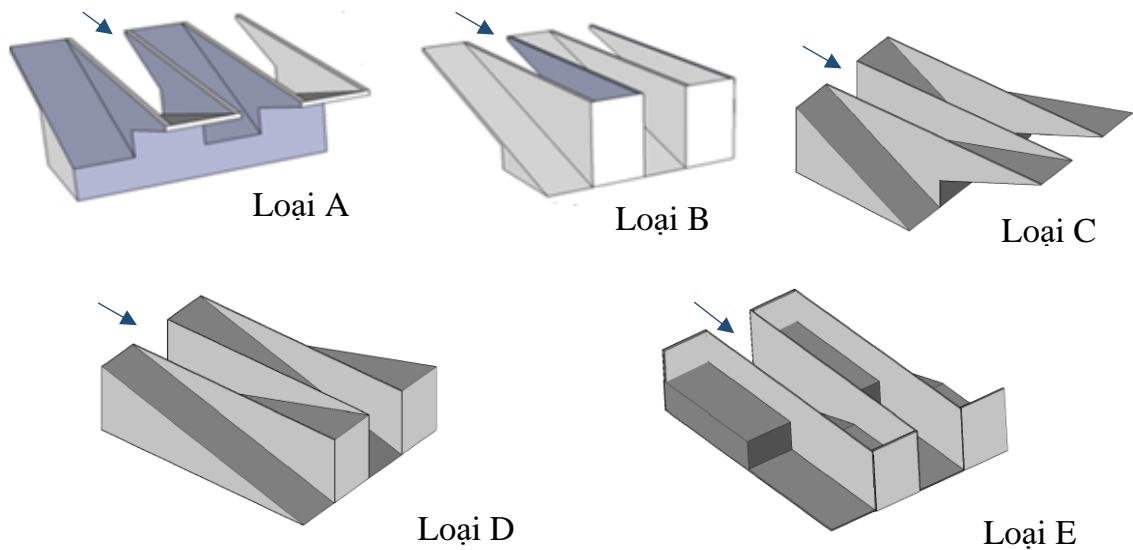


Hình 1.1 Một số kiểu tràn tuyến cong, tuyến zic zắc tiền thân của PKW

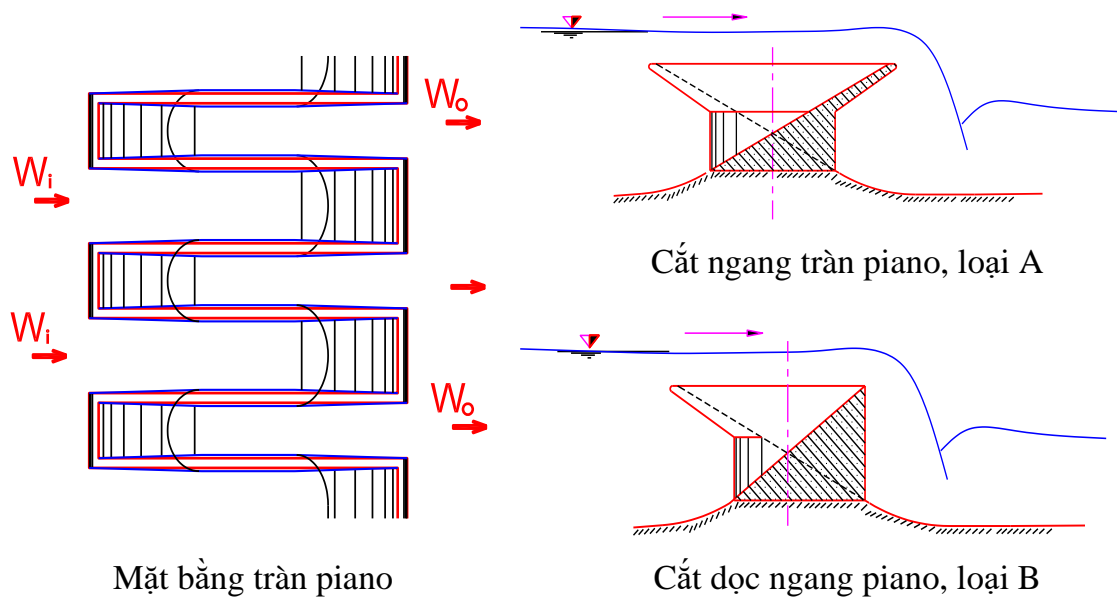
1.1.2 Phân loại tràn

Có nhiều cách phân loại PKW, chủ yếu là theo hình thức tràn, hình thức ngưỡng và chế độ chảy. Theo hình thức tràn, các kiểu tràn piano được phân định bởi cấu tạo hình học đặc trưng. Theo những nghiên cứu ban đầu của F.Lempérière & A.Ouamane (2003), tràn piano được chia làm 2 dạng là loại A và loại B. Tràn loại A có kết cấu đối xứng gồm hốc phím thượng lưu, hốc phím hạ lưu. Tràn loại B có kết cấu không đối xứng, chỉ có hốc phím thượng lưu, tường hạ lưu của tràn dạng thẳng đứng, (Hình 1.3), [15], [38], [39].

Đến năm 2011, có nhiều nghiên cứu chi tiết hơn về hình thức, cấu tạo của PKW, theo đó tràn chia làm 4 loại chính: Loại A, B như trên, loại C chỉ có hốc phím hạ lưu, loại D không có hốc phím thượng lưu, hốc phím hạ lưu. Ngoài ra một số tài liệu đề cập tới loại E, đây là dạng tương tự như loại D nhưng đáy phím nằm ngang, có bậc, hay là dạng tràn Labyrinth có bố trí bậc trên phím nước vào, phím nước ra. Trong luận án này không tổng quan về kiểu tràn có đáy phím nằm ngang, (Hình 1.2), [39], [28].



Hình 1.2 Các kiểu tràn piano



Hình 1.3 Kết cấu tràn piano

Phân loại theo hình thức ngưỡng, có tràn đỉnh nhọn, đỉnh bằng và đỉnh nửa hình tròn hoặc $\frac{1}{4}$ cung tròn, tuy nhiên các hình thức ngưỡng này được xác định, phân loại trong một vài nghiên cứu ban đầu về tràn piano. Các nghiên cứu sau này đều lựa chọn hình thức ngưỡng cong bán nguyệt (nửa hình tròn) và không đề cập, nghiên cứu tới các hình thức ngưỡng khác nữa.

Phân loại theo chế độ chảy, cũng như các dạng tràn truyền thống, có tràn piano chảy tự do và tràn chảy ngập. Ngoài ra, luận án sẽ phát triển thêm phân loại tràn theo khái niệm trạng thái chảy đầy hay không đầy phím nước ra.

1.1.3 Thành tựu ứng dụng

Tràn piano đầu tiên được xây dựng vào năm 2006, đặt trên đỉnh đập Golours ở Pháp (Laugier, 2007), tràn rộng 12m lưu lượng xả lớn nhất là $68\text{m}^3/\text{s}$. Tiếp theo từ năm 2008 đến năm 2010, Công ty Điện lực Pháp đã ứng dụng và xây dựng PKW tại 3 đập: đập St Marc (2008), tràn rộng 18m, lưu lượng tháo $138\text{m}^3/\text{s}$; đập Etroit (2009), tràn rộng 18,7m, lưu lượng tháo lớn nhất $82\text{m}^3/\text{s}$ và đập Gloriettes (2010), tràn rộng 18,5m, lưu lượng tháo $90\text{m}^3/\text{s}$. Năm 2011, PKW tiếp tục được xây dựng tại đập Malarce trên sông Chassezac miền nam nước Pháp, tràn rộng 42,5m, lưu lượng xả lũ $600\text{m}^3/\text{s}$, đây cũng là tràn piano lớn nhất ở Pháp. Tại các công trình này, PKW đều được bố trí trên đỉnh đập thực dụng hiện trạng, là giải pháp chủ động và tăng khả năng xả lũ cho những đập tràn đang vận hành khi dòng chảy đến hồ tăng [46], [39].

Một số tràn piano đã được thiết kế và thí nghiệm trên thế giới như: tràn xả lũ của dự án thủy điện Sawara Kuddu, Ấn độ (2005), tràn rộng 138m, lưu lượng xả lớn nhất $3900\text{m}^3/\text{s}$ [47]; tràn xả lũ của đập đá đổ Dartmouth trên sông Mitta Mitta, Australia (2013). Công trình đập Hazelmere, Nam Phi [22]; tràn tháo nước của khu chứa Rambawa - Sri Lanka.

Tràn piano cũng được ứng dụng làm tràn bên trên nền địa chất yếu cho đập đất sét Ramdane Djamel ở Đông Bắc An-giê-ri (2012), tràn rộng 90m, lũ thiết kế $3445\text{m}^3/\text{s}$ [23]; cho công trình phân lũ ở vùng đồng bằng hoặc công trình xả nước thải cho bể chứa của dự án khai thác mỏ [31].

Đến nay, trên thế giới đã có 25 công trình ứng dụng, trên 20 tạp chí và hơn 100 bài báo công bố các nghiên cứu về loại tràn này [26]. Bảng 1.1 và Hình 1.4 biểu thị những thông số và hình ảnh của một số công trình tràn xả lũ kiểu phím piano trên thế giới và ở Việt Nam.



Đập Saint Marc – Pháp (2008)



Nâng cấp đập tràn Hazelmere, Nam Phi (2012)



Thủy điện Đăk mi 4B, Quảng Nam (2007)



Vị trí các công trình ứng dụng tràn piano trên thế giới



Đập dâng Văn Phong, Bình Định (2010)

Hình 1.4 Một số công trình xả lũ ứng dụng tràn piano

Việt Nam là một trong những nước có nhiều công trình ứng dụng PKW. Các tràn này là hạng mục công trình tháo lũ của các dự án thủy điện xây mới như: Thủy điện Đăk Mi 4B ($Q=634\text{m}^3/\text{s}$), Đăk Mi 2 ($Q= 3440\text{m}^3/\text{s}$), Đăk Mi 3

($Q=7400\text{m}^3/\text{s}$), tỉnh Quảng Nam; Thủy điện Vĩnh Sơn 3 ($Q=4000\text{m}^3/\text{s}$), tỉnh Bình Định. Ngoài ra, PKW còn được ứng dụng sáng tạo cho công trình tháo cột nước thấp tại đập dâng Văn Phong, tỉnh Bình Định. Đây cũng là tràn piano lớn nhất trên thế giới cho đến thời điểm hiện nay ($Q= 8700\text{m}^3/\text{s}$) hay tại tràn xả lũ Xuân Minh, tỉnh Thanh Hóa [32], [39], [5], [13].

Tuy nhiên, các công trình xả lũ kiểu phím piano này đều áp dụng theo một vài mẫu PKW cơ bản, giống hoàn toàn về hình dạng mặt cắt, các tỷ lệ cấu tạo và đều được thí nghiệm trên mô hình vật lý. Một số công trình được thí nghiệm với đúng kích thước nguyên hình. Những mẫu PKW gồm: tràn xả lũ Bambakari (Burkina Faso), tràn Lhasi (Ấn độ) theo nghiên cứu của F.Lempérière (2011); tràn xả lũ tại các đập Goulours, St-Marc, Etroit, Gloriettes (Pháp) thiết kế theo nghiên cứu của M.Leite Ribeiro và cs (2009); tràn Raviege (Pháp) ứng dụng kết quả nghiên cứu của S.Erpicum và cs (2011).

Các tràn piano ở Việt Nam như Văn Phong, Đăkmi 2, 3, 4B, Ngàn Trươi, Vĩnh Sơn 3, Đăk Rông 3, Xuân Minh được thiết kế với hình dạng và tỷ lệ kích thước chính theo dạng mặt cắt nghiên cứu của M. Hồ Tá Khanh và cs.

Một số công trình đã xây dựng, ứng dụng từ những kết quả nghiên cứu ban đầu về PKW nên tỷ lệ kết cấu hình học chưa phải là tối ưu cho khả năng tháo và kinh tế, như tràn có tỷ lệ $W_i/W_o \leq 1$. Điều này chỉ được thấy rõ khi ngày nay có những kết quả nghiên cứu mới chi tiết hơn về loại tràn này.

Bảng 1.1 Một số công trình ứng dụng tràn piano

| Tên công trình | Quốc gia | Kiểu tràn | q | H_{TK}/P | L/W | P_i/W_i | W_i/W_o | Nghiên cứu mẫu |
|----------------|--------------|-----------|------|------------|-----|-----------|-----------|----------------------------|
| Bambakari | Burkina Faso | | 5,0 | 0,27 | 6,0 | 2,67 | 0,77 | F.Lempérière và cs, (2011) |
| Gage II | Pháp | | 11,8 | 0,25 | 7,8 | 3,75 | 1,23 | Dugué và cs, (2011) |
| Raviege | Pháp | B | 10,4 | 0,32 | 6,8 | 2,08 | 1,5 | S.Erpicum và cs, (2011) |
| Malarce | Pháp | A | 12,3 | 0,34 | 8,1 | 2,67 | 1,04 | Pinchard và cs, (2011) |
| Goulours | Pháp | A | 5,7 | 0,31 | 4,9 | 1,15 | 1,8 | M.Leite |

| Tên công trình | Quốc gia | Kiểu trần | q | H _{TK} /P | L/W | P _i /W _i | W _i /W _o | Nghiên cứu mẫu |
|------------------|---------------------|-----------|------|--------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| St-Marc | Pháp | A | 7,7 | 0,32 | 4,3 | 1,35 | 1,41 | Ribeiro và cs, (2009) |
| Etroit | Pháp | A | 7,0 | 0,18 | 6,7 | 1,96 | 1,54 | |
| Gloriettes | Pháp | A | 4,9 | 0,27 | 4,7 | 1,3 | 1,53 | |
| Lhasi | Ấn Độ | | 1,0 | 0,13 | 6,0 | 2,17 | 1,25 | F.Lempérière và cs, (2011) |
| Sawaa Kudd | Ấn Độ | | 38,0 | 0,56 | 4,9 | 1,33 | 1,0 | Das Singhal & Sharma (2011) |
| Ouldjet Mellegue | An-giê-ri | | 0,7 | 0,66 | 4,8 | | 1,37 | Pfister và cs, (2012) |
| Đắk rộng 3 | Việt Nam, Quảng Trị | A | | | | | | M.Hồ Tá Khanh và cs. Vận hành 2010 |
| Đắk mi 4 | Việt Nam, Quảng Nam | B | | | | | | M.Hồ Tá Khanh và cs. Vận hành 2010 |
| Văn Phong | Việt Nam, Bình Định | B | 28,9 | | 6,0 | 2,08 | 1,20 | M.Hồ Tá Khanh và cs (2011). VH 4/2015 |
| Đắk mi 2 | Việt Nam, Quảng Nam | B | 6,7 | | 5,0 | | | M.Hồ Tá Khanh và cs. Đang XD |
| Đắk mi 3 | Việt Nam, Quảng Nam | B | 40,0 | | 5,0 | | | M.Hồ Tá Khanh và cs. Đang XD |

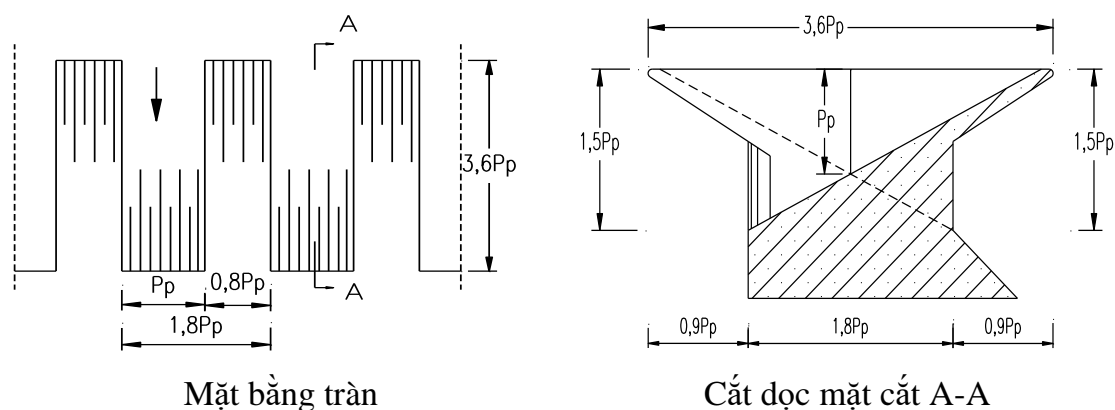
1.1.4 Quá trình hoàn thiện cấu tạo trần piano

Trần piano có cấu tạo phức tạp hơn trần truyền thống. Đường trần hình zíc zắc, các thành bên nghiêng, khúc khuỷu, đáy ô nước vào, ô nước ra có độ dốc nên dù các trần piano cùng loại mà có tỷ lệ kích thước hình học khác nhau sẽ cho khả năng tháo khác nhau.

Tiếp nối các nghiên cứu ban đầu về PKW, cho đến nay, các nghiên cứu vẫn không ngừng tìm tòi nhằm xác định các tỷ lệ kích thước hợp lý của đơn vị trần piano cho tối ưu về thủy lực và kinh tế.

Năm 2013, trong bài viết “Triển vọng - 15 năm nghiên cứu và phát triển”, tác giả M. Hồ Tá Khanh đã đề cập tới mô hình tiêu chuẩn cho tràn PKW – “Standard model” [34]. Đây là mô hình tràn piano được nhóm Hydrocoop (2006) nghiên cứu tìm tòi phục vụ cho thiết kế cơ sở, ước lượng kinh tế để so sánh với các giải pháp công trình khác trong dự án. Trong đó tràn có mặt cắt đối xứng – kiểu A, các tỷ lệ kích thước hình học cố định tính theo chiều cao hốc phím P_p gồm: chiều dài phím $B=3,6.P_p$, chiều cao phím $P_i=P_o=1,5P_p$, (Hình 1.5). Các tỷ lệ kích thước và kết cấu này là thành tựu bước đầu trong việc xác định hình dạng đơn vị tràn piano cho sự tương đối hài hòa về kinh tế và thủy lực nhưng được khuyến cáo chưa phải là tối ưu.

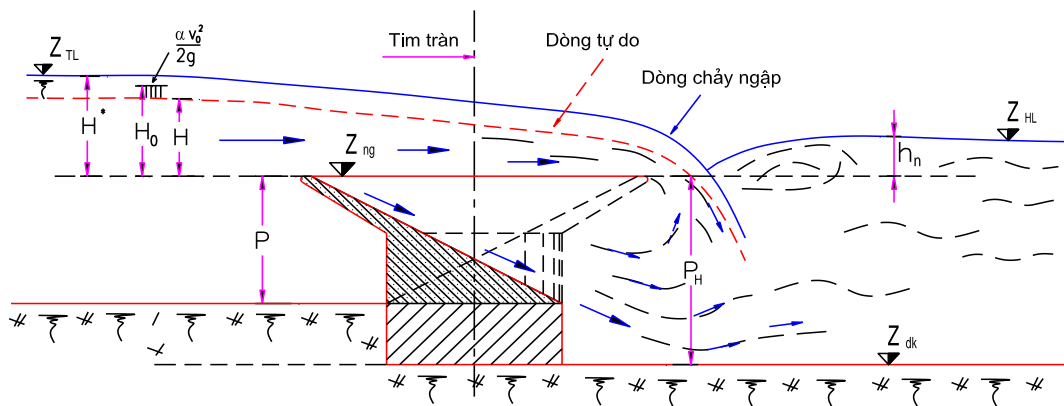
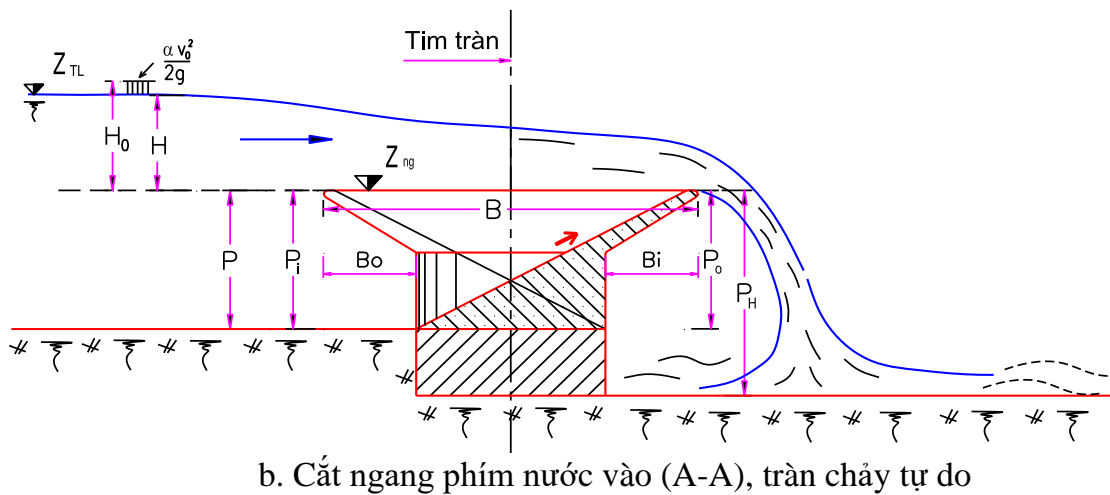
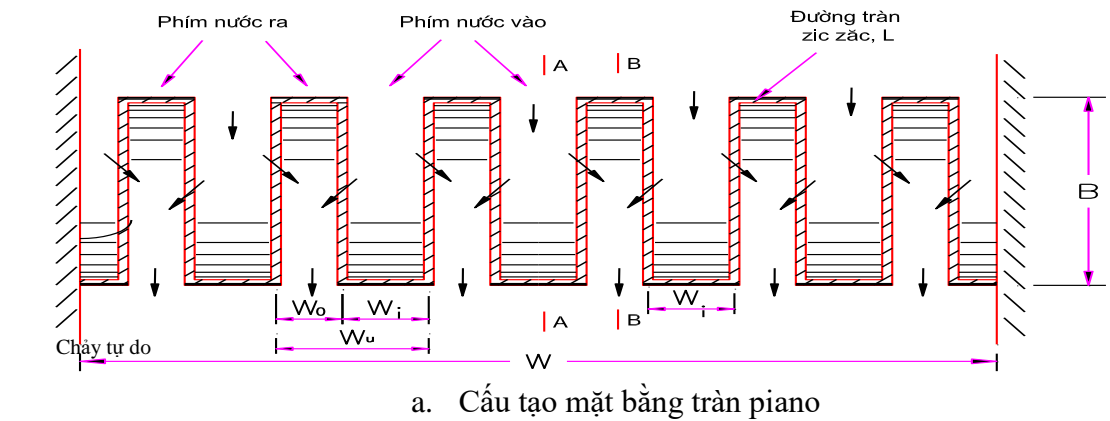
Đến thời điểm 2010, hầu như chưa có đề xuất nào tốt hơn mô hình tiêu chuẩn trên, nên các công trình thiết kế đều áp dụng mô hình này, trong đó có đập dâng Văn Phong của Việt Nam.



Hình 1.5 Mô hình tiêu chuẩn [34]

Từ sau năm 2010, tràn piano được quan tâm đặc biệt, có nhiều nghiên cứu công bố, các hội thảo quốc tế diễn ra với tần suất 2 năm một lần. Các nghiên cứu nhằm xác định hình dạng, cấu tạo hài hòa nhất về thủy lực và kinh tế cho tràn piano cũng được quan tâm bởi các tác giả: A.Noui & A.Ouamane (2011), O.Machiels và cs (2011), M.Leite Ribeiro và cs (2011), O.Machiels, S. Erpicum và cs (2014, 2017), ... Mỗi nghiên cứu tập trung vào một nhóm các thông số chính khác nhau, tạo thành các mảnh ghép dần hoàn chỉnh về một đơn vị tràn piano tối ưu. Dẫu vậy, cho tới nay, chưa có công bố nào khái quát về hình dạng mặt cắt, đơn vị tràn chuẩn cho tràn piano như của tràn truyền thống.

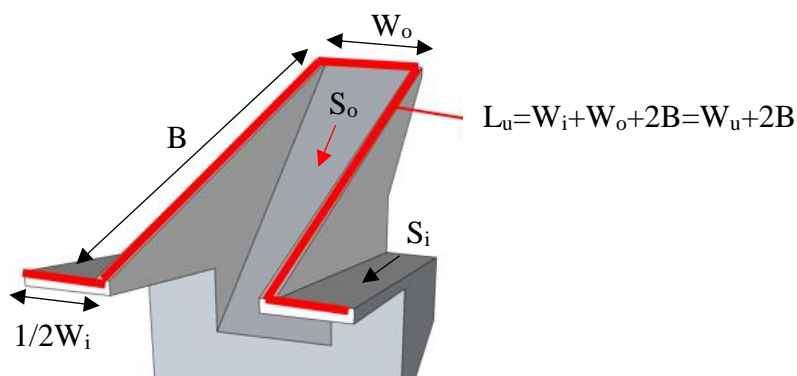
Các nghiên cứu đã xác định được rằng hình dạng PKW được tạo bởi hơn 20 thông số hình học trong đó có 9 thông số cơ bản: chiều cao tràn P , chiều rộng đơn vị tràn W_u , chiều rộng phím nước vào W_i , chiều rộng phím nước ra W_o , chiều dài phím B , chiều dài hốc phím vào B_i , chiều dài hốc phím ra B_o , độ dốc đáy phím S_i và chiều dày thành bên của phím, T_s , (Hình 1.6).



Hình 1.6 Cấu tạo tràn piano

Tràn piano được bố trí gồm một hoặc nhiều đơn vị tràn (đơn phím). Mỗi đơn phím gồm 1 phím nước vào và 1 phím nước nhưng để đảm bảo tính đối xứng dòng chảy, thường nghiên cứu và bố trí đơn phím gồm 1 phím nước vào và 2 nửa phím nước ra hoặc ngược lại. Coi chiều rộng phím tính đến tim tường vách ngăn thì các thông số cấu tạo của đơn phím gồm: chiều rộng $W_u=W_i+W_o$; chiều dài theo dòng chảy của thành phím là B ; tổng chiều dài ngưỡng theo đường zíc zắc là: $L_u= W_u+2B$; hệ số chiều dài đường tràn $N=L_u/W_u$.

Mở rộng ra với toàn bộ tràn có n đơn phím, ta có tổng chiều dài ngưỡng tràn theo đường zíc zắc của toàn bộ tràn là $L=n.L_u$; tổng chiều rộng thoát nước theo chiều vuông góc với trục dòng chảy là $W=n.W_u$ nên hệ số chiều dài đường tràn N của tràn cũng chính là hệ số chiều dài đường tràn của đơn phím, $N=L/W=L_u/W_u=(W_u+2B)/W_u$, Hình 1.7.



Hình 1.7 Cấu tạo đơn vị tràn tràn piano

Việc xác định ảnh hưởng của cấu tạo tràn đến khả năng tháo là nghiên cứu về các tỷ lệ hình học tối ưu và tập trung vào các đại lượng đặc trưng, gồm tỷ lệ giữa: chiều cao và chiều rộng đơn vị tràn P/W_u ; chiều rộng phím nước vào và phím nước ra W_i/W_o ; chiều dài đường tràn và chiều rộng tràn nước $N=L/W$; chiều dài hốc phím vào và hốc phím ra B_i/B_o , chiều dài hốc các phím vào, phím ra và chiều dài phím B_i/B , B_o/B .

Ảnh hưởng của các đặc trưng này tới khả năng tháo qua tràn piano được trình bày trong mục 1.2 dưới đây.

1.2 CÁC ĐẶC TRƯNG ẢNH HƯỞNG TỚI KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

Tràn piano có cấu tạo phức tạp gồm các thành mỏng xếp hình zic zắc, theo đó kết cấu dòng chảy qua tràn cũng gồm nhiều thành phần, nhiều trạng thái. Các trạng thái và thành phần phân bố dòng này không chỉ phụ thuộc vào cột nước tràn mà có tương quan chặt chẽ với đặc trưng cấu tạo của PKW, quyết định hiệu quả tháo qua tràn. Các nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của đặc trưng hình học chủ yếu trên tràn chảy tự do (không ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu), bắt đầu từ vùng dòng qua tràn có dạng làn nước rơi và tập trung vào hình dạng tràn, hình dạng ngưỡng cũng như các nhóm thông số chính là các đại lượng không thứ nguyên như L/W , P/W , P/W_u , W_i/W_o .

Khi tràn chảy ngập, khả năng tháo qua tràn được xem xét ảnh hưởng bởi các yếu tố dòng chảy gồm cột nước thượng lưu, hạ lưu, độ ngập sâu h_n và chênh lệch mực nước thượng hạ lưu, z , trong đó mực nước hạ lưu là mực nước ở lòng dẫn hạ lưu tương tự như tràn truyền thống.

Để xác định vùng dòng chảy qua tràn là đường nước rơi, hình dạng và phạm vi thay đổi của làn nước đã được nghiên cứu chi tiết.

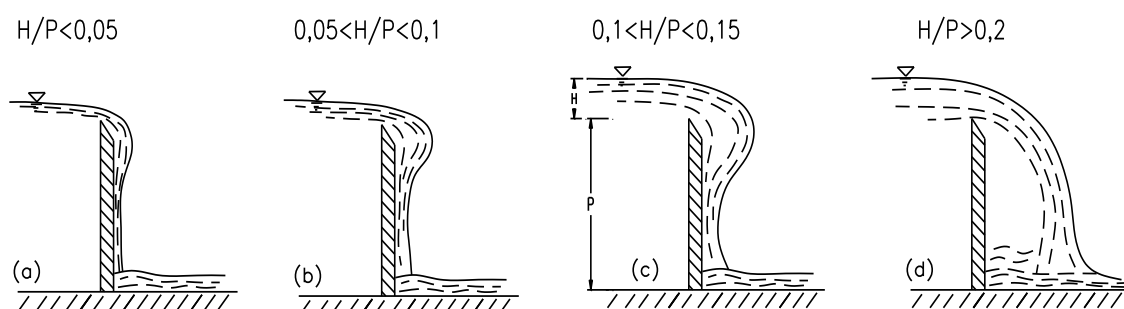
1.2.1 Dòng chảy ép sát qua tràn

Khi tràn có cột nước rất nhỏ, tỷ lệ giữa cột nước và chiều cao tràn $H/P < 0,15$, dòng chảy bám theo toàn bộ đường zic zắc, tràn qua tường piano có dạng chảy ép sát, tương tự như tràn thành mỏng. Các hình dạng và phạm vi chuyển đổi này đã được nghiên cứu chi tiết bởi các tác giả như O.Machiels, Kabiri-Samani & Javaheri và A. Mehboudi.

O.Machiels và cs (2011); Kabiri-Samani & Javaheri (2012) đã chỉ ra quá trình thay đổi hình dạng làn nước qua ngưỡng tràn dạng phím chữ nhật gồm: hình dạng ban đầu của làn nước là dạng chảy ép sát (Hình 1.8, a). Trạng thái này xuất hiện trong phạm vi lớp nước qua tràn rất mỏng, tỷ lệ cột nước và chiều cao tràn là $H/P < 0,05$. Làn nước chuyển sang dạng lượn cong khi tăng cột nước tràn với phạm vi $0,05 < H/P < 0,1$, (Hình 1.8, b). Làn nước qua tràn tiếp tục cong hơn, dạng vòm ở trên

đỉnh khi tăng cột nước tràn lên $0,1 < H/P < 0,15$ (Hình 1.8, c) và làn nước trở về hình dạng thông thường của luồng chảy tự do khi $H/P > 0,2$ (Hình 1.8, d).

Với dạng phím tam giác, nghiên cứu của A. Mehboudi và cs (2017) xác định được các giá trị ranh giới này thay đổi theo xu hướng tăng so với tràn dạng phím chữ nhật, giá trị ranh giới tương ứng theo thứ tự là 0,1; 0,14; 0,18 và 0,35, [42].



Hình 1.8 Hình dạng làn nước qua tràn piano khi cột nước tràn nhỏ

Từ vùng làm việc của tràn có dòng chảy là dạng đường nước rơi tự do này ($H/P > (0,15 \div 0,2)$), các nghiên cứu tiếp tục đánh giá ảnh hưởng của các thông số hình học khác tới khả năng tháo qua tràn piano. Tuy vậy, các đặc trưng hình dạng, đặc điểm cấu tạo và ranh giới trạng thái của dòng qua tràn piano như thế nào thì hầu như chưa thấy công bố.

1.2.2 Tràn chảy tự do – đơn vị tràn tiêu chuẩn

Hầu hết các nghiên cứu xác định đặc trưng hình học ảnh hưởng tới khả năng tháo cho PKW chảy tự do, được thực hiện bằng mô hình vật lý, một số ít thực hiện bằng mô hình toán và phương pháp mạng nơ ron thần kinh nhân tạo MLP (MultiLayer Perceptron). Nghiên cứu trên mô hình vật lý có các tác giả như A.Ouamane, A.Noui, O.Machiels, M.Leite Ribeiro, G.M.Cicero & J.R.Delisle và S. Erpicum, ...: Nghiên cứu bằng mô hình toán có các tác giả như J.Pralong và cs, V.Lefebvre và cs, .. Trong đó, khả năng tháo qua tràn được xác định thông qua hệ số r so sánh với tràn truyền thống hoặc xác định trực tiếp bằng công thức tính lưu lượng. Các nghiên cứu đều có cách tiếp cận và phạm vi nghiên cứu để dần đi đến xác định hình dạng tràn piano hiệu quả về khả năng tháo bằng cách thay đổi hình thức tràn và các tỷ lệ kích thước hình học.

* Về hình thức tràn:

+ A.Noui & A.Ouamane (2003, 2011) cho thấy khả năng tháo qua tràn loại B tốt hơn tràn loại A nhưng với cột nước thấp $H/P < 0,4$. Khi H tăng, khả năng tháo của hai loại tràn này là tương tự nhau, (Hình 1.9) [43].

+ G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013), nghiên cứu mô hình PKW có tỷ lệ hình học $N=L/W=6,5$, chiều rộng phím nước vào/phím nước ra $W_i/W_o=1,0$, chỉ ra rằng khả năng tháo của các loại tràn giảm dần theo thứ tự loại B, A, D, C. Khả năng tháo của tràn loại B tốt hơn tràn loại A khoảng $5\% \div 10\%$, tràn loại A tốt hơn tràn loại C khoảng 15% khi tỷ lệ cột nước thấp $0,1 < H/P < 0,8$ [24].

+ J.Pralong và cs, (2011) qua nghiên cứu trên mô hình 1D cũng cho thấy, PKW loại B hiệu quả hơn PKW loại A khoảng 10% khi cùng chiều dài phím với $H/P < 0,5$. Hiệu quả tăng này là do phần đầu nhô về thượng lưu của PKW loại B lớn hơn PKW loại A khoảng 30%, làm tăng phần dòng chảy qua tường bên [45].

* Về hình thức ngưỡng:

Nghiên cứu của G.M. Cicero và cs (2013), Leite Ribeiro.M và cs (2011) nghiên cứu các hình dạng ngưỡng kiểu phẳng, ngưỡng $\frac{1}{4}$ cung tròn và nửa đường tròn cho thấy hình dạng ngưỡng chỉ ảnh hưởng tới khả năng tháo khi cột nước tràn thấp $H/P < 0,3$ tức là lớp dòng đáy sát đỉnh bị giới hạn bởi hình dạng đỉnh ngưỡng, làm giảm một phần khả năng tháo. Lượng Q giảm này là đáng kể khi lưu lượng tháo qua tràn nhỏ, lớp nước qua tràn mỏng. Ngược lại, nghiên cứu cho thấy hình dạng đỉnh tường bên ảnh hưởng đáng kể tới khả năng tháo qua PKW trong khi hình dạng đỉnh tường thượng lưu và tường hạ lưu ảnh hưởng không đáng kể. Đỉnh ngưỡng tràn có dạng nửa hình tròn sẽ cho khả năng tháo tốt hơn dạng $\frac{1}{4}$ hình tròn và tốt hơn dạng ngưỡng phẳng. So với dạng ngưỡng phẳng, ngưỡng tròn giúp tăng khả năng tháo khoảng từ $5\% \div 20\%$ với cột nước $H/P < 0,2$ và mức tăng ít hơn 4% khi $H/P > 0,3$ [25], [36].

* Về thông số hình học:

+ A.Ouamane (2003, 2006) đưa ra những kết quả ban đầu về ảnh hưởng của kích thước hình học tới khả năng tháo qua PKW. Hệ số tháo C_d của tràn tăng khi tỷ lệ chiều dài và chiều rộng tràn lớn ($N=L/W$) nhưng chỉ với cột nước thấp

$H/P < 0,3$ tương đương $H/W_o < 0,45$. Khi $H/P > 1,0$, khả năng tháo của tràn hầu như không phụ thuộc vào thông số N [44];

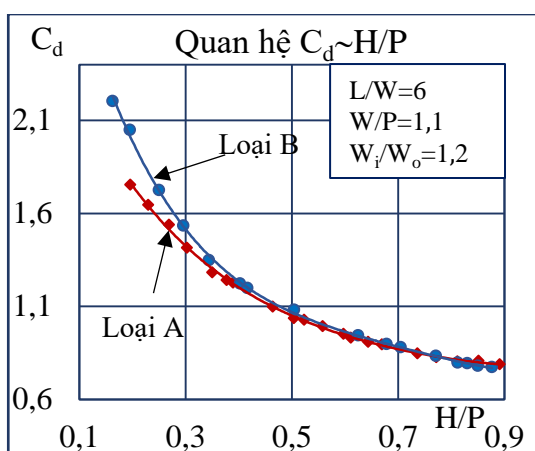
+ A.Noui & A.Ouamane (2003, 2011) với mô hình tràn có tỷ lệ cột nước $H/P < 1$ cho những kết quả so sánh chi tiết hơn [43]:

- Tỷ lệ giữa chiều rộng phím và chiều cao tràn W/P có ảnh hưởng tới Q , mức độ ảnh hưởng tùy vào cột nước H và chỉ thể hiện rõ rệt khi H nhỏ. Lưu lượng tháo qua tràn có cấu tạo $W/P=1,25$ tăng khoảng 9% so với tràn có $W/P=0,99$ khi $H/P=0,25$ và là 6% khi $H/P=0,5$.

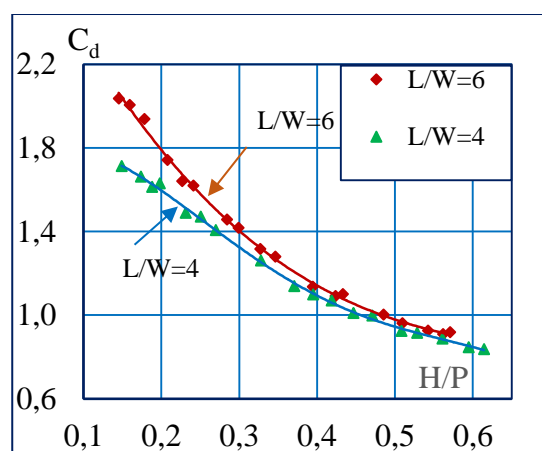
- Tỷ lệ tối ưu của chiều rộng phím tràn là W_i/W_o từ 1,2 đến 1,5, (Hình 1.12).

- Tương đồng với [44], [43] cũng cho thấy tràn tháo hiệu quả hơn khi tỷ lệ chiều dài và chiều rộng tràn $N=L/W$ thiên lớn, nhưng cũng chỉ với $H/P < 0,35$. Khi $H/P > 0,4$, N tăng không làm tăng Q . Tràn cho tối ưu về khả năng tháo khi $N=4 \div 6$.

- Đáy phím nước vào có độ dốc $S_i > 0$ làm cho dòng chảy qua tràn xuôi thuận hơn, làm tăng khả năng tháo tới 12% so với tràn có đáy phím nằm ngang khi tràn có $H/P > 0,6$.



Hình 1.9 Ảnh hưởng hình thức tràn kiểu A & B [43].



Hình 1.10 Ảnh hưởng của hệ số chiều dài tràn $N=4; 6$ [43].

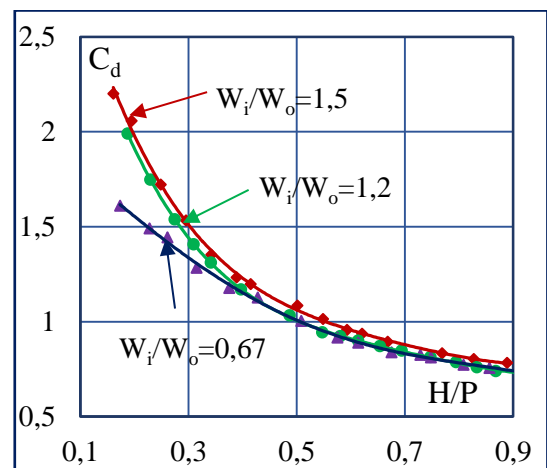
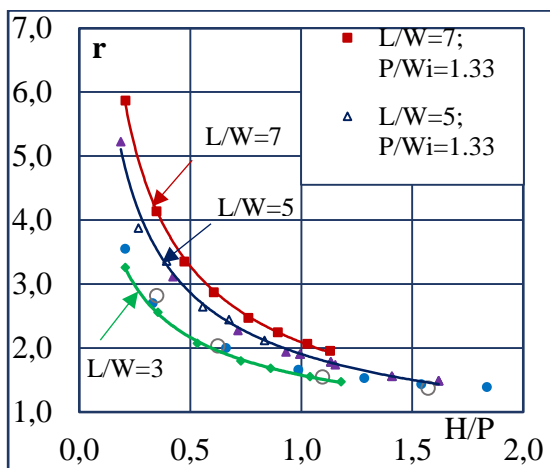
Như vậy các nghiên cứu trên đều cho thấy PKW có cấu tạo hình học khác nhau thì khả năng tháo chỉ khác khi cột nước tràn nhỏ $H/P < 0,3$ hay $H/W_o < 0,45 \div 0,5$. Tức là phần Q khác này là do chiều dài ngưỡng zic zắc khác nhau hay chiều dài thoát nước khác nhau mà chưa bị tác động bởi cấu tạo thủy lực.

+ O.Machiels và cs (2011), tập trung nghiên cứu về độ dốc đáy cho phím nước vào với dải giá trị S_i từ 0,25 tới 1,5 chỉ ra rằng, giá trị độ dốc thay đổi không làm thay đổi nhiều khả năng tháo. Độ dốc tối ưu về thủy lực là S_i từ 1,1 đến 1,2, nhưng hài hòa về kinh tế và thủy lực thì $S_i=0,4\div 0,8$ [40]. Độ dốc phím nước ra không ảnh hưởng tới khả năng tháo qua tràn.

Về vấn đề này còn có nghiên cứu của Belaabed.F và cs, 2017. Theo đó, với phím nước ra, trên đáy phím bố trí các bậc thì khả năng tháo qua tràn không bị ảnh hưởng khi chiều cao bậc nhỏ hơn một nửa chiều cao phím nước ra ($d\leq 0,5P_o$) [20]. Đối với tràn piano khi đã xác định được chiều cao tràn (P), chiều dài phím (B), thì khi đó $S=P/B$. Như vậy việc xác định giá trị của S chính là xác định B và L.

+ M.Leite Ribeiro và cs (2011), nghiên cứu cho PKW có tỷ lệ chiều dài và chiều rộng $N=L/W$ tăng từ 3 lên 7 cho kết quả tương đồng với [43], khả năng tháo của tràn tăng khoảng 50% với $H/P=0,2$. Khi $H/P>1,2$, khả năng tháo qua tràn tăng không đáng kể, (Hình 1.11).

Ngoài ra, hiệu quả tháo qua tràn tốt hơn khi tỷ lệ chiều rộng phím nước vào và phím nước ra W_i/W_o lớn hơn 1, nhưng Q cũng tăng không đáng kể nếu W_i/W_o quá lớn, tới $W_i/W_o=1,6$ hoặc $W_i/W_o=2,0$ (Hình 1.12), nghĩa là W_i/W_o nên trong khoảng $1,0<W_i/W_o<1,6$, [36].



Hình 1.11 Ảnh hưởng của $N=L/W$ [36] **Hình 1.12** Ảnh hưởng của W_i/W_o [43]

+ Nghiên cứu của G.Das Singhal & N.Sharma (2011), cũng đưa ra kết quả tương tự, theo đó hệ số tháo C_d giảm rất nhanh khi tỷ lệ cột nước H/P tăng từ 0,1 lên

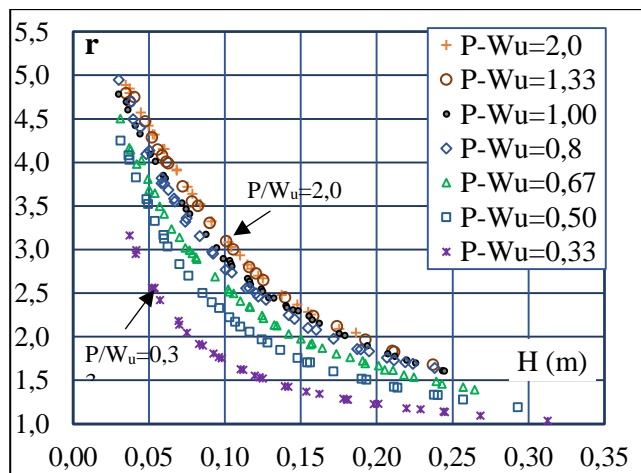
0,3. Giá trị C_d của tràn có chiều rộng phím ra nhỏ lớn hơn nhiều so với tràn có chiều rộng phím ra lớn và khả năng tháo của các tràn cũng khác nhau đáng kể khi $H/P < 0,3$ tương đương $H/W_o < 0,42$. [47].

+ O.Machiels, S. Erpicum và cs (2014), nghiên cứu cho PKW có thông số $N=L/W=5$, chiều cao phím nước vào và phím nước ra bằng nhau ($P=P_i=P_o$) đã xác định rõ hơn ảnh hưởng của các thông số hình học chính. Theo đó, mức độ tác động tới khả năng tháo qua tràn piano của các yếu tố giảm dần theo thứ tự là chiều cao tràn, chiều rộng và chiều dài phím.

Tối ưu hóa chiều cao tràn, Q qua PKW sẽ tăng gấp 4 lần ($r=4$) so với tràn thực dụng với cột nước tràn thấp và là 2 lần với cột nước tràn cao ($r=2$), trong đó hệ số lưu lượng của tràn thực dụng lấy bằng 0,42. Tối ưu hóa chiều rộng phím, Q qua PKW sẽ tăng khoảng 30% và tối ưu hóa chiều dài phím, Q sẽ tăng khoảng 20% so với tràn piano có kết cấu chưa tối ưu [27], [41].

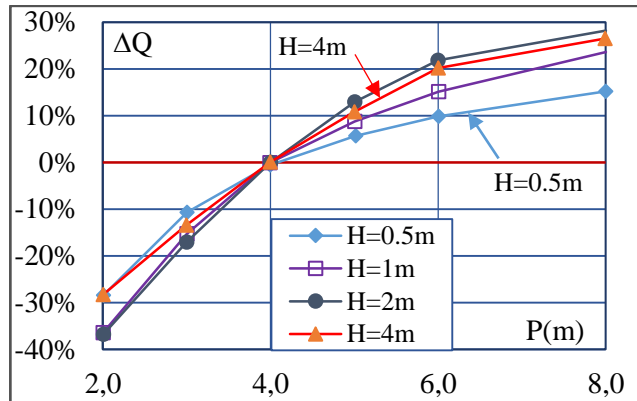
Hình 1.13 biểu thị quan hệ giữa $r \sim H$ theo P/W_u cho thấy, với cột nước tràn thấp, hệ số r dần hội tụ và đạt giá trị lớn nhất khoảng bằng 5 khi $H/P \approx 0,2$ ($H \approx 0,03m$). Với cột nước cao, hệ số r giảm nhanh và tiệm cận đến 1 khi $H/P \approx 2,0$ ($H \approx 0,32m$). Giá trị r gần về 1,0 tức khả năng tháo qua tràn piano tương đương tràn truyền thống.

Cũng theo [27], mặt cắt PKW có tỷ lệ $P/W_u = 0,5 \div 1,3$ sẽ cho tối ưu khả năng tháo. Trong đó chọn P/W_u thiên lớn ($P/W_u \approx 1,3$) sẽ ưu tiên về khả năng tháo và chọn P/W_u nhỏ ($P/W_u \approx 0,5$) sẽ thiên về hiệu quả kinh tế. Khi P/W_u giảm từ 1,33 xuống 0,83, khả năng tháo qua tràn giảm khoảng 10%.



Hình 1.13 Quan hệ $r \sim H/P$, xét ảnh hưởng của P/W_u tới khả năng tháo [27]

+ V.Lefebvre và cs (2013) mô phỏng bằng mô hình 3D cho PKW có chiều cao $P = 2m \div 8m$, so sánh với $P=4m$, chỉ ra rằng: Khi cột nước thấp $H=1m \div 2m$, nếu $P < 4m$ thì lưu lượng sẽ giảm đáng kể so với tràn có $P=4m$ ($\Delta Q\% < 0$) và ngược lại.



Hình 1.14 Ảnh hưởng của H, P đến hiệu quả tháo $\Delta Q\%$ [35].

Khi cột nước thấp nhưng chiều cao PKW là $P > 4m$ sẽ làm Q tăng đáng kể so với $P=4m$ ($\Delta Q\% > 0$), (Hình 1.14). Nghiên cứu này dù chưa hoàn toàn trong phạm vi tràn tiêu chuẩn nhưng về xu hướng khảo sát cho thấy sự phù hợp với các nghiên cứu đã có trên mô hình vật lý, đó là khi tỷ lệ cột nước H/P nhỏ, hệ số tháo C_d của PKW tăng [35].

Như vậy, mô hình chuẩn cho tràn piano đã bước đầu được đề cập trong kết quả nghiên cứu trước năm 2010. Từ sau 2010 đến nay, có nhiều nghiên cứu từng bước tiếp cận đến tỷ lệ hình học tối ưu của PKW, tuy nhiên chưa có công bố nào cập nhật, tổng hợp các kết quả mới này giúp giới hạn phạm vi, hạn chế khối lượng tính toán thiết kế mặt cắt tràn piano. Qua phân tích, tổng hợp các kết quả nghiên cứu đã có, luận án xác định tỷ lệ cấu tạo hình học của đơn vị tràn trên cơ sở tối ưu về kỹ thuật (khả năng tháo).

$$P/W_u = 0,5 \div 1,3; W_i/W_o = 1,2 \div 1,5; N = L_u/W_u = 4 \div 6. \quad (1.1)$$

Khi tràn piano có cấu tạo hình học đảm bảo điều kiện (1.1), trong luận án này gọi là tràn piano tiêu chuẩn.

1.2.3 Tràn chảy ngập

Khi tràn chảy ngập, các nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của tới khả năng tháo bởi các thông số dòng chảy gồm: độ sâu dòng chảy thượng lưu H_n , độ sâu dòng chảy hạ lưu h_n , độ sâu ngập trên tràn h_n , chênh lệch cột nước thượng lưu, hạ lưu z biểu thị qua đại lượng không thứ nguyên H_n/P , h_n/H_n hoặc z/P . PKW được

coi là làm việc trong điều kiện ngập khi mực nước hạ lưu cao hơn cao trình ngưỡng tràn, tức độ sâu ngập $h_n > 0$.

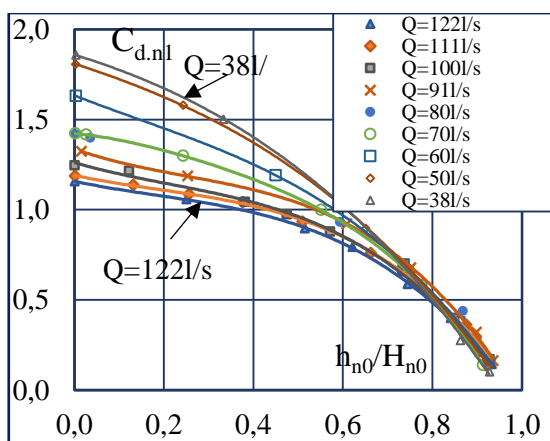
Các nghiên cứu về PKW chảy ngập không phong phú như nghiên cứu về PKW chảy tự do. Có rất ít các nghiên cứu của nước ngoài về lĩnh vực này, chủ yếu là các nghiên cứu của Việt Nam. Đó là do xuất phát từ nhu cầu áp dụng tràn piano làm công trình trên sông có cột nước thấp ở nước ta phổ biến hơn trên thế giới.

Hầu hết các nghiên cứu về PKW chảy ngập đều được thực hiện trên mô hình vật lý, có các tác giả: G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013), F.Belaabed & A.Ouamane (2010, 2013), Trương Chí Hiền và cs (2004), M. Hồ Tá Khanh (2012, 2014), Nguyễn Thanh Hải và cs (2010, 2015) và Lê Văn Nghị và cs (2012).

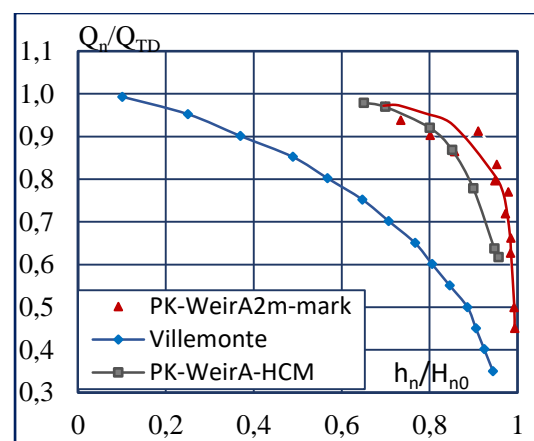
Các kết quả tiêu biểu nghiên cứu cho dòng chảy ngập qua tràn piano gồm:

+ F.Belaabed & A.Ouamane (2010) đã xây dựng biểu đồ quan hệ giữa hệ số khả năng tháo của PKW khi chảy ngập $C_{d,n}$ và độ tăng cột nước thượng lưu (H_{n0}/H_0) cho từng cấp lưu lượng xả cụ thể Q_n , theo đại lượng mô hình $Q_n = 38 \div 1221/s$. Theo đó, khả năng tháo qua PKW chảy ngập khác nhau rõ rệt khi độ ngập nhỏ. Khi độ ngập tăng, giá trị hệ số tháo qua tràn giảm dần và hội tụ, $C_{d,n}$ đạt giá trị nhỏ nhất khoảng 0,13 khi $h_n/H_{n0} \approx 0,9$, (Hình 1.15) [18].

+ Năm 2013, nghiên cứu của F. Belaabed & A. Ouamane cho PKW loại A, đã xác định hệ số ngập, $\sigma_n = Q_n/Q_{TD}$, là hàm quan hệ theo h_n/H_{n0} , với $h_n/H_{n0} > 0,68$, (Hình 1.16) và công thức (1.16) [19].



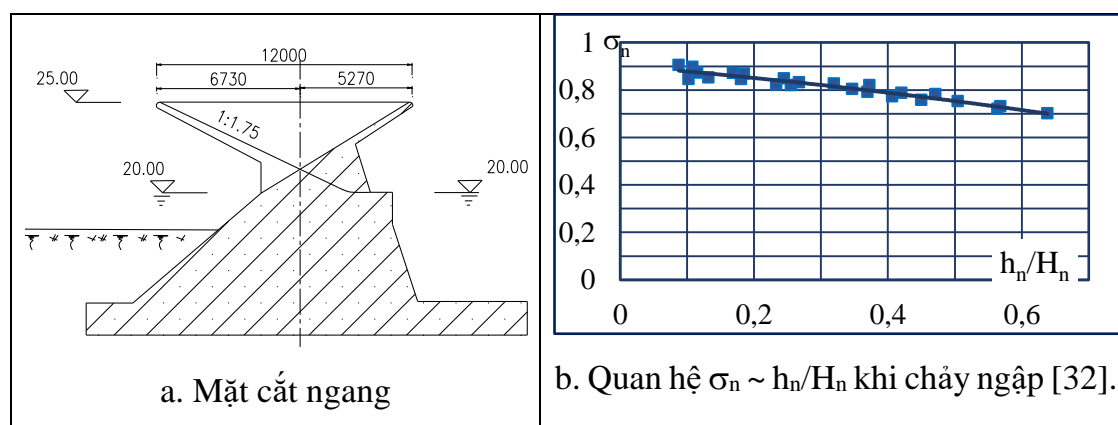
Hình 1.15 Quan hệ giữa $C_{d,n} \sim h_n/H_{n0}$ ứng với các cấp Q , [18]



Hình 1.16 Quan hệ giữa $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$, [19]

+ Ở Việt Nam, những nghiên cứu khởi đầu về tràn piano chảy ngập được thực hiện bởi Trương Chí Hiền, Trần Hiếu Thuận (2004) xác định cho PKW loại A có $P=1,5\text{m}$, cột nước tràn $H=0,2\div 1,0\text{m}$ theo kết quả tính toán thủy lực của tràn Rạch Đá Hàng – huyện Gò Dầu, Tây Ninh. Kết quả cho thấy với cùng cột nước tràn, khả năng tháo qua PKW chảy ngập giảm khoảng 20% so với PKW chảy tự do [6].

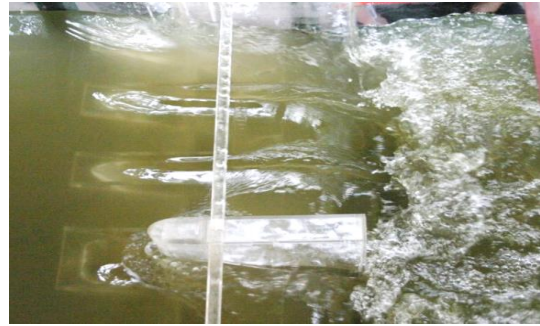
+ Một nghiên cứu điển hình về tràn piano chảy ngập dạng công trình đập dâng trên sông là nghiên cứu cho đập dâng Văn Phong, được thực hiện bởi M. Hồ Tá Khanh, Nguyễn Thanh Hải và cs (2010). Kết quả đã thiết lập đồ thị quan hệ giữa hệ số ngập σ_n và tỷ lệ cột nước ngập h_n/H_{n0} với điều kiện cụ thể của công trình. Tràn cao 7m ($P_i=5\text{m}$, $P_P=4\text{m}$), $N=5$; tỷ lệ cột nước $H/P=0,11\div 1,07$; độ ngập $h_n/H_n=0,55\div 0,71$. Xác định được hệ số khả năng tháo khi chảy ngập $C_{d,n}=0,959$; PKW có độ ngập $\sigma_n = 0,7\div 0,9$, lưu lượng đơn vị qua tràn tính theo dạng công thức $q=C_{d,n}\cdot\sqrt{2gP_p H_n}$, Hình 1.17 [15], [32].



Hình 1.17 Cấu tạo, kết quả thí nghiệm hệ số ngập đập dâng Văn Phong [5]

+ Năm 2015, kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Bộ “Nghiên cứu ứng dụng tràn có ngưỡng kiểu phím piano vào xây dựng công trình thủy lợi ở Việt Nam” (Nguyễn Thanh Hải và cs) đã thiết lập công thức xác định lưu lượng đơn vị cho PKW loại A và loại B khi chảy ngập (công thức (1.18), (1.19)), mặt cắt điển hình theo nguyên mẫu đập Văn Phong, phạm vi ứng dụng cho tràn có chiều cao thượng lưu $P_T=3,0\div 12,0\text{m}$, chiều cao PKW $P=6,0\text{m}$, chiều rộng đơn phím $W_u=4,8\div 10,5\text{m}$ [4]. Nghiên cứu đã mở rộng phạm vi khảo sát tỷ lệ cột nước ngập so với các nghiên cứu trước đây, $h_n/H_n > 0,12\div 0,33$.

+ Ngoài ra, năm 2013, nhóm nghiên cứu Lê Văn Nghi, Đoàn Thị Minh Yến và cs thí nghiệm công trình tràn xả lũ Ngàn Trươi PA3 (tràn piano rộng 105m xây trên nền mềm yếu), đã xác định hệ số ngập của tràn là $\sigma_n=0,93\div 0,998$ với $h_n/H=0.46\div -0.17$, Hình 1.18 [10].



Hình 1.18 PKW Ngàn Trươi, $\sigma_n=0,998$ khi $h_n/H = -0,17$ [10].

Trong đó xuất hiện trường hợp khi giảm h_n/H_n từ giá trị 0 xuống giá trị âm (-0.17) vẫn làm ảnh hưởng thay đổi (tăng) lưu lượng qua tràn.

Như vậy, phải chăng khi h_n/H_n có giá trị âm ($h_n/H_n < 0$), tràn piano đã làm việc trong điều kiện ngập, tương đồng với công bố của Rozanop cho tràn thực dụng loại có chân không (loại I- là chảy ngập khi $h_n/H_n > -0,15$) [3].

1.3 CÁC CÔNG THỨC TÍNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

Để xác định mức độ ảnh hưởng tới khả năng tháo của tràn piano khi mực nước thượng, hạ lưu thay đổi, các nghiên cứu tiên hành thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua PKW khi tràn chưa ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu - tràn chảy tự do và xác định hệ số ngập biểu thị sự ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu. Xác định khả năng tháo qua PKW chảy tự do là xác định hệ số tháo C_d hoặc hệ số hiệu quả tháo r . Xác định khả năng tháo qua PKW chảy ngập là tìm lưu lượng tháo khi tràn chảy tự do và hệ số ngập σ_n .

1.3.1 Dạng công thức

Do cấu tạo phức tạp gồm nhiều thành phần dòng chảy nên dạng công thức tính lưu lượng tháo qua tràn piano cũng đa dạng hơn tràn truyền thống, theo 2 cách [46]:

1. Một là xác định trực tiếp lưu lượng tháo Q qua tràn bằng cách xác định hệ số tháo (C_d). Trong đó Q được tính theo 2 dạng công thức:

+ Theo dạng công thức của tràn thực dụng: Phần lớn các nghiên cứu xác định lưu lượng qua PKW theo dạng công thức của tràn thực dụng với chiều dài tràn nước là chiều dài đường zic zắc L (1.2) hoặc chiều rộng tràn W (1.3).

$$Q=C_{d1}.L.\sqrt{2gH}^{3/2}; \quad (1.2)$$

$$Q=C_{d2}.W.\sqrt{2gH}^{3/2} \text{ hay } Q=C_{d3}.W.H.\sqrt{2gP}; \quad (1.3)$$

+ Theo dạng công thức của tràn thành mỏng: Theo đó, lưu lượng qua PKW là tổng đại số của 3 thành phần dòng chảy qua tường thượng lưu q_u , tường bên q_s và tường hạ lưu q_d :

$$q=q_u +q_s+q_d. \quad (1.4)$$

2. Hai là xác định gián tiếp: thông qua hệ số hiệu quả tháo r so với tràn thực dụng. Hệ số r được nghiên cứu xác định biểu thị số lần tăng lưu lượng tháo của tràn piano so với tràn thực dụng khi có cùng chiều rộng và cột nước tràn ($r=Q_P/Q_O$).

Tuy nhiên xác định theo hệ số r sẽ làm tăng sai số do phải tính gián tiếp qua lưu lượng của tràn thực dụng, do đó hầu hết các nghiên cứu gần đây đều theo hướng xác định trực tiếp hệ số tháo C_d .

1.3.2 Đối tượng nghiên cứu trong xác định hệ số tháo của tràn piano, C_d

Hệ số tháo C_d của PKW được nghiên cứu, xác định theo hai đối tượng:

+ Nghiên cứu cho công trình cụ thể: tức là xác định C_d cho tràn piano của công trình cụ thể, nhằm thiết kế trong điều kiện của chính công trình đó. Trong đó C_d là hàm với biến giá trị cột nước cần tháo của công trình.

+ Nghiên cứu công trình không cụ thể: hệ số C_d được xác định cho công trình đặc trưng (công trình không cụ thể) với hình dạng đơn vị tràn không cố định, tỷ lệ các đại lượng hình học (chiều cao, chiều rộng, chiều dài phím, ...) thay đổi trong phạm vi rộng, từ đó khuyến cáo các vùng giá trị tỷ lệ hình học cho tối ưu về kinh tế - kỹ thuật (khả năng tháo).

1.3.3 Công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano

Phần lớn các công thức được thiết lập xác định khả năng tháo qua PKW cho PKW không chịu ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu - tràn chảy tự do. Theo đó, xác định Q qua tràn là xác định hệ số hiệu quả tháo r hoặc hệ số tháo C_d . Hầu hết các công thức được xây dựng từ số liệu thực nghiệm, bằng phương pháp bình phương tối thiểu.

1.3.3.1 Tràn chảy tự do

+Theo hướng xác định hệ số hiệu quả tháo $r = Q_P/Q_0$ (Q_P - lưu lượng của tràn piano và Q_0 - lưu lượng tràn thực dụng) có nghiên cứu của M.Leite Ribeiro và cs (2011). Trong đó r là hàm mũ của 6 thông số hình học chính gồm chiều cao tràn P , chiều rộng phím vào W_i , phím ra W_o , tổng chiều rộng tràn W , tổng chiều dài ngưỡng L và cột nước H , được tổ hợp thành 6 đại lượng không thứ nguyên, công thức này có dạng rất phức tạp, không thuận lợi trong tính toán thiết kế, làm tăng sai số khi tính gián tiếp qua lưu lượng của tràn thực dụng [36]. Các nghiên cứu sau này ít sử dụng dạng thức này để khảo sát khả năng tháo của PKW.

$$r = \exp \left[\begin{array}{l} -0,25945 \left(\frac{P}{W_i}\right)^{1,4} \left(\frac{H}{P}\right)^{0,15} + 1,0056 \left(\frac{L}{W_i}\right)^{0,1} \left(\frac{P}{W_i}\right)^{0,5} \left(\frac{H}{P}\right)^{0,7} \\ + 0,067404 \left(\frac{L}{W_i}\right)^{0,3} \left(\frac{P}{W_i}\right)^{0,1} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0,25} \left(\frac{H}{P}\right)^{0,2} \\ + 13,9156 \left(\frac{L}{W}\right)^{0,35} \left(\frac{H}{P}\right)^{0,15} - 14,0239 \left(\frac{L}{W}\right)^{0,35} \left(\frac{H}{P}\right)^{0,2} + 0,094 \end{array} \right] - 1 \quad (1.5)$$

+ Theo hướng xác định hệ số tháo C_d trong công thức tính lưu lượng có dạng như của tràn thực dụng $Q = C_d \sqrt{2g} W H_0^{3/2}$, có các tác giả Abdorreza Kabiri-Samani & Javaheri, G.M.Cicero & J.R.Delisle, O.Machiels và cs:

- Abdorreza Kabiri-Samani & Javaheri (2012), đã xây dựng công thức thực nghiệm xác định hệ số tháo C_d , với giới hạn $H > 3\text{cm}$, $0,1 \leq H_0/P \leq 0,6$, $1 \leq B/P \leq 2,5$, $0,33 \leq W_i/W_o \leq 1,22$, $0 \leq B_o/B \leq 0,33$, $0 \leq B_i/B \leq 0,33$ [30]. Nghiên cứu này có tính khám phá, thăm dò sự biến động của các đại lượng không thứ nguyên ảnh hưởng đến khả năng tháo. Phạm vi biến động của các đại lượng là rất lớn, không tập trung vào một vùng tối ưu như các nghiên cứu về sau. Điều kiện thí nghiệm đã loại bỏ được ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài khi xét $H > 3\text{cm}$, nghiên cứu với cột nước qua tràn thấp $H_0/P \leq 0,6$.

Đây là nghiên cứu tiên phong tiếp cận theo hướng thiết lập công thức chung cho nhiều kiểu tràn, gồm tràn có công xôn 2 đầu đối xứng ($B_i = B_o \neq 0$), tràn có công xôn 2 đầu không đối xứng ($B_i \neq B_o \neq 0$) và tràn có công xôn 1 đầu ($B_i = 0$ hoặc $B_o = 0$). Tuy nhiên với vùng khảo sát rộng nên tính toán theo công thức còn sai số lớn.

$$C_d = \frac{2}{3} \left(0,212 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{-0,675} \left(\frac{L}{W}\right)^{0,377} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0,426} \left(\frac{B}{P}\right)^{0,306} \times \exp\left(1,504 \frac{B_o}{B} + 0,093 \frac{B_i}{B}\right) + 0,606 \right) \quad (1.6)$$

- G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013) xây dựng C_d là hàm bậc 4 của tỷ lệ cột nước tràn và chiều cao tràn H/P , $C_d=f(H/P)$, các hệ số của đa thức được xác định cụ thể cho từng loại tràn A, C, D. Phạm vi áp dụng công thức là $N= 6,5$, $W_i/W_o=1,0$ và $0,1 < H/P < 0,8$ [24].

Công thức này bị hạn chế bởi chỉ khảo sát theo 1 đại lượng thứ nguyên là H/P , tương tự như tràn truyền thống (thực dụng và thành mỏng) mà không đề cập đến các yếu tố cấu tạo khác của PKW. Cấu tạo đơn vị tràn trong nghiên cứu chưa là tràn tiêu chuẩn và nghiên cứu với cột nước thấp $H/P < 0,8$.

$$C_d = a_0 + a_1 \left(\frac{H}{P}\right) + a_2 \left(\frac{H}{P}\right)^2 + a_3 \left(\frac{H}{P}\right)^3 + a_4 \left(\frac{H}{P}\right)^4 \quad (1.7)$$

- O.Machiels và cs (2014) xác định lưu lượng đơn vị qua PKW là tổng của ba lưu lượng đơn vị thành phần: lưu lượng đơn vị qua tường thượng lưu (q_u); lưu lượng đơn vị qua tường hạ lưu (q_d) và lưu lượng đơn vị qua thành bên hay (q_s) (1.4). Chi tiết xem trong Phụ lục 1.

Công thức này là sự phát triển kế tiếp các kết quả nghiên cứu từ năm 2010 của nhóm tác giả trong đó đơn vị tràn có $W_i/W_o \leq 1,0$, không phải là đơn vị tràn tiêu chuẩn; Việc thành lập công thức theo phương pháp cộng đại số 3 thành phần chỉ phù hợp khi tràn piano làm việc hoàn toàn như một tràn thành mỏng có chiều dài thoát nước là tổng 3 đoạn zic zắc, như các tràn kiểu mẫu đã xây dựng ở Pháp, tức cột nước trên tràn nhỏ $H/P < 0,3$.

Với những tràn có cột nước lớn hơn, dòng chảy qua tường thượng lưu, hạ lưu có phương vuông góc với đường tràn nhưng dòng chảy qua tường bên bắt đầu có phương xiên, đồng thời phần dòng chảy qua tường thượng lưu sẽ lần dần sang đầu tường bên, việc phân định lưu lượng đơn vị qua từng đoạn là không rõ ràng, công thức không còn phù hợp, do đó các nghiên cứu sau này mở rộng với vùng cột nước $H/P > 0,3$ không thiết lập công thức theo phương pháp cộng đại số trên.

+ Ở Việt Nam, hầu hết các công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano từ nghiên cứu thực nghiệm và cho tràn có điều kiện cụ thể về kiểu tràn, thông số N hay chiều cao P. Trong đó, lưu lượng của PKW được khảo sát theo 1 đại lượng là cột nước tràn H tương tự như tràn truyền thống hoặc khảo sát theo H và chiều cao hốc phím P_p .

- Nghiên cứu của M.Hồ Tá Khanh, Trương Chí Hiền, Nguyễn Thanh Hải từ năm 2004 với PKW kiểu A, chiều cao tràn $P=4,5m$ [32], cho công thức:

$$\text{Với } N=5: q=6,4.H^{1.28} \text{ (với } H<2m) \text{ và } q=4,15.H.\sqrt{P_p} \text{ (với } H>2m). \quad (1.8)$$

$$\text{Với } N=4: q=5,6.H^{1.22} \quad (1.9)$$

- Nghiên cứu của Trương Chí Hiền (2014) cho PKW có: $P=4m$, $W_i/W_o=1,0$, $N=5,3$, thu được công thức [7]:

$$q= 6,224 H_0 + 0,442 \text{ (tràn loại A); } q = 6,057 H_0 - 1,246 \text{ (tràn loại D)} \quad (1.10)$$

- Nghiên cứu của Lê Văn Nghị và cs (2012) trên nguyên mẫu là tràn xả lũ Ngân Trươi PA3, PKW loại A, tỷ lệ mô hình 1/30,4 [10], xác định được:

$$q=3,9.H.\sqrt{P_p} \quad (1.11)$$

Phạm vi ứng dụng các công thức trên là rất hẹp bởi để áp dụng phù hợp đòi hỏi công trình phải có điều kiện tương đồng cả về đặc trưng dòng chảy và kích thước hình học.

Trong công thức (1.8) của M.Hồ Tá Khanh và cs đã bước đầu có sự thiết lập công thức theo vùng cột nước với ranh giới $H=2m$, điều mà trước đây các nghiên cứu ở nước ngoài chưa đề cập tới. Đó là bởi nghiên cứu này cho công trình ngưỡng thấp trên kênh, cột nước tràn thay đổi nhiều từ nhỏ đến lớn, và tác giả đã nhận thấy sự khác nhau đáng kể trong phân bố số liệu thực nghiệm. Dù việc lựa chọn ranh giới cột nước này mới chỉ dựa trên sự phân bố của chuỗi số liệu thí nghiệm, chưa dựa trên cơ sở về đặc trưng dòng chảy, nhưng đã thể hiện phát hiện của các tác giả về sự khác nhau rõ rệt giữa khả năng tháo qua PKW khi tràn có cột nước tràn thấp và cột nước tràn cao, rất khác với tràn truyền thống.

- Theo hướng tư duy trên, các công thức xác định khả năng tháo trong nghiên cứu của đề tài cấp Bộ cũng được thiết lập theo vùng cột nước ứng với loại

trần cụ thể. Trần loại A có cột nước ranh giới $H_0=2\text{m}$ và $H_0=3\text{m}$ cho trần loại B. Mặt cắt và cấu tạo đơn vị trần trong nghiên cứu theo nguyên mẫu của trần Văn Phong; kích thước công trình là đại lượng có thứ nguyên: chiều cao phím $P_i=P_o=6,0\text{m}$; chiều cao tính tới đáy kênh thượng lưu: $P_T=3\div 8\text{m}$; (PKW loại A) và $P_T=4\div 12\text{m}$; (PKW loại B); Chiều rộng đơn vị trần $W_u=4,8\div 10,5\text{m}$; Tỷ lệ chiều rộng phím nước vào và phím nước ra $W_i/W_o=1,2$, cột nước trần $0,5\leq H_0<6,5\text{m}$ [4]:

- Với PKW loại A, (khi $P_T\geq 6\text{m}$, lấy $P_T=6,0\text{m}$):

$$\text{Khi } 0,5\leq H_0\leq 2,0\text{m: } q = 1,079 \left(\frac{P_T}{H_0}\right)^{0,277} \left(\frac{W_u}{H_0}\right)^{-0,045} \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (1.12)$$

$$\text{Khi } 2,0<H_0<6,5\text{m: } q = 0,732 \left(\frac{P_T}{H_0}\right)^{0,297} \left(\frac{W_u}{H_0}\right)^{0,094} \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (1.13)$$

- Với PKW loại B, (khi $P_T\geq 9\text{m}$, lấy $P_T=9,0\text{m}$):

$$\text{Khi } 0,5\leq H_0\leq 3,0\text{m: } q = 0,814 \left(\frac{P_T}{H_0}\right)^{0,444} \left(\frac{W_u}{H_0}\right)^{-0,055} \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (1.14)$$

$$\text{Khi } 3,0<H_0\leq 7,0\text{m: } q = 0,692 \left(\frac{P_T}{H_0}\right)^{0,316} \left(\frac{W_u}{H_0}\right)^{0,099} \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (1.15)$$

Chắc chắn ranh giới cột nước phân vùng trong các công thức này sẽ không phải là một đại lượng thứ nguyên cho các loại trần. Đặc trưng thủy lực, trạng thái, chế độ chảy của dòng qua trần piano theo vùng cột nước cũng sẽ khác nhau rõ rệt. Luận án sẽ làm sáng tỏ điều này làm cơ sở để tiếp tục xác định khả năng tháo qua trần khi có ảnh hưởng của mực nước hạ lưu.

1.3.3.2 Trần chảy ngập

Lưu lượng tháo khi trần bị ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu – trần chảy ngập được xác định gián tiếp, bằng tích của lưu lượng tháo qua trần chảy tự do với hệ số ngập, $Q_n=\sigma_n*Q_{TD}$. Theo đó, xác định lưu lượng qua trần chảy ngập là thiết lập công thức tính hệ số ngập σ_n .

Xây dựng công thức tính σ_n từ số liệu thực nghiệm có các tác giả như F. Belaabed & A. Ouamane, M. Hồ Tá Khanh và cs, Nguyễn Thanh Hải và cs:

+ Theo F. Belaabed & A. Ouamane (2013), ứng dụng cho PKW loại A có $N=4$, $W_i/W_o=0,83$; điều kiện ngập $0,68\leq h_n/H_n\leq 0,99$ [19]:

$$\sigma_n = \frac{Q_n}{Q_{TD}} = 1,158 \left[1 - \left(\frac{h_n}{H} \right) \right]^{0,126} \quad (1.16)$$

+ M. Hồ Tá Khanh (2012) xây dựng công thức tính σ_n của PKW loại A, $N=6$, $W_i/W_o=1,0$; điều kiện ngập $0,65 \leq h_n/H_n \leq 0,96$ [33]:

$$\sigma_n = \frac{Q_n}{Q_{TD}} = 1,289 \left[1 - \left(\frac{h_n}{H} \right) \right]^{0,225} \quad (1.17)$$

+ Đề tài cấp Bộ đã xây dựng công thức xác định hệ số ngập cho 2 loại tràn A và B, áp dụng với cột nước tràn $1,8 \leq H_{n0} < 6,5m$; điều kiện ngập $h_n/H_{n0} > 0,12 \div 0,33$ [4]:

$$\text{PKW loại A: } \sigma_n = 1,048 \left(\frac{Z}{P_T} \right)^{0,203} \left(\frac{h_n}{P_H} \right)^{-0,094} \left(\frac{W_u}{P_T} \right)^{0,027} \quad (1.18)$$

$$\text{PKW loại B: } \sigma_n = 1,198 \left(\frac{Z}{P_T} \right)^{0,244} \left(\frac{h_n}{P_H} \right)^{-0,024} \quad (1.19)$$

Các nghiên cứu trên đều thiết lập công thức xác định hệ số ngập cho tràn piano chảy ngập rõ rệt, $h_n/H_{n0} > 0,12 \div 0,3$ và $0,65$ đồng thời cho thấy hệ số ngập nghịch biến với độ ngập h_n .

Công thức của F. Belaabed & A. Ouamane (2013) và M. Hồ Tá Khanh (2012) có cùng dạng hàm, là hàm mũ của 01 biến h_n/H , sự nghịch biến giữa σ_n và h_n được biểu thị qua đại lượng $(1-h_n/H)$, với điều kiện tràn có độ ngập lớn $h_n/H_n > 0,65$. Các hệ số của 2 công thức này không khác nhau quá nhiều dù mô hình thí nghiệm và cấu tạo hình học đơn vị tràn không giống nhau.

Công thức của đề tài có phạm vi nghiên cứu rộng hơn với $h_n/H_{n0} > 0,12 \div 0,33$, là dạng hàm mũ của 3 đại lượng không thứ nguyên, biểu thị ảnh hưởng của chiều cao tràn thượng lưu, chiều rộng đơn vị tràn, độ sâu ngập h_n , chênh lệch mực nước thượng hạ lưu z và yếu tố chiều cao tràn hạ lưu P_H mà những nghiên cứu khác chưa đề cập tới. Tuy nhiên biểu thị sự nghịch biến giữa σ_n và h_n của công thức bởi đại lượng (h_n/P_H) có số mũ âm, do đó khi h_n giảm nhỏ, σ_n tăng rất nhanh, vượt giá trị ngưỡng 1,0. Đường quan hệ của σ_n và h_n là hàm nghịch biến có hệ số góc tới 30° .

Tổng hợp các dạng công thức đã có, phạm vi áp dụng, các đại lượng ảnh hưởng tới khả năng tháo, thể hiện trong Bảng 1.2.

Bảng 1.2 Phạm vi áp dụng của các công thức đã có tính khả năng tháo qua PKW

| T T | Tác giả | Dạng công thức tính Q | Phạm vi áp dụng | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|-----------|-----------------------------------|---------------|--------|-----------|----------------|
| | | | Không thứ nguyên | | | | Có thứ nguyên | | | |
| | | | H/P | P/ W _u | B/ P | W _i /W _o | N | P | H | W _u |
| I | Tràn chảy tự do | | | | | | | | | |
| 1 | Kabiri-Samani.A & Javaheri (2012) | $Q = C_d \sqrt{2g} WH^{3/2}$ | 0,1 ÷ 0,6 | | 1,0 ÷ 2,5 | 0,3 ÷ 1,22 | | | | |
| 2 | G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013) | | 0,1 ÷ 0,8 | | | 1 | 6,5 | | | |
| 3 | O.Machiels et al. (2014) | $q = q_u + q_d + q_s$ | 0,1 ÷ 2,5 | 0,33 ÷ 2,0 | | <1 | | | | |
| 4 | M.Hồ Tá Khanh và cs (2004) | $q = 6,4 \cdot H^{1.28}$ | | | | | 5 | | <2 | |
| | | $q = 4,15 \cdot H \cdot \sqrt{P_p}$ | | | | | 5 | | >2 | |
| | | $q = 5,6 \cdot H^{1.22}$ | | | | | 4 | | | |
| 5 | Trương Chí Hiền (2014) Loại A | $q = 6,224 \cdot H_0 + 0,442$ | | | | 1 | 5,3 | 4 | | |
| | Trương Chí Hiền (2014) Loại D | $q = 6,057 H_0 - 1,246$ | | | | 1 | 5,3 | 4 | | |
| 6 | Lê Văn Nghị và cs (2012) | | | | | 1,2 ÷ 5 | 5 | 4,7 | | |
| 7 | Nguyễn Thanh Hải và cs, 2015 | | | | | 1,2 | | 3 ÷ 12 | 0,5 ÷ 7,0 | 4,8 ÷ 10,5 |
| II | Tràn chảy ngập | | | | | | | | | |
| 1 | F. Belaabed & A. Ouamane (2013) | | 0,68 ÷ 0,99 | | | | | | | |

| T T | Tác giả | Dạng công thức tính Q | Phạm vi áp dụng | | | | | | | |
|--------|------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|---------|-----------------------------------|---------------|----------|-------------|------------------|
| | | | Không thứ nguyên | | | | Có thứ nguyên | | | |
| | | | H/P | P/ W _u | B/ P | W _i /W _o | N | P | H | W _u |
| 2 | M. Hồ Tá Khanh (2012) | | 0,65÷ 0,99 | | | | | | | |
| 3 | Nguyễn Thanh Hải và cs, 2015 | | | | | 1,2 | | 3÷ 12 | 0,5÷ 7,0 | 4,8 ÷10 ,5 |

1.4 LUẬN BÀN

Các nghiên cứu về tràn piano dù qua nhiều thời kỳ, được thực hiện ở các nước khác nhau, do nhiều nhóm thí nghiệm nhưng đều cho thấy:

+ Ảnh hưởng của mực nước hạ lưu tới khả năng tháo qua PKW chưa được nghiên cứu nhiều, nghiên cứu cho tràn khi có độ ngập lớn $h_n/H > 0,65$ hoặc cho kết quả chưa phù hợp với độ ngập nhỏ. Các kết quả nghiên cứu mới dừng ở sự tổng kết từ số liệu thực nghiệm mà chưa phân tích theo đặc trưng dòng chảy qua tràn, nên các chế độ chảy, trạng thái ranh giới quá độ khi mực nước hạ lưu thay đổi chưa được quan tâm.

+ Khi dòng qua PKW chưa bị ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu – tràn chảy tự do, sự phân bố các đường quan hệ giữa hệ số tháo C_d và tỷ lệ cột nước tràn H (H/P) là rất khác nhau, phụ thuộc vào cột nước thượng lưu H. Khoảng cách giữa các đường quan hệ đồ thị của hệ số tháo C_d và cột nước tràn H (hoặc H/P) là rất lớn khi cột nước tràn nhỏ. Cột nước tràn càng nhỏ, khả năng tháo của mỗi loại tràn càng khác nhau rõ rệt, nhưng chỉ với $H/P < 0,3$ tương đương $H/W_o < 0,5$, chính là khả năng tháo bị ảnh hưởng theo tổng chiều dài thoát nước L của ngưỡng PKW, dòng chảy qua tràn chưa bị hạn chế bởi chiều rộng ô thoát nước (chiều rộng phím nước ra). Đây cũng là vùng làm việc hiệu quả nhất của tràn piano, do đó hầu hết các tràn PKW ở Pháp đều được thiết kế để làm việc trong vùng cột nước $H/P < 0,3$.

Khi cột nước tràn tăng dần, sự khác nhau này giảm dần. Các đường quan hệ có xu hướng dần hội tụ với $H/P > 0,7 \div 0,8$ tương đương $H/W_o > 1,6$. Đây cũng là lý do mà phần nhiều các nghiên cứu về tràn PKW chỉ dừng lại ở phạm vi cột nước tràn $H/P < 0,8$.

Có sự khác nhau này ở tràn piano và khác nhiều so với tràn truyền thống là bởi dòng qua tràn PKW bị giới hạn bởi chiều rộng phím nước ra – chiều rộng lòng thoát của tràn. Sự giới hạn này sẽ xảy ra khi:

- Mức nước hạ lưu thấp, nhưng phạm vi lòng phím thoát nhỏ so với cột nước thượng lưu tràn.

- Mức nước hạ lưu cao làm cản trở khả năng dòng thoát qua PKW.

Khi đó, sự giới hạn này sẽ làm dòng trên phím nước ra và phím nước vào va chạm, tương tác với nhau. Lưu tốc của dòng trong khu tương tác giảm, làm dâng mực nước trên khác phím tràn, giảm khả năng tháo qua tràn. Dưới vùng tương tác này, dòng chảy qua các đoạn tường tràn là độc lập nên khả năng tháo qua tràn hoàn toàn phụ thuộc vào tổng chiều dài thoát nước theo ngưỡng zíc zắc, hay các tràn có cấu tạo đơn vị khác nhau sẽ có Q khác nhau đáng kể.

Tuy nhiên do không phân tích từ đặc trưng thủy lực dòng chảy, chỉ dựa trên trực quan từ số liệu thực nghiệm nên các công bố đã có về khả năng tháo qua PKW đưa ra các kết quả cụ thể có phạm vi phù hợp hẹp cho từng điều kiện nghiên cứu. Như công thức (1.4) thiết lập dưới dạng cộng đại số vẫn phù hợp bởi chỉ áp dụng cho tràn có cột nước nhỏ $H/P < 0,3$, ở đó các thành phần dòng chảy qua từng đoạn tường tràn zíc zắc là hoàn toàn riêng rẽ, không tương tác với nhau. Hay công thức (1.8) và từ (1.12) đến (1.18) đã thiết lập theo vùng cột nước với giá trị ranh giới là đại lượng thứ nguyên $H = 2m$ (3m), biểu thị sự phát hiện về xu hướng khả năng tháo là khác nhau khi tràn có cột nước thấp và cột nước cao. Chắc chắn giá trị ranh giới này sẽ thay đổi khi các tràn có điều kiện khác với điều kiện của (1.8) và (1.12) đến (1.18) bởi thực chất giá trị ranh giới này tùy thuộc vào sự tương tác của dòng qua tràn với lòng phím thoát.

Bởi vậy cần xác định khả năng tháo theo hướng phân tích, lập luận từ đặc trưng thủy lực để phản ánh đúng bản chất vật lý, giải thích được cơ chế làm việc phức tạp của tràn piano nhất là khi có ảnh hưởng của mực nước hạ lưu.

1.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Sau hơn 20 năm nghiên cứu và phát triển, tràn piano đã ngày càng hoàn thiện hơn về cấu tạo hình học nhằm không ngừng cải thiện hiệu quả tháo. Từ các nghiên cứu rời rạc cho từng kiểu tràn, từng nhóm thông số phân tán đến nghiên cứu tổng quát, so sánh giữa nhiều nhóm thông số chính, các nhà khoa học đã xác định được các thông số hình học có ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng tháo qua tràn PKW, theo thứ tự: chiều cao tràn, chiều rộng đơn vị tràn và chiều dài phím.

Mỗi nghiên cứu cho kết quả về một phạm vi khác nhau, nhưng có sự kế tiếp phát triển để hình thành nên kết quả tổng quát của tràn piano, theo đó tràn sẽ cho tối ưu về khả năng tháo và kinh tế khi có kích thước hình học trong phạm vi: tỷ lệ giữa chiều cao tràn và chiều rộng đơn vị phím $P/W_u=0,5\div 1,3$; tỷ lệ chiều rộng phím nước vào/phím nước ra từ 1,2 đến 1,5 ($W_i/W_o=1,2\div 1,5$); tỷ lệ chiều dài tràn/chiều rộng tràn từ 4 tới 6 ($N=L/W=4\div 6$); trong luận án này, gọi là tràn piano tiêu chuẩn.

Trong phạm vi tiêu chuẩn này, khả năng tháo của tràn piano có cấu tạo khác nhau sẽ khác nhau đáng kể (tới 15%) nhưng chỉ với cột nước thấp $H/P < 0,3$ tương đương $H/W_o < 0,5$, tức dòng chảy chưa bị hạn chế bởi chiều rộng phím ra mà quyết định bởi tổng chiều dài zíc zắc của ngưỡng. Khi $H/P > 0,3$, hình dạng, cấu tạo PKW không ảnh hưởng nhiều tới khả năng tháo. Sự phân biệt rõ rệt ảnh hưởng của cấu tạo tới khả năng tháo của PKW theo vùng cột nước là điểm rất khác so với tràn truyền thống. Nó thể hiện đặc trưng ranh giới tương tác giữa dòng trên phím nước vào và phím nước ra cũng như dòng chảy ở hạ lưu tới khả năng tháo qua tràn.

Tuy nhiên có rất ít nghiên cứu phân tích tới sự tương tác này cũng như sự ảnh hưởng của mực nước hạ lưu tới khả năng tháo, chưa có công bố nào xác định rõ ràng ranh giới chế độ chảy mà khả năng tháo qua tràn bắt đầu bị ảnh hưởng; hay phân tích quá trình thay đổi khả năng tháo qua PKW trên cơ sở các đặc trưng dòng chảy qua tràn.

Hầu hết các nghiên cứu, công thức công bố là kết quả đơn cử của số liệu thực nghiệm, nên mới phù hợp trong phạm vi hẹp, điều kiện cụ thể, cho các công trình có thứ nguyên hoặc sai số còn lớn bởi chưa phản ánh chung được bản chất vật lý của dòng qua tràn piano.

Do đó, kế thừa các thành tựu đã có, luận án nghiên cứu tràn piano trong phạm vi tràn tiêu chuẩn, nhằm xác định đặc trưng thủy động lực học dòng chảy nội tại, nối tiếp hạ lưu tràn, xác định các chế độ chảy, ranh giới các trạng thái chảy làm cơ sở xây dựng công thức thực nghiệm xác định khả năng tháo khi có ảnh hưởng của mực nước hạ lưu.

Công thức thực nghiệm được thiết lập theo các đại lượng không thứ nguyên theo đặc trưng trạng thái chảy sẽ đảm bảo kết quả đủ tổng quát, đơn giản, phù hợp với nhiều điều kiện cụ thể và đáp ứng nhu cầu thực tiễn. Bởi trong tính toán điều tiết, để xác định hình thức, quy mô công trình tháo không chỉ đòi hỏi độ chính xác của công thức tính cho trường hợp đỉnh lũ (Q_{tk}) mà còn phải đảm bảo chính xác cho cả quá trình xả lũ của công trình.

Chương 2 CƠ SỞ KHOA HỌC NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

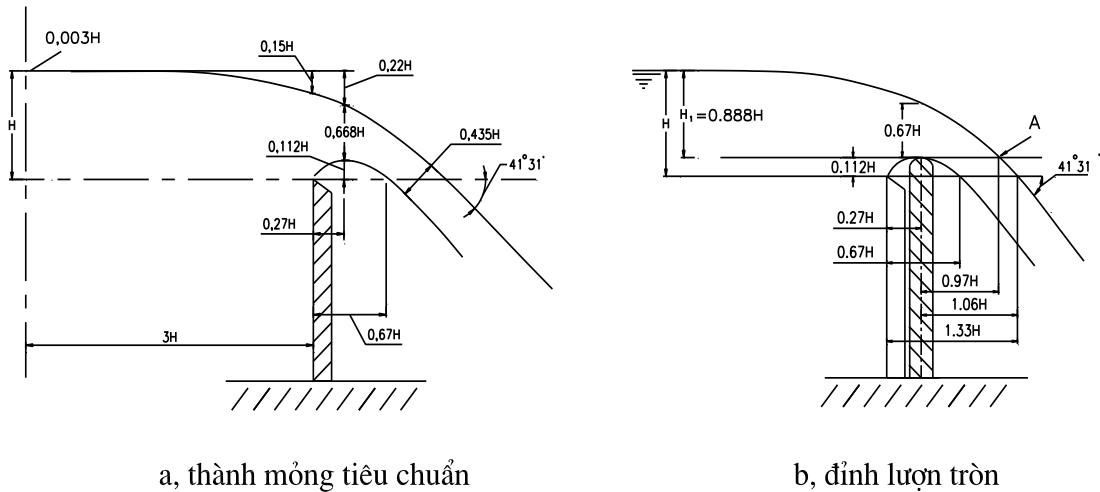
Tràn piano cấu tạo gồm các tấm mỏng xếp theo hình zic zắc nhằm tăng chiều dài thoát nước so với tràn truyền thống. Khi cột nước thấp, dòng chảy qua ngưỡng hình zic zắc của PKW như qua đập tràn thành mỏng. Khi cột nước cao, PKW làm việc như đập tràn thực dụng. Để có cơ sở khoa học và làm sáng tỏ các trạng thái chảy này, chương hai luận án trình bày: lý thuyết thực nghiệm nghiên cứu mô hình vật lý và mô hình toán 3D trong đó mô hình 3D được dùng để hỗ trợ mô phỏng, làm rõ hơn đặc trưng thủy động lực học dòng chảy qua tràn piano nhằm phân tích các yếu tố đặc trưng ảnh hưởng tới khả năng tháo; lập phương trình nghiên cứu thực nghiệm; xây dựng mô hình vật lý, mô hình toán, đánh giá sự phù hợp của số liệu thực nghiệm với các nghiên cứu đã có.

2.1 PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN

2.1.1 Đặc điểm dòng chảy qua tràn piano

Dòng chảy từ thượng lưu chảy tràn qua 3 phía của ngưỡng piano gồm tường thượng lưu, tường hạ lưu và tường bên của các phím. Dòng chảy qua tường thượng lưu và tường hạ lưu luôn có luôn có phương vuông góc với thành tràn, có đặc điểm như dòng qua tràn thành mỏng. Dòng chảy qua tường bên có phương vuông góc với tường tràn khi cột nước tràn nhỏ và chuyển dần sang phương xiên đến phương song song với tường bên khi cột nước tràn tăng dần. Sự thay đổi này làm cho PKW có chế độ làm việc như tràn thành mỏng khi cột nước tràn nhỏ và chuyển dần sang trạng thái làm việc như tràn thực dụng khi cột nước tràn lớn.

Khi cột nước tràn nhỏ, dòng từ phím nước vào tràn qua thành bên đổ sang phím nước ra. Lưu tốc dòng đến nhỏ, phím nước vào như một ô chứa phân bố, điều tiết lại giúp dòng từ phím nước vào chảy sang phím nước ra có phương gần như vuông góc với thành bên. Khi đó hình dạng làn nước qua thành bên có đặc điểm tương tự như làn nước qua đập tràn thành mỏng như thể hiện trên Hình 2.1. Khi cột nước tràn tăng, hình dạng, đặc điểm dòng chảy sẽ được nghiên cứu, phân tích và trình bày chi tiết trong mục 3.1 của luận án.



Hình 2.1 Hình dạng làn nước qua đập tràn thành mỏng [1].

+ Theo lý thuyết [1], tính toán từ hình dạng làn nước của đập tràn thành mỏng tiêu chuẩn (Hình 2.1a), tại vị trí ngang cao trình ngưỡng, điểm giao thoa cách mép thượng lưu đập là: $0,67H + \frac{0,435}{\sin(41^{\circ}31')} = 1,33H$.

Với đỉnh tràn có dạng nửa hình tròn, đường mặt nước bám theo đường cong đỉnh, ngang vị trí cong nhất của làn nước dưới (Hình 2.1b), mặt trên làn nước sẽ cách tim đập tràn 1 khoảng:

$$L = 1,33H - 0,27H - \frac{0,112H}{\tan(41^{\circ}31')} = 0,93H = 0,93 \cdot \frac{H_1}{0,89} = 1,04H_1 \approx 1H_1$$

Như vậy nếu bố trí hai đập tràn đỉnh lượn tròn song song có cùng cột nước tràn H_1 , hai làn nước đổ xuống giao nhau. Cao trình điểm giao thoa A ở mặt trên của hai làn nước sẽ ngang bằng ngưỡng tràn khi hai đập tràn cách nhau một khoảng bằng 2 lần cột nước, $W_0 \approx 2H_1$, hay điểm A thấp hơn ngưỡng tràn khi $H_1 < 0,5W_0$ và ngược lại.

Việc xác định điểm giao thoa này cho thấy khi tràn làm việc dưới vùng điểm A, dòng qua PKW như qua đập tràn thành mỏng. Khi tràn bắt đầu làm việc trên vùng điểm A, làn nước đổ xuống từ hai thành bên xuống phím ra sẽ xáo trộn, tương tác, ảnh hưởng đến dòng trên phím nước vào, tràn piano không làm việc như tràn thành mỏng nữa mà bắt đầu chuyển trạng thái dần làm việc như tràn thực dụng. Do đó, khả năng tháo qua tràn piano cần xác định theo các vùng dòng chảy có đặc điểm khác biệt này.

2.1.2 Dạng công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano

Coi tràn piano làm việc như tràn truyền thống mà ở đó mặt tràn gồm nhiều khe, rãnh. Ban đầu, dòng chảy bám theo các ngưỡng zíc zắc thoát xuống ô nước ra và về hạ lưu như chảy qua đập tràn thành mỏng. Sau đó, khi cột nước tràn tăng dần, khối nước phủ trùm lên toàn bộ các phím, PKW làm việc như đập tràn thực dụng. Ở đây, sẽ không xuất hiện khả năng PKW làm việc như tràn đỉnh rộng, bởi không thỏa mãn được điều kiện tỷ lệ chiều dài ngưỡng tràn và cột nước $B/H=3\div 8$.

Trong thực tế, nhiều tràn piano có cột nước thiết kế nhỏ, PKW luôn làm việc như tràn thành mỏng hoặc ngược lại. Luận án sẽ phân tích cơ sở khoa học về các yếu tố hưởng tới khả năng tháo qua tràn piano theo 2 trạng thái chảy tương tự như qua hai loại tràn thành mỏng và tràn thực dụng.

Phân định ranh giới của hai trạng thái chảy được tiếp cận theo khái niệm chảy đầy hay không đầy phím ra, là cách tiếp cận mới của luận án, được trình bày trong mục 3.2.

2.1.2.1 Tràn piano làm việc như đập tràn thành mỏng

Khi tràn piano làm việc như tràn thành mỏng, theo [1], lưu lượng qua PKW được xác định là hàm của tổng chiều dài tràn nước L , cột nước tràn H và hệ số lưu lượng m .

+ Với tràn chảy không ngập:

$$Q = m \cdot L \sqrt{2g} H_0^{3/2} \text{ hay } Q = m_0 \cdot L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.1)$$

+ Với tràn chảy ngập:

$$Q = \sigma_n m \cdot L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.2)$$

Trong đó, hệ số lưu lượng m_0 (m) là hàm của các đại lượng không thứ nguyên H/P_T hoặc $H/(H+P_T)$; Hệ số ngập σ_n là hàm của h_n/P_H và z/H ;

Như vậy khi tràn piano chảy tự do, với cột nước tràn nhỏ, cần xem xét các yếu tố chiều dài đường tràn L , cột nước tràn H , chiều cao tràn P .

Khi tràn chảy ngập cần xác định yếu tố độ ngập h_n và chênh lệch mực nước thượng hạ lưu z qua tràn.

2.1.2.2 Tràn piano làm việc như đập tràn thực dụng

Khi cột nước tràn lớn, PKW làm việc như đập tràn thực dụng có mặt cắt gồm nhiều ngăn nhỏ.

Lưu lượng qua tràn ở trạng thái chảy tự do xác định theo công thức [1]:

$$Q_{TD} = m \cdot B \cdot \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (2.3)$$

Khi chảy ngập: $Q_n = \sigma_n \cdot Q_{TD}$ (2.4)

Trong đó, hệ số lưu lượng m trong (2.3) được xác định theo điều kiện làm việc cụ thể về hình dạng mặt cắt, cột nước, tương tự như đập tràn thực dụng. Thông số mực nước hạ lưu khi chảy ngập được xác định là mực nước ngay sau đập với dòng chảy qua công trình là dòng êm, nối tiếp hạ lưu bằng nước nhảy ngập hoặc không có nước nhảy [1], [3].

Tuy nhiên, với cấu tạo phức tạp bởi các phím nước vào, phím nước ra, dòng chảy nội tại tràn piano không là một thể thống nhất như luồng chảy qua tràn thực dụng mà bị chia làm nhiều thành phần theo cấu trúc PKW. Trong đó, một phần lớn lượng dòng chảy qua tường thượng lưu và thành bên của phím đổ xuống phím nước ra, sau đó mới chảy về hạ lưu.

Bởi vậy, lưu lượng thoát qua PKW sẽ phụ thuộc nhiều vào phạm vi phím nước ra. Khả năng tháo qua tràn piano không chỉ phụ thuộc vào các yếu tố như của tràn thực dụng là chiều cao tràn P , chiều rộng tràn nước W mà còn phụ thuộc vào chiều rộng phím nước ra W_o hay chiều rộng đơn vị tràn W_u .

2.1.3 Phương pháp xác định hệ số tháo trong luận án

Trong luận án, hệ số tháo của tràn piano được xác định theo phương pháp thực nghiệm. Phương pháp thực nghiệm trên mô hình vật lý nhằm đo đạc, xác định các giá trị đặc trưng thủy động lực dòng chảy như lưu lượng Q , cột nước tràn thượng lưu H , cột nước hạ lưu h_h , cao trình mực nước, lưu tốc dòng chảy.... Phương pháp mô hình toán (mô hình 3D) dùng để mô phỏng chi tiết phân bố vận tốc, lưu hướng dòng chảy trên phím nước vào, phím nước ra và nối tiếp hạ lưu.

Từ phân tích trong chương 1, luận án tổng hợp, kế thừa những số liệu thí nghiệm của các nghiên cứu mà đơn vị tràn là tối ưu về kinh tế và kỹ thuật. Từ đó,

tiến hành thực nghiệm bổ sung mở rộng biên cột nước H cho 3 trường hợp chiều cao tràn đại diện là $P/W_0 \approx 0,5; 0,7$ và $1,1$ với $W_i/W_0 = 1,25$ và $N=5$.

Những kết quả thí nghiệm này được kiểm chứng về quy luật phân bố, xu hướng tương quan với kết quả thực nghiệm của các nghiên cứu đã có, nhằm đánh giá về sự phù hợp về quy cách thí nghiệm, từ đó mô phỏng, kiểm định mô hình toán 3D, phân tích các đặc trưng dòng chảy, trạng thái chảy và xây dựng công thức thực nghiệm xác định khả năng tháo của luận án.

+ Công thức xác định khả năng tháo qua PKW chảy tự do được thiết lập từ:

(1). Số liệu thực nghiệm của luận án;

(2). Số liệu kết hợp giữa kết quả thực nghiệm của luận án và các nghiên cứu khác cho tràn tiêu chuẩn;

Kiểm chứng công thức bằng số liệu thí nghiệm của luận án và các nghiên cứu khác.

+ Các số liệu trong tập xây dựng, tập kiểm định được tổng hợp và phân định theo vùng, tương ứng với các chế độ, trạng thái chảy xác định trong luận án. Các số liệu trong tập xây dựng đảm bảo cùng điều kiện thực nghiệm về đơn vị tràn tiêu chuẩn, phạm vi tỷ lệ kích thước hình học và được đánh giá, kiểm chứng phù hợp trước khi sử dụng cho các bước tính toán tiếp theo. Việc đánh giá sự phù hợp này được trình bày trong mục 2.4.1.6. Tập kiểm định mở rộng hơn so tập xây dựng, gồm bộ số liệu của tràn có đơn vị tràn tiêu chuẩn như tập xây dựng và bộ số liệu của tràn phi chuẩn.

+ Công thức xác định hệ số ngập được thiết lập từ số liệu thí nghiệm của luận án. Quy trình thí nghiệm là khống chế mực nước thượng lưu, ứng với mỗi mực nước hạ lưu sẽ xác định được từng độ ngập h_n và lưu lượng ngập Q_n theo các bước:

- Cho lưu lượng Q_1 (Q_{TD}) vào mô hình, mở hết cửa cuối cho dòng chảy qua tràn là tự do;
- Khi dòng chảy qua công trình ổn định, xác định được chiều sâu cột nước thượng lưu H_{01} ;
- Nâng dần cửa cuối cho đến khi mực nước thượng lưu thay đổi, đo được H_{02} , $H_{02} > H_{01}$;
- Khi dòng chảy qua công trình ổn định, tháo bớt lưu lượng ra khỏi mô hình cho đến khi $H_{02} = H_{01}$;

- Khi dòng ổn định, thông qua thiết bị đo, xác định được lưu lượng Q_2 (Q_n) ứng với $H_{02} = H_{01}$, xác định được cột nước thượng, hạ lưu tương ứng H_{n0} , h_n ;
- Từ đó xác định được $\sigma_n = Q_2/Q_1 = Q_n/Q_{TD}$ tương ứng với độ ngập h_n/H_0 .

Trong đó mực nước hạ lưu được xác định là mực nước ngay sau tràn, làn nước qua PKW nối tiếp với hạ lưu bằng nước nhảy ngập hoặc không có nước nhảy, tương tự với điều kiện của đập tràn truyền thống.

2.2 LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM MÔ HÌNH

2.2.1 Lý thuyết tương tự để thiết lập mô hình nghiên cứu

Mô hình hóa hiện tượng thủy lực dựa trên lý thuyết tương tự. Lý thuyết tương tự xuất phát từ sự phân tích toán học hoặc phân tích thứ nguyên các đại lượng ảnh hưởng đến hiện tượng nghiên cứu. Các định luật hay tiêu chuẩn tương tự cho phép chúng ta chuyển những kết quả thu được trên mô hình sang thực tế, [1], [2], [11].

2.2.2 Tiêu chuẩn tương tự

1. Lý thuyết tương tự

Tương tự cơ học giữa công trình thực tế và mô hình được đảm bảo khi có được tương tự hình học, tương tự động học và tương tự động lực học.

* Tương tự hình học: Khi chế tạo mô hình giảm nhỏ so với công trình thực tế thì hình dạng của công trình cũng tương ứng phù hợp theo cả 3 chiều. Ta gọi đó là tương tự hình học giữa mô hình và nguyên hình (thực tế). Tỷ lệ giữa độ dài nguyên hình (l_n) và độ dài tương ứng trên mô hình (l_m) gọi là tỷ lệ đồng dạng hình học, $\lambda_l = \frac{l_n}{l_m}$.

* Tương tự động học: Tương tự động học là tương tự các thành phần tương ứng của lưu tốc, gia tốc nguyên hình và mô hình. Khi có tỷ lệ lưu tốc và tỷ lệ gia tốc (λ_a) là hằng số thì ta có được tương tự động học:

$$\lambda_{lx} = \lambda_{ly} = \lambda_{lz}; \lambda_{ax} = \lambda_{ay} = \lambda_{az} = \frac{\lambda_{lx}}{\lambda_n} = \frac{\lambda_u}{\lambda_l} \quad (2.5)$$

$$\text{Tỷ lệ độ dài } (\lambda_l) \text{ theo 3 phương: } \lambda_{lx} = \frac{\lambda_{nx}}{\lambda_{mx}}; \lambda_{ly} = \frac{\lambda_{ny}}{\lambda_{my}}; \lambda_{lz} = \frac{\lambda_{nz}}{\lambda_{mz}} \quad (2.6)$$

$$\text{Tỷ lệ lưu tốc điểm } (\lambda_u) \text{ là: } \lambda_{ux} = \frac{u_{nx}}{u_{mx}}; \lambda_{uy} = \frac{u_{ny}}{u_{my}}; \lambda_{uz} = \frac{u_{nz}}{u_{mz}} \quad (2.7)$$

* Tương tự động lực học: Là sự tương tự hoàn toàn của các lực trong nguyên hình và mô hình.

Theo định luật Newton ($P = m \cdot a$) có thể viết:

$$P_{nx} = m_n \cdot a_{nx}; P_{ny} = m_n \cdot a_{ny}; P_{nz} = m_n \cdot a_{nz} \quad (2.8)$$

$$P_{mx} = m_m \cdot a_{mx}; P_{my} = m_m \cdot a_{my}; P_{mz} = m_m \cdot a_{mz}$$

Khi có tương tự hình học theo cả 3 phương như nhau ($\lambda_{lx} = \lambda_{ly} = \lambda_{lz}$), mô hình chính thái, có:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_m \cdot \lambda_l}{\lambda_t^2}; \lambda_m = \lambda_\rho \cdot \lambda_w = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^3; \quad (2.9)$$

$$\lambda_p = \lambda_\rho \cdot \lambda_l^2 \cdot \lambda_v^2;$$

2. Tiêu chuẩn tương tự.

* Dòng chảy qua công trình tháo lũ, thường là dòng chảy có mặt thoáng, chịu tác động chủ yếu của trọng lực, theo lý thuyết mô hình thủy lực, tiêu chuẩn tương tự chính là tiêu chuẩn Froude (Fr).

$$Fr = \frac{V^2}{gL} = idem \text{ hay } \left(\frac{V^2}{gL} \right)_m = \left(\frac{V^2}{gL} \right)_n \quad (2.10)$$

Đồng thời thỏa mãn $Re_m \geq Re_{gh}$ (để đảm bảo chế độ chảy ở khu bình phương sức cản). Trị số Re_{gh} được xác định:

$$Re_{gh} = \frac{14R_m}{\Delta_m \sqrt{\varepsilon_m}} \text{ hoặc } Re_{gh} = 500 \frac{d_m}{k_m} \quad (2.11)$$

Trong đó: L: Kích thước dài; Δ_m : độ nhám tuyệt đối của mô hình; R_m : Bán kính thủy lực trong mô hình; ε_m : hệ số sức cản ma sát của mô hình; n, m: ký hiệu nguyên hình và mô hình.

* Khi cột nước nhỏ, dòng chảy qua tràn chịu tác động lớn bởi sức căng mặt ngoài, do vậy mô hình cần thỏa mãn tiêu chuẩn Weber:

$$W_e = \frac{\rho V^2 H}{\sigma} \quad (2.12)$$

Trong đó: σ là sức căng bề mặt, ρ : là hệ số nhớt động học.

Theo các nghiên cứu của S. Erpicum và cs (2016), Kabiri-Samani.A & Javaheri.A (2012) và Novak and Cabelka (1981), để dòng chảy qua tràn không chịu ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài, hệ số W_e nhỏ nhất cần lớn hơn 54, lưu tốc dòng chảy nhỏ nhất cần lớn hơn 2,5cm/s. Thay vào (2.12) xác định được chiều sâu cột nước tràn nhỏ nhất là 0,03m.

2.2.3 Lý thuyết thứ nguyên, định lý hàm Pi

* Thứ nguyên là biểu thức biểu diễn đơn vị dẫn xuất qua các đơn vị cơ bản. Các thứ nguyên cơ bản bao gồm: thời gian [T], độ dài [L], khối lượng [M].

Sự liên hệ của đơn vị dẫn xuất đối với các đơn vị cơ bản có thể biểu diễn dưới dạng công thức thứ nguyên.

Đại lượng có thứ nguyên là đại lượng mà giá trị bằng số của chúng phụ thuộc các tỷ lệ chọn trước (hệ đơn vị đo lường). Đại lượng không thứ nguyên là đại lượng mà giá trị bằng số của chúng không phụ thuộc vào hệ đơn vị đo lường.

* Sử dụng phương trình Buckingham biểu thị các đại lượng biến đổi $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$ mô tả hiện tượng thủy động lực học cần nghiên cứu trong một phiếm hàm.

$$f(a_1, a_2, a_3 \dots a_n) = 0 \quad (2.13)$$

Quan hệ (2-8) khi viết dưới dạng một quan hệ giữa các biến không thứ nguyên $\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots$ với $\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots$ được thiết lập từ các đại lượng $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$. Tổng số các biến không thứ nguyên sẽ ít hơn tổng số các đại lượng biến đổi, được một phiếm hàm khác:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots) = 0 \quad (2.14)$$

Khi quan hệ miêu tả hiện tượng thủy lực cần nghiên cứu có n đại lượng biến đổi độc lập $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$ mà thứ nguyên tương ứng là $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ và với việc chọn r thứ nguyên cơ bản chúng ta có $n - r$ biến không thứ nguyên $\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots$

π_{n-r} . Chọn 3 thứ nguyên cơ bản: Độ dài (có thứ nguyên là L), khối lượng (có thứ nguyên là M), thời gian (có thứ nguyên là T).

Mỗi biến $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r}$ là tích của các đại lượng biến đổi với số mũ nào đó để tích đó trở thành không thứ nguyên. Mỗi biến π_i cần có (r+1) đại lượng biến đổi. Khi chọn các đại lượng biến đổi trong mỗi π_i cần thỏa mãn hai điều kiện: Một là đại lượng biến đổi được trùng lặp ở các π_i phải chứa đủ r thứ nguyên cơ bản đã chọn. Các thứ nguyên cơ bản không tạo ra các biến không thứ nguyên.

Với trường hợp $r = m = 3$, để thỏa mãn hai điều kiện trên thì trong (m+1) = 4 đại lượng biến đổi của mỗi π_i sẽ có 3 đại lượng được lặp lại với số mũ x_i, y_i, z_i . Đó là độ dài (L), lưu tốc (L/T) và khối lượng riêng (ML^{-3}). Đại lượng biến đổi thứ tự ở mỗi π_i một khác để tất cả n đại lượng biến đổi đều có mặt trong (2.15). Nghĩa là:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= a_1^{x_1} . a_2^{y_1} . a_3^{z_1} . a_4 \\ \pi_2 &= a_1^{x_2} . a_2^{y_2} . a_3^{z_2} . a_5 \\ &\dots\dots\dots \\ \pi_{n-3} &= a_1^{x_{n-3}} . a_2^{y_{n-3}} . a_3^{z_{n-3}} . a_{n-3} \end{aligned} \tag{2.15}$$

Biến không thứ nguyên π là một số đơn giản, vì vậy số mũ của các đại lượng được quy về số mũ của 3 thứ nguyên cơ bản M, L, T và bằng 0.

2.2.4 Quy hoạch thực nghiệm

2.2.4.1 Cơ sở khoa học xây dựng công thức thực nghiệm

Các số liệu thí nghiệm cần được tổng hợp, tìm mối tương quan chặt chẽ giữa các đại lượng, xác định được mối quan hệ tương hỗ giữa các đại lượng biến đổi mà bất kỳ một đại lượng nào đó cũng sẽ được suy ra từ các đại lượng vào.

Tức là: **Đại lượng vào** \rightarrow **Quan hệ phụ thuộc (phương trình hồi quy thực nghiệm)** \rightarrow **Đại lượng ra.**

Theo [8], để xác định được quan hệ phụ thuộc hay xây dựng phương trình hồi quy thực nghiệm có 2 phương pháp thường được sử dụng:

+ Một là phương pháp xây dựng các phương trình hồi quy thực nghiệm dựa trên cơ sở phân tích thụ động các số liệu có được trong một thời gian làm việc đủ dài của hệ gọi là phân tích hồi quy. Nhược điểm của phương pháp này là đôi khi đánh giá sai tính chất của hệ khi không khảo sát được những vùng nằm ngoài miền làm việc.

+ Hai là mô hình hóa dựa trên cơ sở chủ động bố trí các thí nghiệm để đo các thông số đầu vào đã định trước từ đó chủ động mở rộng được miền cần khảo sát, giúp tìm ra miền tối ưu. Tuy nhiên khi áp dụng phương pháp này cần phải có sự hiểu biết, khảo sát kỹ về đối tượng cần tìm hiểu.

Để xác lập phương trình thực nghiệm (hàm tương quan) cần qua các bước:

- Xác định hàm mục tiêu: Cần xác định mục tiêu, yếu tố cần tìm.
- Xác định cấu trúc hàm: Gồm thông số đầu vào, thông số đầu ra.
- Xác định dạng hàm toán mô tả là một trong các dạng: tuyến tính, mũ, logarit, đa thức, hyperbol, ...
- Xác định các thông số của hàm.
- Kiểm tra tính phù hợp của phương trình tìm được: Tính hệ số tương quan và độ lệch trung bình.

+ Các mô hình hồi quy hiện đang được ứng dụng nhiều trong thực tế. Khi nghiên cứu tương quan biến số y có liên quan đến n biến số độc lập, dùng mô hình hồi quy đa tuyến tính.

Theo dạng ngẫu nhiên:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni} + u_i \quad (2.16)$$

Trong đó: y là biến phụ thuộc và x_j là biến giải thích hay biến độc lập, $\forall j = \overline{2, n}$; β_1 gọi là hệ số chặn và β_j là các hệ số góc hay còn gọi các hệ số hồi qui riêng; u_i là các sai số ngẫu nhiên có kỳ vọng.

Thể hiện tính chặt chẽ giữa biến phụ thuộc y và các biến độc lập x_i qua hệ số hệ số tương quan bội R^2 hoặc hệ số tương quan R và sai số chuẩn do hồi quy S (Standard Error).

Để tìm các hệ số của phương trình, sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất theo mô hình xấp xỉ tuyến tính.

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - y_i^*]^2 \rightarrow \min \quad (2.17)$$

Sau khi tìm được các hệ số a, b, cần tính toán các hệ số tương quan và sai số chuẩn để chọn lựa công thức thực nghiệm có hệ số tương quan tốt nhất.

- Sai số chuẩn:
$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2} \quad (2.18)$$

- Hệ số tương quan:
$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y})^2}} \quad (2.19)$$

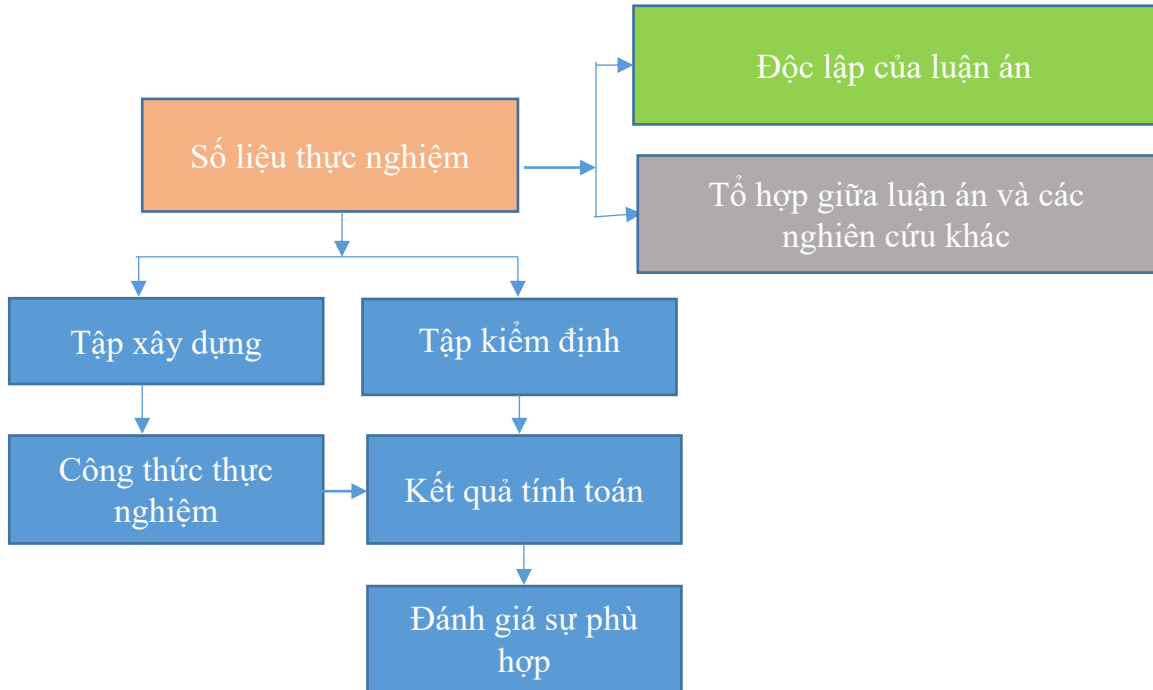
$\sum (y_i^* - \bar{y})^2$: là tổng bình phương hồi quy, là đại lượng biến động của y được giải thích bởi đường hồi quy (trị số này càng lớn thì mô hình hồi quy càng có độ tin cậy cao, trong việc giải thích biến động của y); $\sum (y_i - \bar{y})^2$: là phần biến động còn lại hay còn gọi là số dư. Khi R càng lớn ($0 \leq R \leq 1$), S càng nhỏ thì mức độ mối liên hệ tương quan bội càng chặt chẽ. Tương quan là khá tốt khi $R^2 \geq 0,81$; $S \leq 0,3$.

2.2.4.2 Đánh giá và kiểm định sự phù hợp của công thức thực nghiệm

Để đánh giá sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm dùng phân phối Fisher (Sig.F) với một mức ý nghĩa nào đó (Giang Thị Kim Liên, 2009). Nếu $F < F_{1-p}$ hay $\text{Sig.F} < p$ thì phương trình được chấp nhận. Nếu $F > F_{1-p}$ hay $\text{Sig.F} > p$ thì phương trình bị bác bỏ. Thông thường chọn mức ý nghĩa 5%, $p = 0,05$.

Kiểm định các công thức thực nghiệm bằng phương pháp Hold-out, phân chia tập dữ liệu thực nghiệm thành hai tập độc lập là tập huấn luyện (tập xây dựng công thức) và tập kiểm định. Trong đó bộ dữ liệu thực nghiệm được xem xét theo 2 trường hợp: (1) gồm số liệu độc lập của luận án; (2). Gồm số liệu tổng hợp của luận án và một số nghiên cứu khác có đơn vị tràn tiêu chuẩn. Sơ đồ các bước kiểm định công thức thực nghiệm như trong Hình 2.2.

Như vậy, với cách làm này, công thức thực nghiệm được xây dựng đã không đơn thuần là kiểm định với số liệu thực nghiệm của luận án mà còn được kiểm định với số liệu của các tác giả khác.



Hình 2.2 Sơ đồ phương pháp kiểm định công thức thực nghiệm

2.3 LẬP PHƯƠNG TRÌNH NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

Trần piano có thể có một hoặc nhiều đơn vị trần (n đơn vị trần). Lưu lượng và các kích thước hình học trần theo đơn vị trần là $Q=n.Q_u$; $L=n.L_u$; $W=n.W_u$; $N=L/W=L_u/W_u$. Nghiên cứu về trần piano trong bài toán phẳng là nghiên cứu đơn vị trần có các đại lượng hình học và đặc trưng dòng chảy là Q_u , L_u , W_u , N , ... Các yếu tố liên quan, ảnh hưởng tới khả năng tháo qua trần piano gồm yếu tố công trình và yếu tố dòng chảy. Từ tổng quan các nghiên cứu trình bày trong mục 1.2, luận giải trong mục 1.4, luận án tập trung vào 09 thông số công trình chính như chiều cao trần, chiều rộng các phím, chiều dài phím, chiều dài công xôn thượng hạ lưu, độ dốc đáy phím, chiều cao trần tính tới đáy kênh hạ lưu... , các thông số dòng chảy như lưu lượng, cột nước thượng lưu, cột nước hạ lưu, ..Các đại lượng này được chia thành nhóm dữ liệu đầu vào và dữ liệu đầu ra thể hiện trên Bảng 2.1.

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

Dữ liệu đầu ra là độ sâu dòng chảy thượng lưu, độ sâu dòng chảy trên các phím nước vào, phím nước ra.

Bảng 2.1 Các đại lượng ảnh hưởng tới khả năng tháo

| Các đại lượng | Ký hiệu | Thứ nguyên |
|---|---------|-----------------|
| I. Các đại lượng đầu vào (chủ động bố trí) | | |
| 1. Thông số công trình | | |
| Chiều cao tràn piano | P | [L] |
| Chiều cao thượng lưu tràn | P_T | [L] |
| Chiều cao hạ lưu tràn | P_H | [L] |
| Chiều cao phím | P_p | [L] |
| Chiều rộng đơn vị tràn | W_u | [L] |
| Chiều rộng phím vào | W_i | [L] |
| Chiều rộng phím ra | W_o | [L] |
| Chiều dài phím | B | [L] |
| Chiều dài dốc phím vào | B_i | [L] |
| Chiều dài hốc phím ra | B_o | [L] |
| Chiều dài đơn vị tràn | L_u | [L] |
| Độ dốc đáy phím vào | S_i | - |
| Độ dốc đáy phím ra | S_o | - |
| 2. Thông số dòng chảy | | |
| Lưu lượng xả đơn vị tràn | Q_u | $[M^3T^{-1}]$ |
| Độ sâu dòng chảy hạ lưu | h_h | [L] |
| Khối lượng riêng của nước | ρ | $[ML^{-3}]$ |
| Gia tốc trọng trường | g | LT^{-2} |
| Độ nhớt động lực của nước | μ | $ML^{-1}T^{-1}$ |

| Các đại lượng | Ký hiệu | Thứ nguyên |
|------------------------------------|---------------------|------------|
| II. Các đại lượng đầu ra | | |
| Độ sâu dòng chảy thượng lưu | H (H ₀) | [L] |
| Chênh lệch mực nước thượng, hạ lưu | z | [L] |
| Độ sâu dòng chảy ngập trên tràn | h _n | [L] |

Mô hình thí nghiệm được xây dựng nhằm xác định quan hệ phụ thuộc (phương trình hồi quy thực nghiệm) theo cả 2 phương pháp đã nêu tại mục 2.2.4 trong đó chủ động bố trí PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn.

Những yếu tố ảnh hưởng chính được viết dưới dạng quan hệ hàm số:

$$f(Q_u, W_u, W_i, W_o, B, B_i, B_o, L_u, P, P_T, P_H, S_i, \rho, \mu, g, H, h_n, h_h, z) = 0 \quad (2.20)$$

Trong phương trình trên số đại lượng biến đổi độc lập $n = 19$. Dùng phương pháp Buckingham (Định lý Pi) với việc lựa chọn 3 đại lượng cơ bản là $Q_u [L^3T^{-1}]$, $\rho [ML^{-3}]$, $H [L]$, ta có phiên hàm mới có $n - 3 = 16$ đại lượng không thứ nguyên.

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots \pi_{16}) = 0 \text{ hay } \pi_1 = f(\pi_2, \pi_3 \dots \pi_{16}) = 0 \quad (2.21)$$

Việc xác định các tổ hợp không thứ nguyên này được tiến hành theo các phương trình như (2.22):

$$\begin{aligned}
\pi_1 &= Q_u^{x1} \rho^{y1} H^{z1} W_u & \pi_2 &= Q_u^{x2} \rho^{y2} H^{z2} W_i & \pi_3 &= Q_u^{x3} \rho^{y3} H^{z3} W_o \\
\pi_4 &= Q_u^{x4} \rho^{y4} H^{z4} B & \pi_5 &= Q_u^{x5} \rho^{y5} H^{z5} B_i & \pi_6 &= Q_u^{x6} \rho^{y6} H^{z6} B_o \\
\pi_7 &= Q_u^{x7} \rho^{y7} H^{z7} P & \pi_8 &= Q_u^{x8} \rho^{y8} H^{z8} P_T & \pi_9 &= Q_u^{x9} \rho^{y9} H^{z9} P_H \\
\pi_{10} &= Q_u^{x10} \rho^{y10} H^{z10} L_u & \pi_{11} &= Q_u^{x11} \rho^{y11} H^{z11} S_i & \pi_{12} &= Q_u^{x12} \rho^{y12} H^{z12} \mu \\
\pi_{13} &= Q_u^{x13} \rho^{y13} H^{z13} g & \pi_{14} &= Q_u^{x14} \rho^{y14} H^{z14} h_n & & \\
\pi_{15} &= Q_u^{x15} \rho^{y15} H^{z15} h_h & \pi_{16} &= Q_u^{x16} \rho^{y16} H^{z16} z & & (2.22)
\end{aligned}$$

Xác định các biến không thứ nguyên π_i bằng cách thay $Q_u, \rho, H, W_u \dots$ bằng các thứ nguyên của chúng. Giải phương trình khi đưa các chỉ số mũ của các thứ nguyên

cơ bản M, L, T bằng 0, ta được các giá trị x_i, y_i, z_i , thay ngược các giá trị này trở lại từng phương trình trong hệ phương trình trên ta tìm được từng biến π_i . Cụ thể:

$$\pi_1 = [L^3 \cdot T^{-1}]^{x_1} [M \cdot L^{-3}]^{y_1} [L]^{z_1} [L] = M^{y_1} \cdot L^{3x_1 - 3y_1 + z_1 + 1} \cdot T^{-x_1}$$

Cân bằng số mũ ta được: $x_1 = 0; y_1 = 0; z_1 = -1$;

$$\begin{aligned} \pi_{12} &= [L^3 \cdot T^{-1}]^{x_{12}} [M \cdot L^{-3}]^{y_{12}} [L]^{z_{12}} [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}] \\ &= M^{y_{12} + 1} \cdot L^{3x_{12} - 3y_{12} + z_{12} - 1} \cdot T^{-x_{12} - 1} \end{aligned}$$

Cân bằng số mũ ta được: $x_{12} = -1; y_{12} = -1; z_{12} = 1$;

$$\begin{aligned} \pi_{13} &= [L^3 \cdot T^{-1}]^{x_{13}} [M \cdot L^{-3}]^{y_{13}} [L]^{z_{13}} [L \cdot T^{-2}] \\ &= M^{y_{13}} \cdot L^{3x_{13} - 3y_{13} + z_{13} + 1} \cdot T^{-x_{13} - 2} \end{aligned}$$

Cân bằng số mũ ta được: $x_{13} = -2; y_{13} = 0; z_{13} = 5$.

Thực hiện tương tự với các biến không thức nguyên từ π_2 đến π_{16} , ta được:

$$\begin{array}{cccc} \pi_1 = \frac{W_u}{H} & \pi_2 = \frac{W_i}{H} & \pi_3 = \frac{W_o}{H} & \pi_4 = \frac{B}{H} \\ \pi_5 = \frac{B_i}{H} & \pi_6 = \frac{B_o}{H} & \pi_7 = \frac{P}{H} & \pi_8 = \frac{P_T}{H} \\ \pi_9 = \frac{P_H}{H} & \pi_{10} = \frac{L_u}{H} & \pi_{11} = S_i & \pi_{12} = \frac{\mu H}{Q_u \rho} \\ \pi_{13} = \frac{H^5 g}{Q_u^2} & \pi_{14} = \frac{h_n}{H} & \pi_{15} = \frac{h_h}{H} & \pi_{16} = \frac{z}{H} \end{array}$$

Thay các giá trị π_i vào phương trình (2.21) ta được:

$$f \left[\frac{W_u}{H}, \frac{W_i}{H}, \frac{W_o}{H}, \frac{B}{H}, \frac{B_i}{H}, \frac{B_o}{H}, \frac{P}{H}, \frac{P_T}{H}, \frac{P_H}{H}, \frac{L_u}{H}, S_i, \frac{\mu H}{Q_u \rho}, \frac{H^5 g}{Q_u^2}, \frac{h_n}{H}, \frac{h_h}{H}, \frac{z}{H} \right] = 0 \quad (2.23)$$

Phân tích phương trình (2.23) cho thấy:

$$* \frac{\mu H}{Q_u \rho} = \frac{\mu}{(v \cdot W_u) \rho} = \frac{1}{Re} \text{ là nghịch đảo của số Reynol (} R_e \text{)}$$

$$* \sqrt{\frac{1}{2\pi_1 \cdot \pi_1 \cdot \pi_{13}}} = \sqrt{\frac{H^2 Q_u^2}{2W_u^2 \cdot H^5 \cdot g}} = \frac{Q_u}{W_u \sqrt{2gH^{3/2}}}$$

$$\frac{\pi_{16}}{\pi_7} = \left(\frac{z}{H}\right) / \left(\frac{P}{H}\right) = \frac{z}{P};$$

Mô hình 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 Reynol.

Đơn vị tràn tiêu chuẩn có kích thước hình học tuân theo tỷ lệ nhất định, liên quan tới nhau, đó là $P_T = P$; $L_u = W_u + 2B$; $W_u = W_i + W_o$; $W_i/W_o = \text{const}$; $N = (W_u + 2B)/W_u$; $S_i = S_o = f(B/P)$; Do đó chỉ xét biến độc lập P , P_H , W_u , L_u , z , h_n , các biến khác là biến phụ thuộc được xác định theo P , W_u và tỷ lệ đã chọn.

Ứng với mỗi trường hợp thí nghiệm, chủ động không chế cột nước hạ lưu và mức độ ngập, tức là chủ động không chế đại lượng h_h và h_n . Khi có xét tới lưu tốc tới gần. Do đó phương trình (2.23) trở thành:

$$f \left[\frac{Q_u}{W_u \sqrt{2g} H_0^{3/2}}, \frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u}, \frac{h_n}{H_0}, \frac{z}{P} \right] = 0 \quad (2.24)$$

$$\text{Hay } \frac{Q_u}{W_u \sqrt{2g} H_0^{3/2}} = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u}, \frac{h_n}{H_0}, \frac{z}{P} \right] \quad (2.25)$$

Lưu lượng tháo qua tràn được xác định theo công thức:

$$Q = m \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} = m \cdot N \cdot W \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.26)$$

Đặt $C_d = m \cdot N$, (2.26) trở thành: $Q = C_d \cdot W \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$

$$\text{Hoặc: } Q_u = C_d \cdot W_u \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \quad (2.27)$$

$$\text{suy ra } C_d = \frac{Q_u}{W_u \sqrt{2g} H_0^{3/2}} \quad (2.28)$$

Như vậy với việc sử dụng hệ số $C_d = m \cdot N$, công thức tính lưu lượng cho tràn piano trở thành công thức tính cho tràn truyền thống và C_d có thể lớn hơn 1,0, còn tràn truyền thống hệ số m luôn nhỏ hơn 1,0.

Kết hợp (2.25) và (2.28) ta có:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u}, \frac{h_n}{H_0}, \frac{z}{P} \right] \quad (2.29)$$

Khi xét dòng chảy qua PKW là chảy tự do, lưu lượng tháo qua tràn không chịu ảnh hưởng của mực nước hạ lưu, phương trình (2.29) trở thành:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u} \right] \quad (2.30)$$

Khi khả năng tháo qua tràn không bị ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu, (2.30) trở thành:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u} \right] \quad (2.31)$$

Khi dòng chảy qua PKW là chảy tự do, dòng chảy qua tràn không chịu ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu, đáy kênh hạ lưu, đường nước ra bám theo đường zíc zắc, tràn làm việc như tràn thành mỏng, lúc đó khả năng tháo không phụ thuộc chiều rộng phím nước ra của tràn, phương trình (2.31) trở thành:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{L_u} \right] \quad (2.32)$$

Khi xét dòng chảy là chảy ngập, lưu lượng tháo qua PKW chịu ảnh hưởng của mực nước hạ lưu, phương trình hồi quy thực nghiệm cần xác định là:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u}, \frac{h_n}{H_0}, \frac{z}{P} \right] \quad (2.33)$$

Trên cơ sở (2.30), (2.33) luận án thiết lập sê ri thí nghiệm (Bảng 2.2) để tiến hành phân tích, đánh giá, xây dựng công thức. Việc này được thực hiện trong các nội dung tiếp theo của luận án.

2.4 MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

Luận án sử dụng kết hợp mô hình vật lý và mô hình toán 3D để nghiên cứu.

2.4.1 Mô hình vật lý

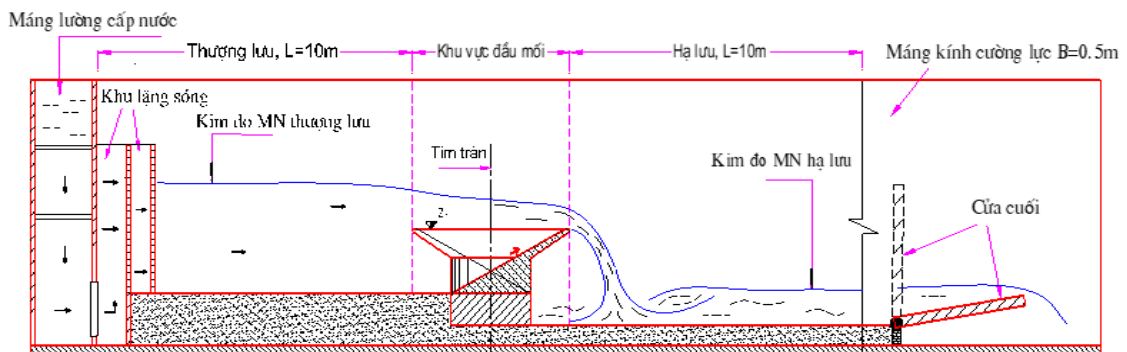
2.4.1.1 Thiết kế, xây dựng mô hình

Mô hình được thiết kế, xây dựng trên máng kính rộng 0,5m, dài 22m, cao 1,0m. Đầu mối tràn piano được chế tạo bằng kính hữu cơ; kênh dẫn thượng hạ lưu dùng vữa xi măng trát phẳng có đánh bóng.

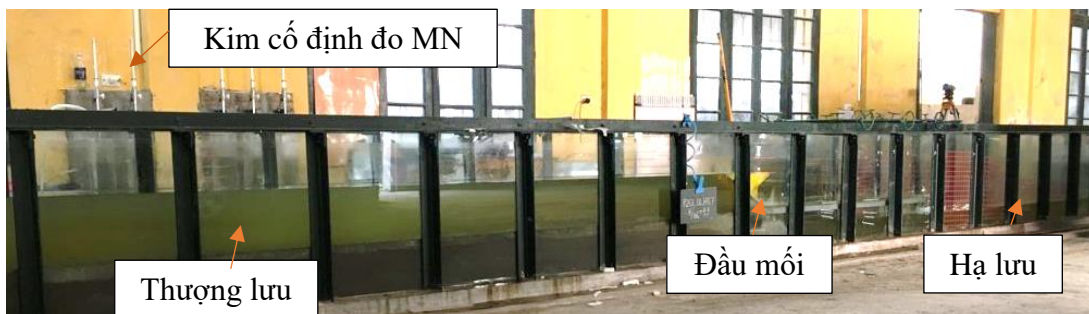
Dòng chảy cấp cho mô hình từ bể áp vào máng lường, qua hệ thống lạng sóng, chảy vào mô hình và trở về hệ thống máng hồi. Điều khiển lượng nước cấp

vào máng lường bằng van, điều khiển mực nước hạ lưu bằng cửa cuối là cửa van clape trực đáy để chủ động vận hành (Hình 2.3, Hình 2.4).

Đầu mỗi tràn piano gồm 2 đơn vị tràn (hai cặp phím vào phím ra); chiều rộng đơn vị tràn 25cm; chiều cao tràn $P=11 \div 27$ cm; tỷ lệ các kích thước hình học: $P/W_u=0,44 \div 1,07$; $W_i/W_o=1,25$; $N=L/W=5$; $B_i/B_o=1,0$; $B/B_o=4,0$; $P_o/P_i=1,0$. Chi tiết hình dạng mặt cắt tràn của luận án như thể hiện trên Hình 1.6, Hình 2.5 và Hình 2.6. Tỷ lệ cột nước tràn thực nghiệm trong khoảng $H/P=0,17 \div 2,10$.



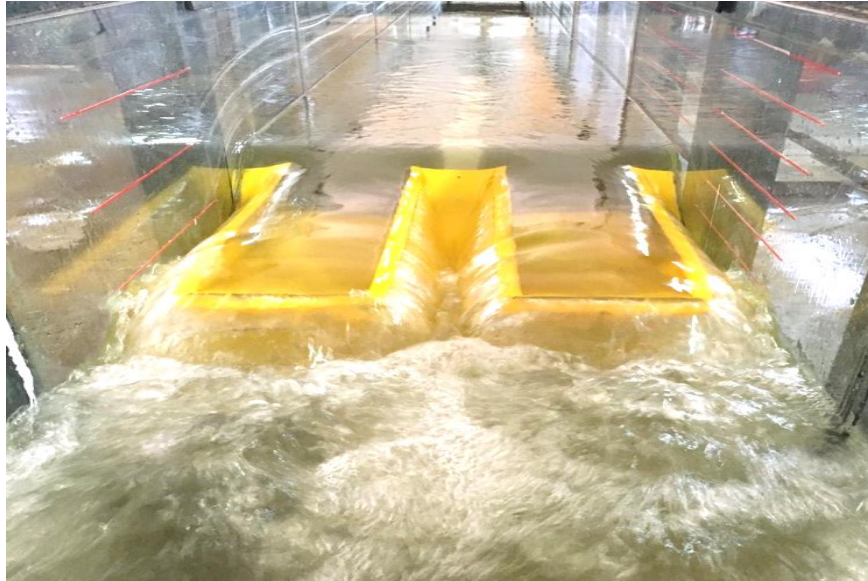
Hình 2.3 Sơ đồ bố trí thí nghiệm



Hình 2.4 Mô hình thí nghiệm trong máng kính



Hình 2.5 Chi tiết khu vực bố trí tràn piano



Hình 2.6 Mặt bằng mô hình thí nghiệm tràn piano

Dòng chảy qua tràn chịu tác dụng chủ yếu của trọng lực, nên tương tự theo tiêu chuẩn Froude (Froude = idem). Số Reynol (Re) trên mô hình $Re_m = \frac{q_m}{v_m} = \frac{34,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-6}} = 34500 > Re_{gh} = 5000$ thỏa mãn điều kiện dòng chảy làm việc trong khu bình phương sức cản (khu tự động mô hình).

Để đảm bảo dòng chảy qua PKW không ảnh hưởng bởi sức căng mặt ngoài, cần thỏa mãn tiêu chuẩn Weber, hệ số $We > 54$, như trình bày trong mục 2.2.2, do đó cần không chế cột nước thượng lưu $H > 3\text{cm}$.

2.4.1.2 Thiết bị đo đạc

Thông số mực nước xác định bằng kim đo mực nước cố định và máy thủy bình Ni04, mia gắn thước thép được chia vạch đến mm.

Xác định giá trị lưu tốc dòng chảy bằng đầu đo điện tử PEMS, E40 do Hà Lan chế tạo; dải đo từ 0,05m/s đến 5,0m/s.

Lưu lượng tháo vào mô hình được xác định bằng máng lờng hình chữ nhật có lắp đập lờng thành mỏng và tính toán bằng công thức Rehbock.

$$Q = \left(1,782 + 0,24 \frac{h_e}{P_L} \right) \cdot B_L \cdot h_e^{3/2} \quad (2.34)$$

Phạm vi giới hạn của công thức Rehbock là $0,15\text{m} < P_L < 1,22\text{m}$.

Trong đó P_L chiều cao đập phía thượng lưu, B_L chiều rộng máng đo lưu lượng, h_L cột nước đỉnh tràn; cột nước tính toán h_e được tính theo công thức: $h_e = h_L + 0,0011m$.

2.4.1.3 Sai số mô hình

Sai số mô hình bao gồm sai do xây dựng, chế tạo và sai số trong đo đạc số liệu thí nghiệm.

Sai số do xây dựng, chế tạo:

Máng lường: Sai số do xây dựng là $\pm 1mm$; Sai số tương đối lớn nhất mắc phải tính với kích thước chiều rộng máng lường 0,8m là $\frac{\Delta_L}{B_L} = \frac{1}{800} \cdot 100 = 0,1\%$.

Máng kính: Sai số khi xây dựng, lắp đặt máng kính là $\pm 2mm$. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải tính với kích thước chiều rộng máng kính 0,5m là $\frac{\Delta_{mk}}{B_{mk}} = \frac{2}{500} \cdot 100 = 0,4\%$.

Địa hình đáy kênh thượng hạ lưu: Đáy kênh dẫn thượng hạ lưu làm bằng vữa xi măng cát trát mịn, sai số đo đạc được sau khi xây dựng là $\pm 2mm$. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải tính với độ sâu dòng chảy nhỏ nhất trên kênh dẫn 0,2m là $\frac{\Delta_z}{z} = \frac{2}{200} \cdot 100 = 1,0\%$.

Đầu mối chế tạo bằng kính hữu cơ: Sai số sau khi chế tạo, lắp đặt đầu mối đo được là $\pm 0,3mm$. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải tính với kích thước dài nhỏ nhất của tràn 0,22m là $\frac{\Delta_m}{L_m} = \frac{0,3}{220} = 0,13\%$.

Tổng sai số do chế tạo, xây dựng, lắp đặt gồm sai số theo chiều ngang và sai số theo chiều đứng: $\frac{\Delta\omega}{\omega} (\%) = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right|$.

Sai số lớn nhất mắc phải do chế tạo, xây dựng, lắp đặt là $\frac{\Delta\omega}{\omega} (\%) = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = 0,5\% + 0,4\% = 0,9\%$.

Sai số trong đo đạc thu thập số liệu thí nghiệm:

Lưu lượng thí nghiệm được đo qua đập lường thành móng chữ nhật, tính theo công thức Rehbock, sai số của công thức khoảng 1%.

Tổng sai số khi đo lưu lượng là 2% gồm 1% do công thức và 1% do chế tạo máng lều, đọc kim đo cao trình mực nước trước đập.

Sai số khi đo cao trình mực nước bằng kim đo cố định là 0,1mm. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải với cột nước nhỏ nhất 0,035m là 0,3%.

Sai số khi đo cao trình mực nước bằng máy thủy chuẩn Ni04 và mia là 0,1mm.

Sai số khi đo độ dài, độ sâu tại các vị trí chủ yếu bằng thước lá, thước thép..., sai số là ½ khoảng chia 0,5mm.

2.4.1.4 Điều kiện áp dụng trong thực tế

Từ điều kiện tự động mô hình, ta có:

$$Re_m = \frac{q_m}{v_m} \geq Re_{gh} \quad (2.35)$$

Với dòng chảy chịu ảnh hưởng chính là trọng lực, số Reynold giới hạn $Re_{gh}=5000 \div 10000$ (Novak và cs, 1990).

$$\text{Thay vào (2.35): } Re = \frac{q_n}{\lambda^{3/2} 10^{-6}} \geq 10000 \text{ Hay } \lambda \leq \left(\frac{q_n}{10000 \cdot 10^{-6}} \right)^{2/3} \quad (2.36)$$

Theo điều kiện thực tế của một số công trình tháo lũ qua tràn piano có lưu lượng đơn vị thường là $q_n = 3 \div 40 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ thì tỷ lệ mô hình cho phép tương ứng với phạm vi của lưu lượng thực tế theo (2.36) là:

$$\lambda \leq 45 \div 250 \quad (2.37)$$

Như vậy, với đối tượng nghiên cứu và các điều kiện đã cho, mô hình có tỷ lệ theo (2.37) sẽ đảm bảo sự tương tự giữa mô hình và tự nhiên, đảm bảo dòng chảy trong khu bình phương sức cản. Tuy nhiên, để đảm bảo không bị ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài thì mô hình cần đảm bảo $H > 0,03\text{m}$ với $\lambda=1$, hay tỷ lệ mô hình cần thỏa mãn $\lambda \leq 33H(\text{m})$. Để đảm bảo tương tự hình học đặc biệt là kết cấu tường mỏng của tràn piano, điều kiện sân bãi, thiết bị đo thí nghiệm, các kết quả nghiên cứu thí nghiệm trong luận án này áp dụng vào thực tế phù hợp hơn khi sử dụng phép biến đổi ra nguyên hình với tỷ lệ $\lambda \leq 70$ và có thể tham khảo cho các công trình có tỷ lệ lớn hơn.

Do vậy, tỷ lệ áp dụng phù hợp là $\lambda \leq 33H(\text{m})$ và $\lambda \leq 70$.

2.4.1.5 Các trường hợp thí nghiệm

Luận án đã thực nghiệm gần 150 thí nghiệm. Mỗi thí nghiệm xác định khả năng tháo, phân bố vận tốc, đường mặt nước, lưu hướng dòng chảy. Phạm vi bố trí thí nghiệm phụ thuộc vào điều kiện sân bãi của phòng thí nghiệm, tham khảo các nghiên cứu đã có, cho tràn có đơn vị tràn tiêu chuẩn, cụ thể: tỷ lệ cột nước tràn $H_0/P=0,17\div 2,09$; tỷ lệ cột nước với chiều rộng phím ra $H_0/W_o=0,31\div 2,08$; tỷ lệ cột nước với chiều rộng đơn vị $H_0/W_u=0,14\div 0,92$; lưu lượng đơn vị $q=0,03\div 0,32\text{m}^3/\text{s}$; chế độ chảy qua tràn là chảy không ngập và chảy ngập, độ sâu ngập $h_n/H_n=-0,4\div 0,98$, đáy kênh hạ lưu hạ thấp và nâng cao ngang chân phím nước ra.

Tổng hợp kết quả thí nghiệm khả năng tháo qua tràn piano trình bày trong Bảng 2.2, chi tiết trình bày trong Phụ lục 2.

Bảng 2.2 Các trường hợp thí nghiệm khả năng tháo qua tràn

| TT | Trường hợp thí nghiệm |
|----------|---|
| I | Tràn piano chảy tự do |
| I.1 | Đáy kênh hạ lưu bằng chân phím nước ra |
| 1 | Trường hợp $P/W_u=0,44$; $q=0,035\div 0,284\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,309\div 2,021$; $H_0/W_o=0,307\div 2,012$; $H_0/W_u=0,136\div 0,893$. |
| 2 | Trường hợp $P/W_u=0,69$; $q=0,045\div 0,292\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,209\div 1,277$; $H_0/W_o=0,326\div 1,991$; $H_0/W_u=0,145\div 0,884$. |
| 3 | Trường hợp $P/W_u=1,07$; $q=0,064\div 0,283\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,169\div 0,711$; $H_0/W_o=0,407\div 1,716$; $H_0/W_u=0,181\div 0,762$. |
| I.2 | Đáy kênh hạ lưu thấp so chân phím nước ra |
| 1 | Trường hợp $P/W_u=0,5$; $q=0,035\div 0,300\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,309\div 2,085$; $H_0/W_o=0,308\div 2,076$; $H_0/W_u=0,137\div 0,922$. |
| 2 | Trường hợp $P/W_u=0,7$; $q=0,049\div 0,303\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,227\div 1,283$; $H_0/W_o=0,354\div 1,998$; $H_0/W_u=0,157\div 0,887$. |
| 3 | Trường hợp $P/W_u=1,1$; $q=0,066\div 0,320\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $H_0/P=0,170\div 0,803$; $H_0/W_o=0,411\div 1,939$; $H_0/W_u=0,183\div 0,861$. |

| | |
|-----------|---|
| TT | Trường hợp thí nghiệm |
| II | Tràn piano chảy ngập |
| | $q=0,044-0,278 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$; $h_n/H_{n0}=-0,41\div 0,984$; $z/P=0,001\div 2,09$; $H_{n0}/P=0,169\div 2,343$; $H_{n0}/W_u=0,144\div 1,036$; $\sigma_n=0,503\div 1,0$ |

2.4.1.6 Đánh giá sự phù hợp của số liệu thực nghiệm

Việc đánh giá sự phù hợp của số liệu thực nghiệm trên mô hình vật lý là cơ sở tin cậy để mô phỏng và kiểm nghiệm mô hình toán 3D trong mục 2.4.2, cũng như là cơ sở thực nghiệm tin cậy trong phân tích, xác định các trạng thái, chế độ, ranh giới chảy qua tràn piano được trình bày chi tiết trong các phần tiếp theo của luận án.

Số liệu thực nghiệm của luận án được đánh giá với hơn 450 số liệu thực nghiệm của các tác giả khác gồm cả trong và ngoài nước, từ đó xác định sự phù hợp về đồ thị phân bố hệ số tháo của tràn theo các đại lượng không thứ nguyên.

a. Phạm vi các nghiên cứu kế thừa

Để đánh giá sự phù hợp giữa số liệu thực nghiệm của luận án với số liệu thực nghiệm của các tác giả khác, các nghiên cứu đã trình bày trong chương 1 được tổng hợp, xác định theo PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn và phi chuẩn như trình bày trong Bảng 2.3.

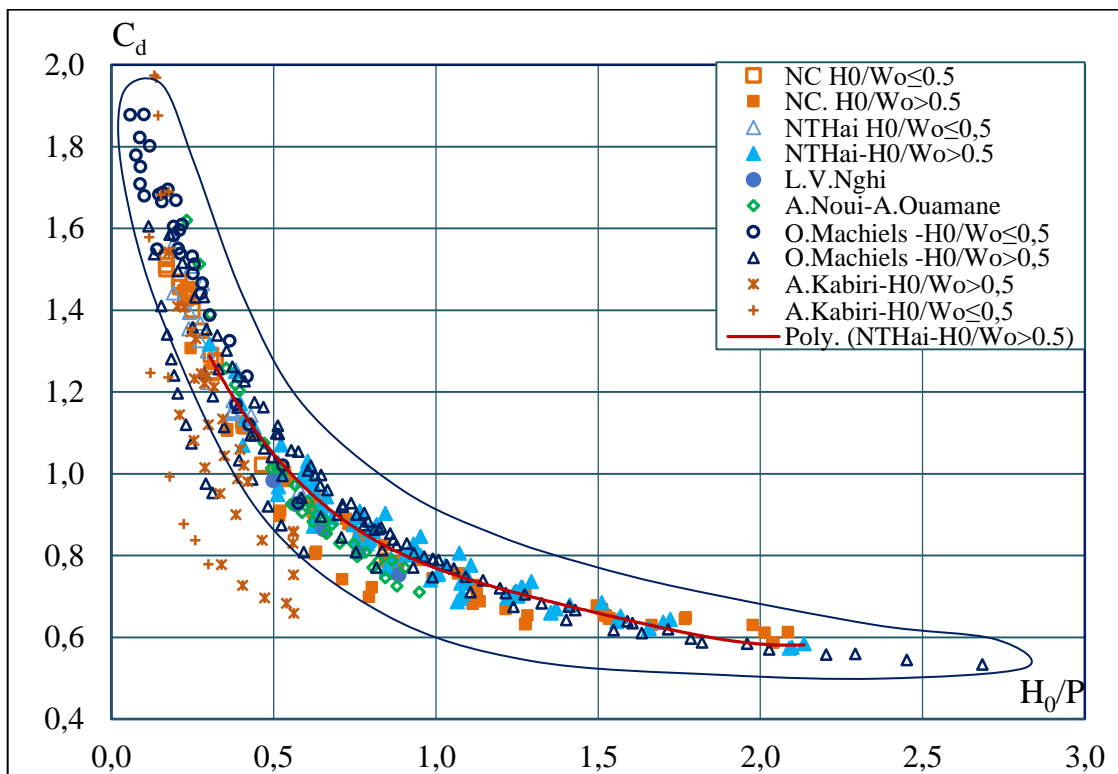
Bảng 2.3 Tổng hợp các nghiên cứu để kiểm chứng công thức luận án

| Nghiên cứu / tác giả | L/W | P/W _u | W _i /W _o | P _i /P _o | B _o /B _i | W _u (cm) |
|-----------------------------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| A.Noui & A.Ouamane [43] | 5,9 | 0,9 | 0,96÷1,53 | 1,0 | 1,0 | 0,17÷0,25 |
| O.Machiels và cs [41] | 5,0 | 0,33÷2,0 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,30 |
| Nguyễn Thanh Hải và cs [4] | 4,3÷8,2 | 0,3÷2,4 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 0,17÷0,30 |
| A.Kabiri-Samani & A.Javaheri [30] | 6,0÷8,1 | 0,63÷1,79 | 0,33÷1,67 | 1,0 | 0÷0,26 | 0,30 |

b. Dòng chảy tự do qua tràn piano

Tổng hợp, phân tích số liệu thí nghiệm của luận án và các nghiên cứu khác khi tràn piano chảy tự do, cho thấy:

Quan hệ giữa hệ số tháo và cột nước $C_d \sim H/P$ của luận án phù hợp xu hướng phân bố, khoảng giá trị C_d của các nghiên cứu đã có thể hiện trên Hình 2.7. Hệ số tháo C_d đạt giá trị lớn khi H/P nhỏ và giảm dần khi H/P lớn. Với $H/P > 2$, đường quan hệ có xu hướng nằm ngang.



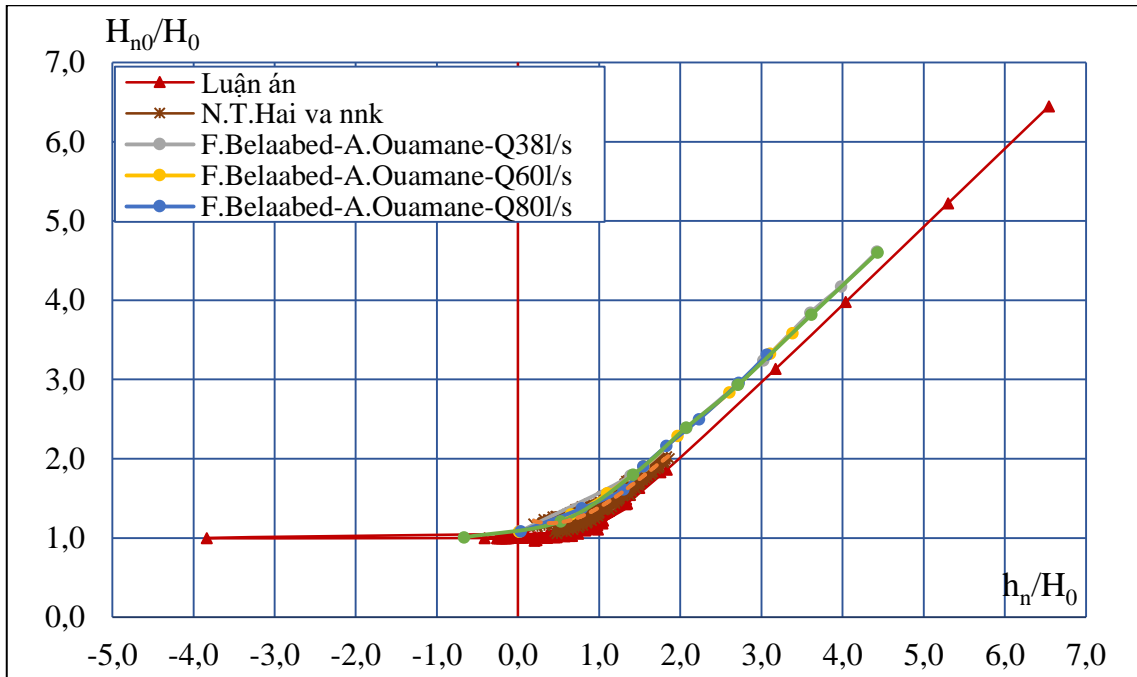
Hình 2.7 So sánh số liệu thực nghiệm của luận án với các nghiên cứu khác

Hình 2.7 cũng biểu thị giá trị C_d của những PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn không khác nhau nhiều, tập trung trong vùng đường bao kín. Trong khi số liệu của PKW phi chuẩn phân tán, nằm cách xa ngoài đường bao, đây là số liệu của những tràn có tỷ lệ $P/W_u = 1,4 \div 2,4$; $N=8$; $W_i/W_0 = 0,7$; 1,0 hoặc đỉnh tường PKW dạng nhọn.

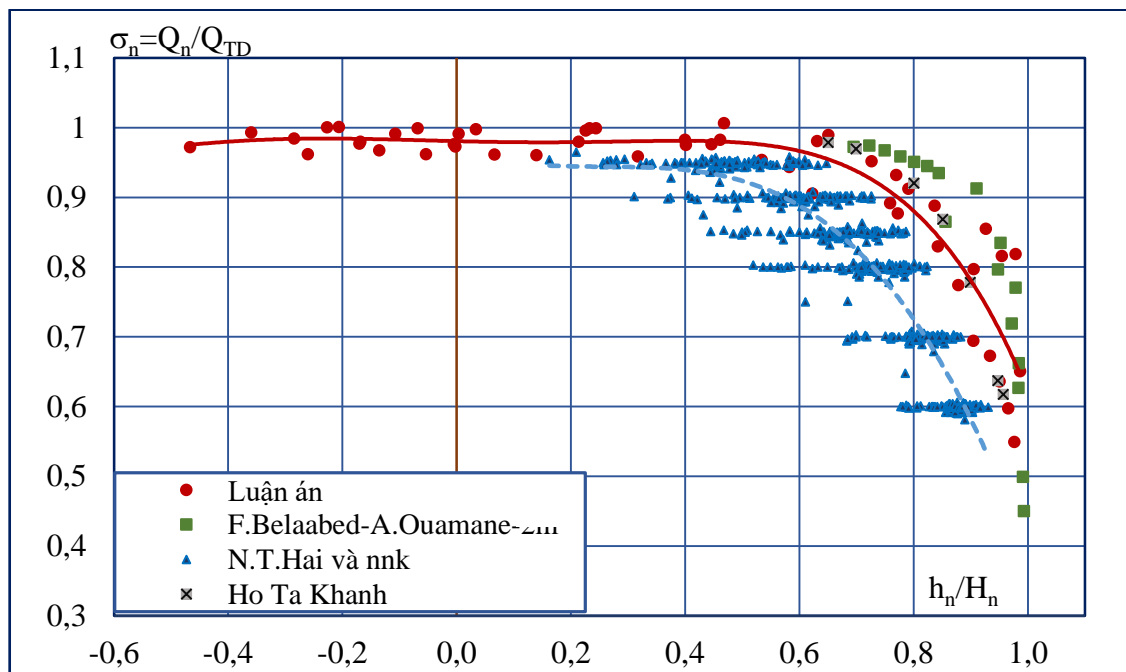
c. Dòng chảy ngập qua tràn piano

So sánh kết quả thí nghiệm của luận án và các tác giả khác cho tràn chảy ngập như trên Hình 2.8, Hình 2.9 cho thấy: xu hướng đường quan hệ giữa hệ số ngập σ_n và tỷ lệ cột nước h_n/H_n của luận án phù hợp, tập trung, tương tự như các

nghiên cứu đã trình bày trong mục 1.2.3. Hệ số ngập giảm khi độ ngập tăng, hệ số ngập giảm nhanh khi độ ngập $h_n/H_n > 0,6$. Do đó nhiều nghiên cứu về tràn piano chảy ngập thường tập trung khảo sát cho vùng có độ ngập lớn $h_n/H_n > 0,6$.



Hình 2.8 Sự phù hợp giữa kết quả thí nghiệm của luận án với các tác giả khác



Hình 2.9 Sự phù hợp kết quả thí nghiệm σ_n của luận án với các tác giả khác

Như vậy, với tràn piano có đơn vị tràn tiêu chuẩn, số liệu thí nghiệm của luận án cho trường hợp chảy tự do và chảy ngập phù hợp với các nghiên cứu đã có. Kết quả này đảm bảo độ tin cậy làm cơ sở kiểm nghiệm mô hình toán 3D cũng như sử dụng trong phân tích, xác định các chế độ chảy, trạng thái ranh giới chảy qua tràn và thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua PKW.

2.4.2 Mô hình toán

Luận án sử dụng phần mềm Flow 3D để xây dựng mô hình toán 3 chiều mô phỏng dòng chảy qua tràn piano nhằm mô tả các đặc trưng thủy lực của dòng chảy trên phím nước vào, phím nước ra và nối tiếp hạ lưu. Phần mềm Flow 3D là công cụ được sử dụng rộng rãi trong mô phỏng thủy lực công trình, được phát triển bởi công ty Flow Science, Inc của Hoa Kỳ, sử dụng phương pháp thể tích khối (phần tử khối) để giải hệ phương trình Navier-Stokes. Hệ phương trình cơ bản và thuật giải của phần mềm Flow 3D được trình bày chi tiết trong các tài liệu hướng dẫn sử dụng phần mềm.

2.4.2.1 Phạm vi mô phỏng, lưới tính toán

Luận án mô phỏng 1 lát cắt dòng chảy qua tràn piano. Hình dạng đơn vị tràn tương tự như mô hình thực nghiệm có tỷ lệ $\lambda_1=20$, bề rộng lát cắt 10m, tràn cao $P=3,6\text{m}$; đơn phím rộng $W_u=4,7\text{m}$; chiều dài phím $B=10\text{m}$; thành phím dày 0,3m; Kênh thượng lưu dài 40m; kênh hạ lưu dài 50m. Phạm vi kênh thượng lưu, kênh hạ lưu được lựa chọn qua nhiều lần tính toán, đảm bảo phạm vi dòng chảy thượng lưu không bị ảnh hưởng bởi hiện tượng hạ thấp cột nước, dòng chảy hạ lưu qua khu vực nước nước nhảy trở về trạng thái như kênh tự nhiên và hài hòa về khối lượng, thời gian tính toán.

Miền tính toán được chia lưới vuông trực giao, phần tử là khối hình hộp chữ nhật xác định bởi lưới vuông 3 chiều. Toàn miền tính toán được chia làm 5 khu vực có kích thước lưới khác nhau để tăng nhanh tốc độ tính mà vẫn đạt được độ chính xác trong vùng quan tâm. Khu vực công trình và lân cận có kích thước lưới nhỏ hơn khu vực kênh dẫn.

Bước lưới được chọn là ước số của các kích thước hình học của công trình. Kích thước lưới cho mỗi vùng và phạm vi các vùng tính toán được thử nghiệm nhiều lần để thu được lưới tính tối ưu về thời gian và biểu diễn chính xác đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy qua PKW. Bước lưới theo 3 chiều tương ứng là Δx , Δy , Δz , cho mỗi khu vực từ thượng lưu về hạ lưu có giá trị cụ thể như sau (Hình 2.10, Hình 2.11):

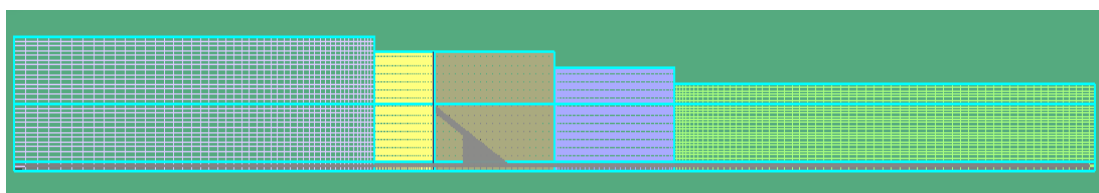
Vùng 1: Kênh thượng lưu, dài 30m, $\Delta x=1,0\div 0,25\text{m}$; $\Delta y=0,5\text{m}$; $\Delta z=0,3\text{m}$;

Vùng 2: Sân thượng lưu, dài 10m: $\Delta x=0,25\div 0,1\text{m}$; $\Delta y=0,1\text{m}$; $\Delta z=0,1\text{m}$;

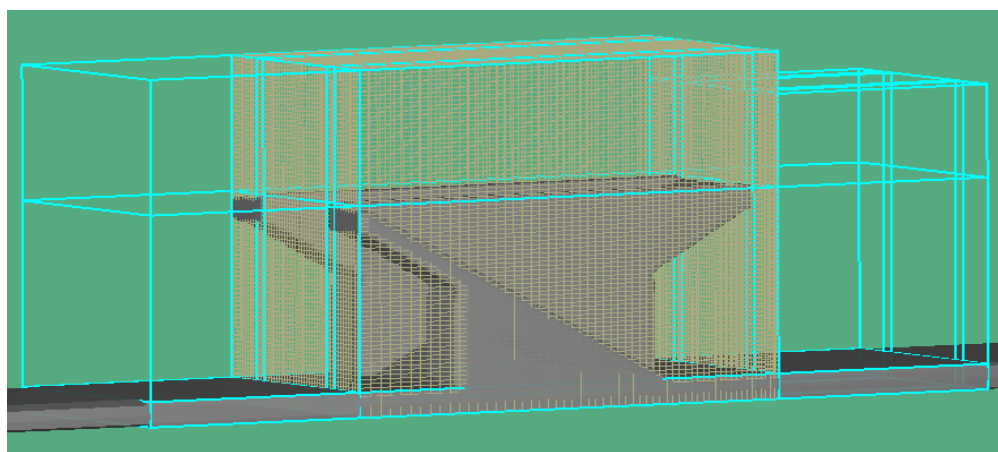
Vùng 3: Trần piano, dài 10m: $\Delta x=\Delta y=\Delta z=0,1\text{m}$;

Vùng 4: Sân hạ lưu, dài 15m: $\Delta x=\Delta y=\Delta z=0,05\div 0,2\text{m}$;

Vùng 5, Kênh xả hạ lưu, dài 35m: $\Delta x=0,2\div 0,5\text{m}$; $\Delta y=0,2\text{m}$; $\Delta z=0,2\text{m}$.



Hình 2.10 Phạm vi mô phỏng, miền lưới tính toán



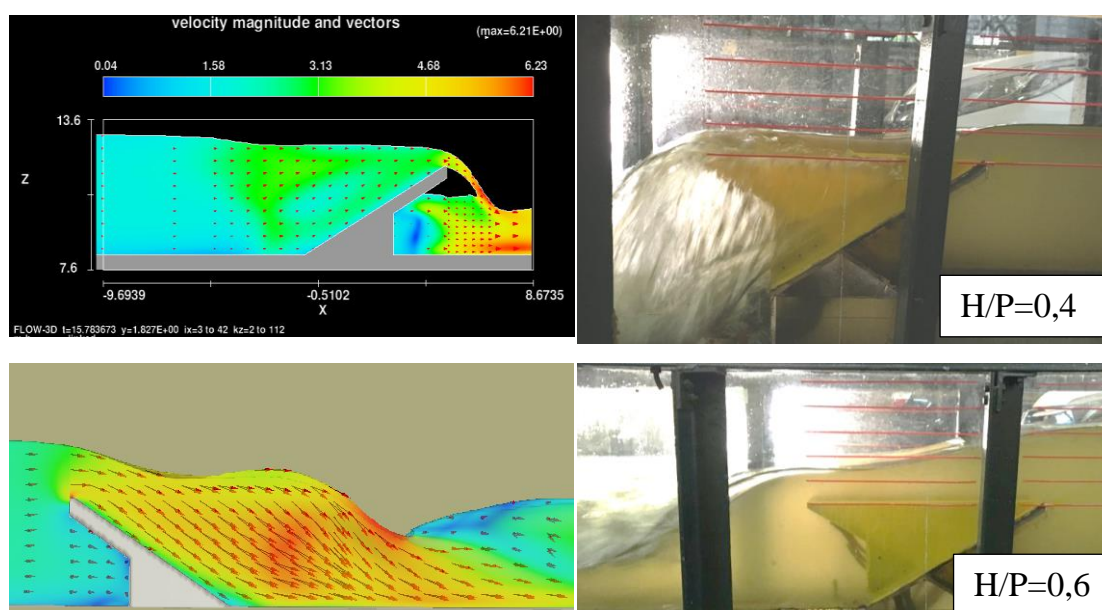
Hình 2.11 Chi tiết lưới tính toán khu vực trần piano

2.4.2.2 Kiểm nghiệm, hiệu chỉnh mô hình

Sau khi thiết lập, mô hình được kiểm nghiệm và hiệu chỉnh bằng số liệu thu được từ mô hình vật lý cho trường hợp cột nước tràn $H/P=0,4$; $H/P=0,6$. Các kết quả được chiết xuất, so sánh, biểu thị trên Bảng 2.4, Hình 2.12. Kết quả cho thấy

hình dạng đường mặt nước, luồng nước rơi, cao trình mực nước, phân bố và giá trị lưu tốc của dòng chảy phù hợp với quy luật thủy lực và kết quả thí nghiệm.

Giá trị lưu tốc trung bình mặt cắt tại khu vực đầu phím PKW là 2,5m/s; tại giữa tràn, vùng dòng sóng lồm là $v_{tb}=3,3\text{m/s}$ và cuối tràn, đầu làn nước rơi là $v_{tb}=5,3\text{m/s}$, tương tự như kết quả thí nghiệm trên mô hình vật lý. Do đó, mô hình toán 3D đủ độ tin cậy để mô phỏng, đánh giá các đặc trưng thủy động lực dòng chảy qua tràn piano khi thay đổi mực nước thượng, hạ lưu.



Hình 2.12 Kết quả kiểm nghiệm, hiệu chỉnh mô hình

Bảng 2.4 Giá trị lưu tốc trung bình mặt cắt của dòng chảy trên phím vào H/P=0,4

| Vị trí | Mô hình 3D | Mô hình vật lý |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| Đầu tràn: | $V=2,50\text{m/s}$ | $V=2,37\text{m/s}$ |
| Giữa tràn: | $V=3,30\text{m/s}$ | $V=3,23\text{m/s}$ |
| Cuối tràn (đầu luồng nước rơi): | $V=5,33\text{m/s}$ | $V=5,77\text{m/s}$ |

2.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

1. Từ cơ sở khoa học xác định khả năng tháo của tràn truyền thống, luận án đã luận giải và chỉ ra rằng lưu lượng tháo qua tràn piano phụ thuộc chủ yếu vào

các tham số công trình là chiều cao tràn P , chiều cao hạ lưu tràn P_H , chiều rộng tràn W , chiều rộng phím ra W_o , chiều dài tràn L khi tràn chảy tự do; tham số dòng chảy là cột nước thượng lưu H_0 , cột nước hạ lưu h_h , độ ngập h_n và chênh lệch mực nước hạ lưu z khi tràn chảy ngập.

2. Trên cơ sở về lý thuyết tương tự, lý thuyết thứ nguyên và mô hình, sử dụng phương pháp thí nghiệm trên mô hình vật lý, luận án đã thiết lập được hàm hồi quy thực nghiệm thể hiện mối tương quan giữa các yếu tố hình học và yếu tố thủy lực gồm phương trình tổng quát (2.23) và phương trình rút gọn (2.24). Khi tràn chảy tự do, có ảnh hưởng của chiều rộng phím tràn và đáy kênh hạ lưu, hệ số tháo theo phương trình (2.30) hoặc không có ảnh hưởng của chiều rộng phím tràn, hoặc đáy kênh hạ lưu, hệ số tháo theo phương trình (2.31), (2.32). Khi tràn chảy ngập, xác định hệ số ngập theo phương trình (2.33).

3. Mô hình vật lý và mô hình toán 3D được thiết kế, xây dựng mô phỏng lát cắt tràn piano gồm 2 đơn vị tràn. Dòng chảy trên mô hình tuân theo tiêu chuẩn Froude và thỏa mãn các tiêu chuẩn tương tự khác. Mô hình được thí nghiệm theo phương pháp chủ động bố trí trên cơ sở phân tích, khảo sát, kế thừa các nghiên cứu đã có. Điều kiện áp dụng vào thực tế của số liệu thí nghiệm khi tỷ lệ mô hình $\lambda \leq 70$ và $\lambda \leq 33H(m)$.

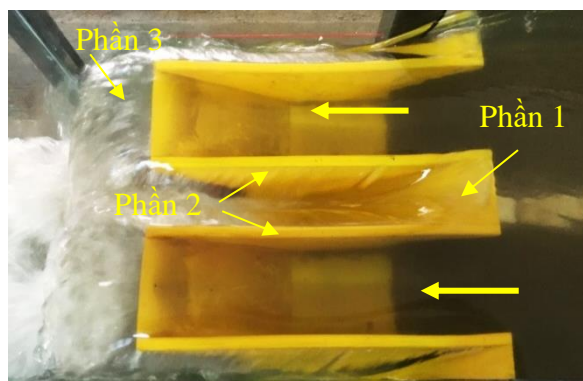
4. Luận án đã tổng hợp, phân tích hơn 450 số liệu số liệu thí nghiệm về tràn piano đã công bố trong những năm gần đây của các tác giả ở trong và ngoài nước, từ đó thực nghiệm bổ sung gần 150 thí nghiệm nhằm xác định khả năng tháo, phân bố vận tốc, đường mặt nước, lưu hướng. Phạm vi nghiên cứu, theo đại lượng không thứ nguyên: $H_0/P=0,17 \div 2,09$; $H_0/W_o=0,31 \div 2,08$; $H_0/W_u=0,14 \div 0,92$; $P/W_u=0,44 \div 1,07$; $h_n/H_n=-0,4 \div 0,98$; $q=0,03 \div 0,32 \text{ m}^2/\text{s}$, là tổ hợp của 3 trường hợp chiều cao tràn; 2 trường hợp đáy kênh hạ lưu ngang bằng/thấp hơn so với chân phím nước ra; 2 chế độ chảy là chảy không ngập và chảy ngập. Các số liệu thực nghiệm được đánh giá khách quan cùng các nghiên cứu của tác giả khác cung cấp bộ dữ liệu phù hợp, đảm bảo độ tin cậy, được sử dụng cho phân tích đặc điểm dòng chảy, xác định các chế độ, trạng thái ranh giới chảy qua PKW và thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano sẽ trình bày trong chương tiếp theo.

Chương 3 ĐẶC TRƯNG KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

Dòng chảy qua tràn piano gồm phần chảy qua tường thượng lưu, qua tường hạ lưu và tường bên của các phím. Trong đó, lưu lượng chảy qua tường thượng lưu và thành bên chiếm phần lớn tổng lưu lượng tràn. Phạm vi thoát nước của 2 thành phần này bị hạn chế bởi khu vực phím nước ra. Trong chương này, luận án trình bày đặc trưng thủy động lực học, sự chuyển đổi trạng thái chảy đầy và không đầy phím nước ra; ranh giới ảnh hưởng của đáy địa hình hạ lưu; ranh giới trạng thái chảy tự do và chảy ngập qua tràn; từ đó phân tích, tổng hợp số liệu thực nghiệm, thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua tràn và đánh giá hiệu quả thoát nước so với tràn truyền thống.

3.1 ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG HỌC, SỰ CHUYỂN ĐỔI CÁC TRẠNG THÁI VÀ NỐI TIẾP DÒNG CHẢY QUA TRÀN PIANO

Dòng chảy (lưu lượng) qua PKW được chia làm 3 phần tương ứng với đường zic zắc bao quanh các phím như thể hiện trên Hình 3.1, gồm: phần 1 tràn qua tường thượng lưu phím nước ra, phần 2 tràn qua thành bên và phần 3 qua tường hạ lưu của phím nước vào.



Hình 3.1 Các thành phần dòng chảy qua PKW

Các thành phần này được phân định ranh giới rõ ràng hoặc không rõ ràng tùy thuộc vào độ sâu cột nước thượng lưu tràn và kích thước phím nước ra, tạo nên đặc điểm khác biệt giữa dòng chảy qua tràn piano so với tràn truyền thống.

Trong luận án này, các đặc trưng dòng chảy qua tràn piano được xem xét, phân tích từ kết quả thí nghiệm mô hình vật lý và mô hình toán 3D.

3.1.1 Dòng chảy trên phím nước vào

Trên phím nước vào, hình dạng đường mặt nước thay đổi phụ thuộc vào cột nước thượng lưu hay lưu lượng dòng chảy đổ xuống phím ra, biểu thị bởi đại lượng

không thứ nguyên H_0/W_0 . Kết quả thực nghiệm cho thấy:

❖ *Hình dạng làn nước*, biểu thị trên Hình 3.2 và Hình 3.3a:

Khi cột nước tràn nhỏ ($H_0/W_0 < 0,5$), đường mặt nước trên phím nước vào khá phẳng, dạng nằm ngang (Hình 3.2a). Khi tăng cột nước tràn H ($0,5 < H_0/W_0 < 1,7$), dòng chảy có dạng vồng lên ở cuối phím. Đường mặt nước dọc phím nước vào có dạng lượn sóng, co hẹp ở khu vực giữa tràn theo chiều dòng chảy. Mức độ lượn sóng giảm khi mực nước hạ lưu tăng. Vị trí co hẹp dịch chuyển dần về hạ lưu khi cột nước qua tràn tăng (Hình 3.2b,c).

Tiếp tục tăng cột nước thượng lưu ($H_0/W_0 > 1,7$), dòng chảy trên mặt cắt ngang các phím tương đối đều nhau, không có sự khác nhau rõ rệt giữa phím ra và phím vào, đường mặt nước trên phím nước vào dạng đường nước đổ, thấp dần về hạ lưu (Hình 3.2d).



a. Cột nước tràn thấp ($H_0/W_0=0,4$)



b. Cột nước tràn trung bình ($H_0/W_0=0,8$)



c. Cột nước tràn khá lớn ($H_0/W_0=1,5$)



d. Cột nước tràn lớn ($H_0/W_0=1,9$)

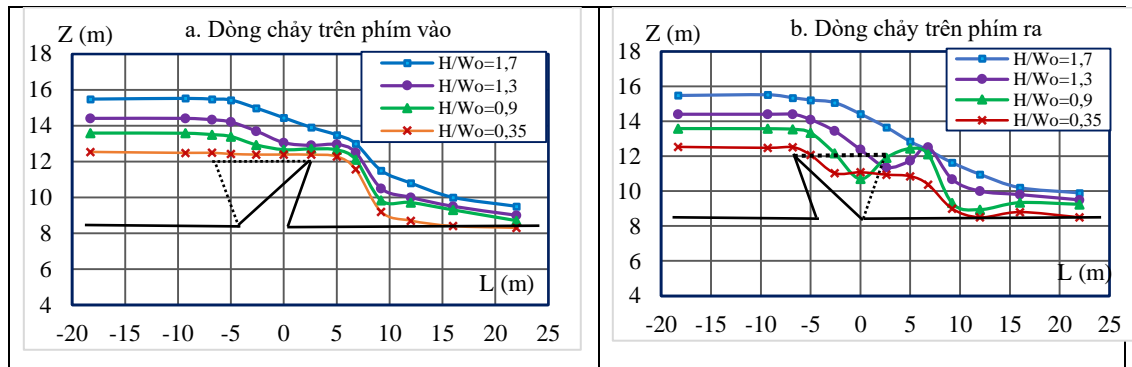
Hình 3.2 Quá trình thay đổi hình dạng đường mặt nước dọc phím nước vào

❖ *Lưu hướng và phân bố lưu tốc*:

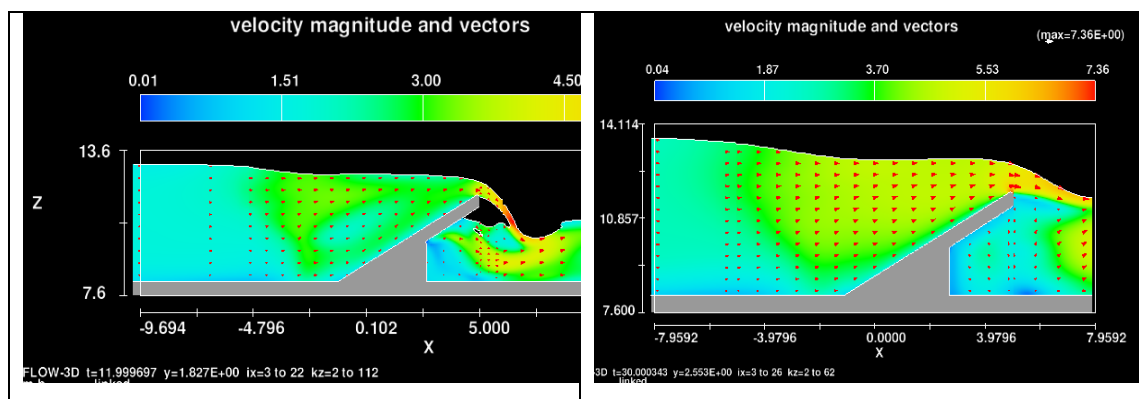
Khi tăng mực nước thượng lưu, lưu hướng của dòng chảy trên phím nước vào ít có sự thay đổi. Lưu hướng dòng đáy song song với phương đáy phím, độ

đốc của lưu hướng giảm dần khi dòng lên mặt, lưu hướng dòng mặt có hướng tương tự đường mặt nước.

Giá trị lưu tốc dòng chảy nhỏ ở dòng đáy và tăng dần lên mặt. Lưu tốc lớn nhất tại dòng rơi từ cuối phím vào đồ xuống hạ lưu như thể hiện trên Hình 3.4.



Hình 3.3 Đường mặt nước dọc công trình khi tăng cột nước tràn



Hình 3.4 Lưu hướng và phân bố lưu tốc trên phím vào khi tăng cột nước tràn

3.1.2 Dòng chảy trên phím nước ra

Dòng chảy trên phím nước ra gồm dòng qua tường thượng lưu và dòng qua thành bên, chiếm phần lớn tổng lượng dòng chảy qua tràn piano.

❖ *Hình dạng dòng chảy*, thể hiện các trên Hình 3.3b, Hình 3.5 và Hình 3.6.

+ Làn nước qua tường thượng lưu đổ xuống phím nước ra có dạng tương tự như dòng chảy trên dốc có độ dốc lớn, không bị ảnh hưởng nhiều khi thay đổi mực nước thượng, hạ lưu, (Hình 3.5a).

+ Dòng chảy qua tường bên đổ xuống phím nước ra gồm 2 làn nước đối xứng nhau, chi phối lẫn nhau tùy theo cột nước tràn và chiều rộng lòng phím ra.

Khi cột nước tràn nhỏ ($H_0/W_0 < 0,5$), dòng chảy bám theo toàn bộ đường zic zắc, dạng làn nước rơi, có phương vuông góc với thành phím, tràn piano làm việc như tràn thành mỏng có chiều dài thoát nước L gấp từ 4 tới 6 lần chiều rộng tràn W , (Hình 3.5b).

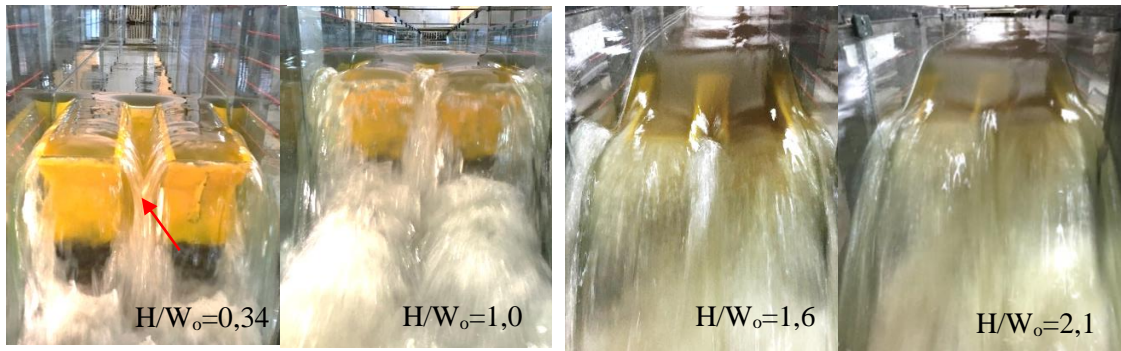
Trong lòng phím nước ra, làn nước rơi xuống từ hai thành bên giao nhau.

Khi cột nước tăng dần ($0,5 < H_0/W_0 < 1,7$), điểm giao thoa này dần nâng lên, làm làn nước vòng lên. Vị trí dòng vòng cao bắt đầu từ cuối phím phát triển dần về thượng lưu.



a. Dòng như trên dốc có độ dốc lớn b. Dòng vuông góc với thành bên

Hình 3.5 Dòng chảy trên phím nước ra

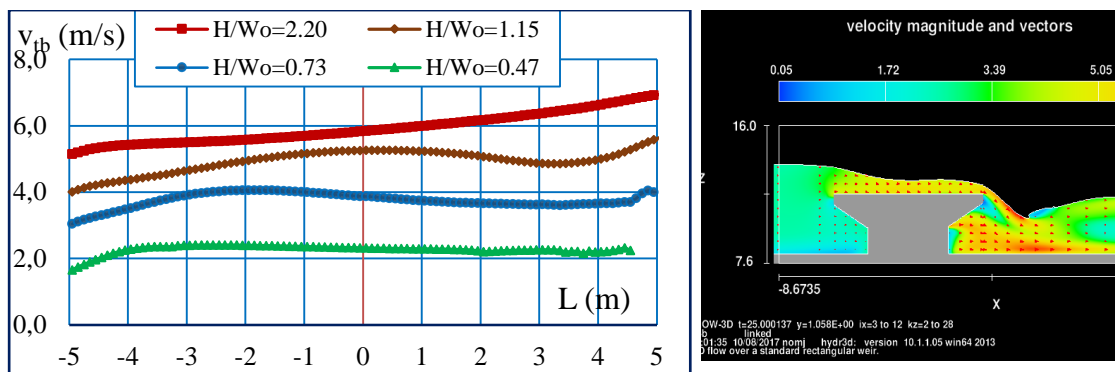


Hình 3.6 Đặc điểm dòng chảy trên phím ra khi tăng mực nước thượng lưu

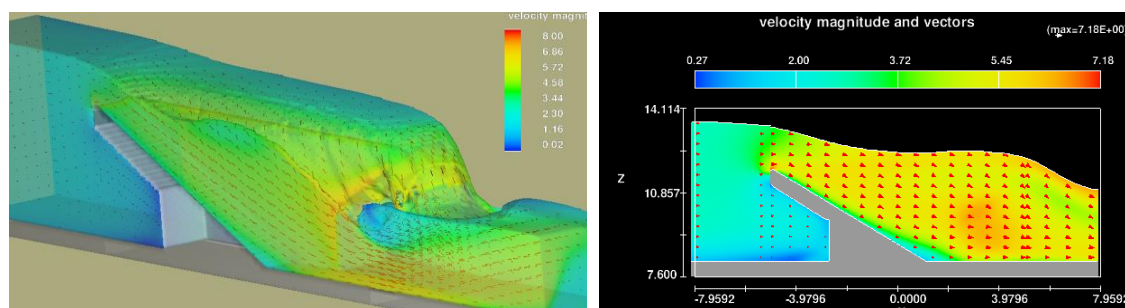
Tiếp tục tăng cột nước tràn ($H_0/W_0 > 1,7$), toàn bộ khối nước phủ trùm lên các phím, đường mặt nước ngang trên phím nước ra và phím nước vào dần tương tự nhau, thấp dần từ thượng lưu về hạ lưu, toàn bộ bó dòng trên phím ra có phương gần song song với thành bên, tràn piano làm việc như tràn thực dụng có chiều rộng tràn nước bằng tổng chiều rộng các phím (W).

❖ Lưu hướng và phân bố lưu tốc:

Xem xét phân bố lưu hướng và lưu tốc của phím nước ra là xem xét phân bố lưu hướng và lưu tốc của dòng chảy trên tường bên và dòng trên phím nước ra, biểu thị trên Hình 3.7 và Hình 3.8.



Hình 3.7 Phân bố giá trị lưu tốc trung bình mặt cắt dọc theo tường bên

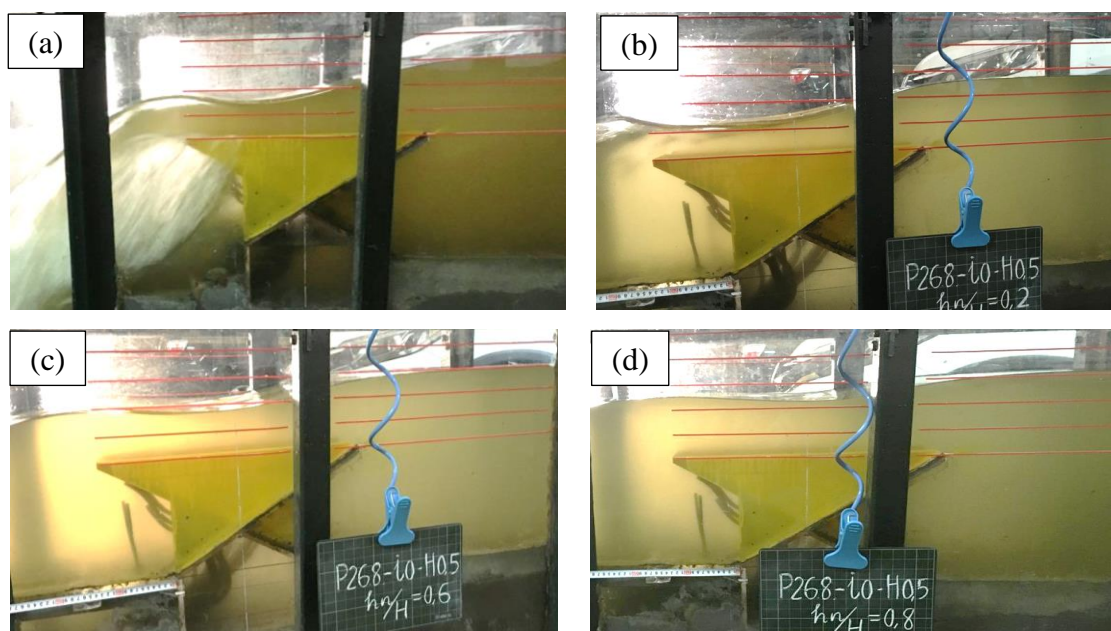


Hình 3.8 Lưu hướng dòng chảy và phân bố lưu tốc trên phím ra khi tăng H

- Dòng chảy trên tường bên: Khi H nhỏ, giá trị lưu tốc ở khu vực 1/3 đầu phím lớn hơn vùng cuối phím, lưu hướng vuông góc với thành bên. Khi H lớn, vùng có giá trị lưu tốc lớn dịch chuyển dần về hạ lưu, tương ứng với khu vực hình dạng dòng chảy có sóng lõm, lưu hướng chuyển dần từ phương vuông góc sang phương xiên. Tiếp tục tăng cột nước H , giá trị lưu tốc phân bố tăng dần về cuối phím, lưu hướng chuyển song song với thành bên của phím, phần dòng chảy có lưu tốc lớn nhất phóng thẳng xuống đầu kênh hạ lưu, cùng với dòng chảy từ cuối phím vào, tạo thành dòng xoắn ngang, ngược vào chân công trình.

- Dòng qua tường thượng lưu (phần 1) có lưu hướng song song với đáy phím, giá trị lưu tốc ở vùng 2/3 đầu phím lớn hơn vùng 1/3 cuối phím, tạo thành dòng đáy có lưu tốc lớn ở đầu kênh hạ lưu, (Hình 3.8).

Các đặc trưng về hình dạng dòng chảy, lưu hướng, phân bố lưu tốc thể hiện rõ ràng nhất khi mực nước hạ lưu thấp, dòng chảy qua PKW là tự do. Khi mực nước hạ lưu dâng cao dần, dòng từ thượng lưu qua tràn bị giới hạn dần bởi lớp nước hạ lưu, lưu tốc qua tràn giảm dần khi mực nước hạ lưu tăng, mức độ dòng lượn sóng giảm, làm dềnh mực nước thượng lưu, giảm khả năng tháo qua tràn, Hình 3.9 .



Hình 3.9 Quá trình giảm mức lượn sóng khi tăng mực nước hạ lưu

3.1.3 Nối tiếp dòng chảy ở hạ lưu

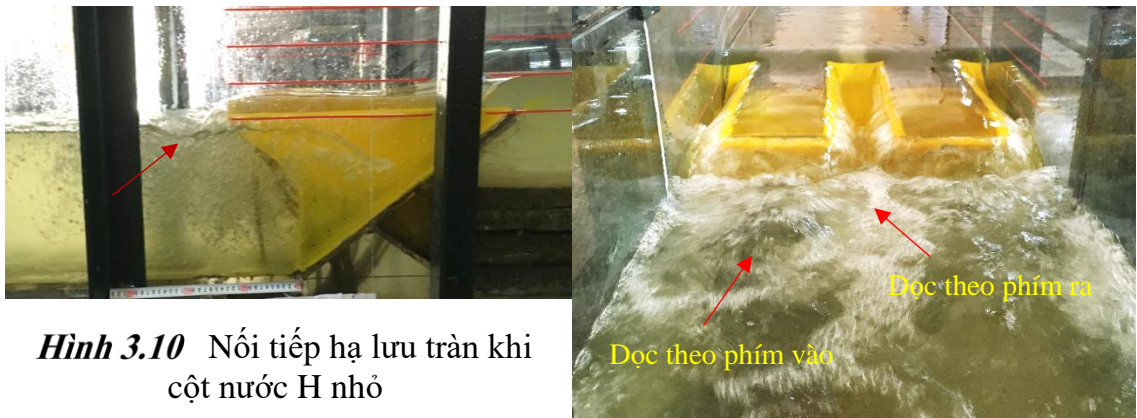
Đặc điểm dòng chảy và hình thức nối tiếp hạ lưu tràn piano không chỉ phụ thuộc vào mực nước hạ lưu mà còn phụ thuộc bố dòng ra khỏi các phím. Dọc theo phím vào và phím ra, hình thức nối tiếp hạ lưu là khác nhau.

+ Khi đáy kênh hạ lưu tràn piano không có bậc thụt, ngay sau tràn không có lớp nước hạ lưu, nối tiếp dòng chảy hạ lưu phím nước ra là dạng nối tiếp dòng trên kênh có độ dốc lớn. Nối tiếp dòng chảy sau phím nước vào là dạng dòng rơi sau đó chuyển thành xiết. Dòng chảy trên mặt cắt ngang kênh không phân bố đều. Dòng chảy phía phím nước ra nhiều hơn, sâu hơn và lưu tốc lớn hơn phía bên phím nước vào.

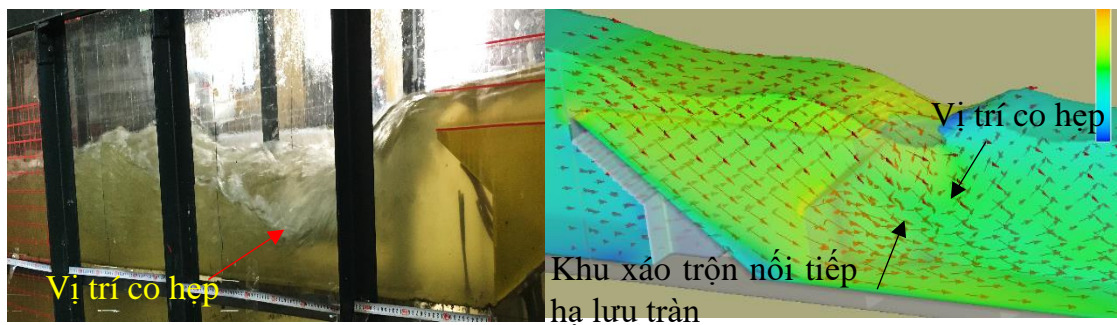
+ Khi hạ lưu có lớp nước đệm, nối tiếp hạ lưu tràn chia làm hai phần rõ rệt gồm khu xáo trộn trước co hẹp và khu nước nhảy sau co hẹp, phân định bởi vị trí

dòng rơi giao với mực nước hạ lưu (vị trí dòng chảy co hẹp) (Hình 3.10, Hình 3.11). Dọc theo hạ lưu phím nước vào và phím nước ra, hình thức nối tiếp dòng chảy là khác nhau:

Dòng chảy cuối phím vào nối tiếp hạ lưu dạng dòng phun. Một phần bó dòng phía trên luồng phun nối tiếp hạ lưu bằng dòng mặt, một phần bó dòng phía dưới luồng phun tạo dòng quẩn ngược về gằm phím, cùng với dòng chảy từ cuối tường bên đổ xuống tạo nên xoáy cuộn ở chân công trình (Hình 3.11, Hình 3.13, Hình 3.14). Từ vị trí co hẹp về chân tràn, luôn có xoáy cuộn (gằm phím nước vào). Dòng quẩn ngược có hướng từ hạ lưu về chân tràn và từ phía phím nước ra sang phía phím nước vào.



Hình 3.10 Nối tiếp hạ lưu tràn khi cột nước H nhỏ



Hình 3.11 Nối tiếp hạ lưu tràn khi cột nước H lớn, mực nước hạ lưu thấp/cao

Dòng chảy sau phím nước ra nối tiếp hạ lưu bằng dòng đáy qua khu vực nước nhảy, tương tự dòng chảy trên dốc có độ dốc lớn. Lưu hướng dòng chảy có phương xiên hợp bởi phương của dòng xiên từ thành bên đổ xuống và phương của dòng đáy có độ dốc lớn trên đáy phím ra. Bó dòng xiên này chuyển dần hất lên mặt, theo nguyên lý cân bằng năng lượng (Hình 3.15).

- Về phân bố lưu tốc dòng chảy: Trong khu vực trước vị trí co hẹp, giá trị lưu tốc đáy và lưu tốc trung bình mặt cắt dọc theo phím ra lớn hơn bên phím vào. Sau vị trí co hẹp, lưu tốc trung bình của dòng chảy sau phím ra dần nhỏ hơn phía phím nước vào và dần trở về phân bố như dòng tự nhiên trên kênh hạ lưu (Bảng 3.1, Hình 3.12a). Đó là do dòng chảy sau phím ra được tiêu năng bởi lớp nước đệm hạ lưu, lưu tốc giảm nhanh khi qua nước nhảy ngập và dần trở về lưu tốc của dòng trên kênh tự nhiên. Dòng chảy sau phím nước vào là nối tiếp chảy mặt, năng lượng tiêu hao nhỏ nên lưu tốc dòng chảy còn lớn (Hình 3.12b).

Các đặc điểm nối tiếp này cho thấy PKW khác biệt với tràn truyền thống ở khu vực dòng quần từ vị trí co hẹp về chân công trình. Hiện tượng này ảnh hưởng tới dòng chảy và khả năng tháo qua tràn, được phân tích trong mục 3.1.4 tiếp theo. Từ sau vị trí co hẹp, dòng chảy hạ lưu mới tương tự như của tràn truyền thống.

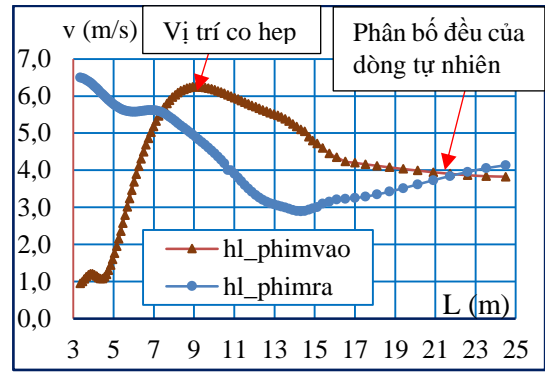
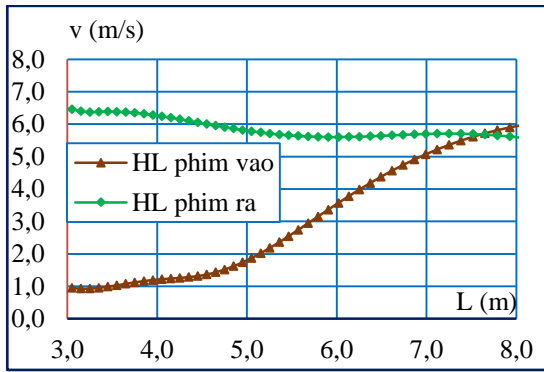
Ngoài ra, với PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn, chiều dài tràn nước của tường thượng lưu và 2 thành bên gấp khoảng 6÷10 lần chiều dài tràn nước của tường hạ lưu (cuối phím vào). Nếu coi lưu lượng đơn vị thành phần là tương tự nhau thì lưu lượng trên phím nước ra bằng khoảng 80%÷90% tổng lưu lượng tháo qua toàn bộ tràn, tức là, ở hạ lưu PKW, lượng dòng nối tiếp chảy đáy chiếm phần lớn so với nối tiếp chảy mặt. Đó cũng là lý do lưu tốc dòng chảy đáy ngay sau tràn ở hạ lưu phím ra lớn hơn nhiều so với hạ lưu phím vào.

Bảng 3.1 Giá trị lưu tốc dòng chảy ở hạ lưu tràn, dọc theo các phím

| Vị trí | Giá trị lưu tốc đáy, giá trị trung bình v_{tb} (m/s) * | | | | | | | |
|--------------------|--|-------|------|----------|--------------|------|-------|----------|
| | Phím nước vào | | | | Phím nước ra | | | |
| | u | v | w | v_{tb} | u | v | w | v_{tb} |
| Chân tràn (L=3,2m) | -0,61 | -0,73 | 0,01 | -0,95 | 6,13 | 0,75 | -1,13 | 6,31 |
| Cách chân tràn 2m | 0,97 | 1,24 | 1,02 | 1,87 | 5,29 | 1,50 | -1,77 | 5,78 |
| Cách chân tràn 5m | 4,80 | 1,08 | 1,22 | 5,07 | 5,26 | 1,28 | -1,76 | 5,69 |

*: Giá trị lưu tốc đáy theo 3 chiều (u, v, w); dấu “-” là ngược chiều, quy chiều theo trục xyz.

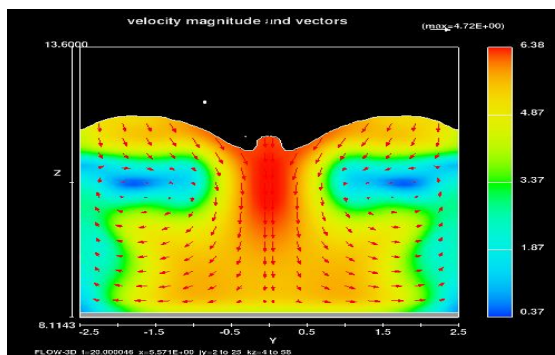
Chiều dài L tính từ tim công trình về hạ lưu.



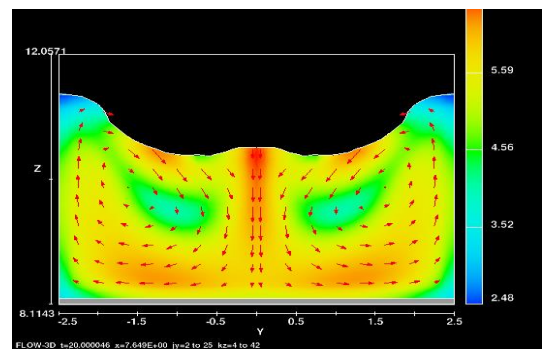
a. Khu vực xáo trộn trước vị trí co hẹp

b. Phân bố lưu tốc hạ lưu tràn

Hình 3.12 Giá trị, phân bố lưu tốc dòng chảy ở hạ lưu tràn, dọc theo các phim

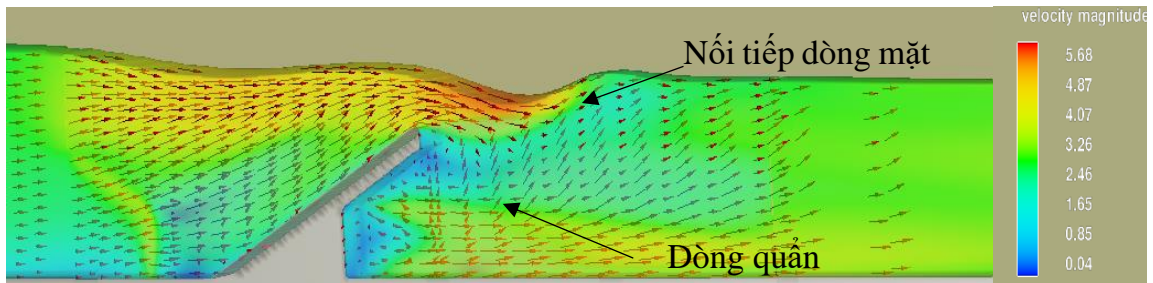


a. Tại vị trí L=5,6m

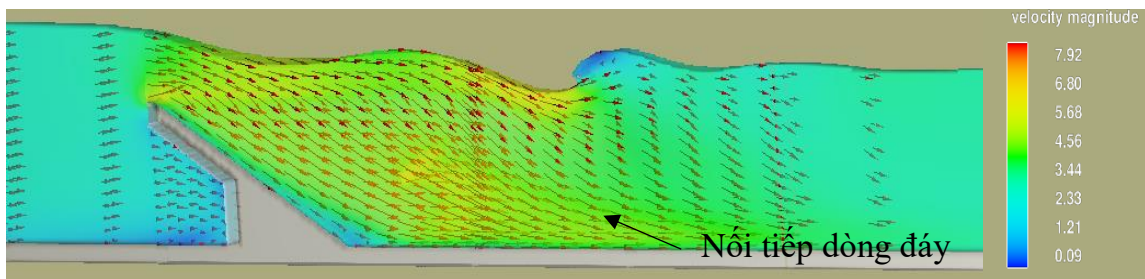


b. Tại vị trí L=7,6m

Hình 3.13 Lưu hướng dòng quần sau tràn nhìn từ hạ lưu



Hình 3.14 Nối tiếp hạ lưu phim nước vào



Hình 3.15 Nối tiếp hạ lưu phim nước ra

3.1.4 Ảnh hưởng của xoáy cuộn hạ lưu tới khả năng tháo qua tràn piano

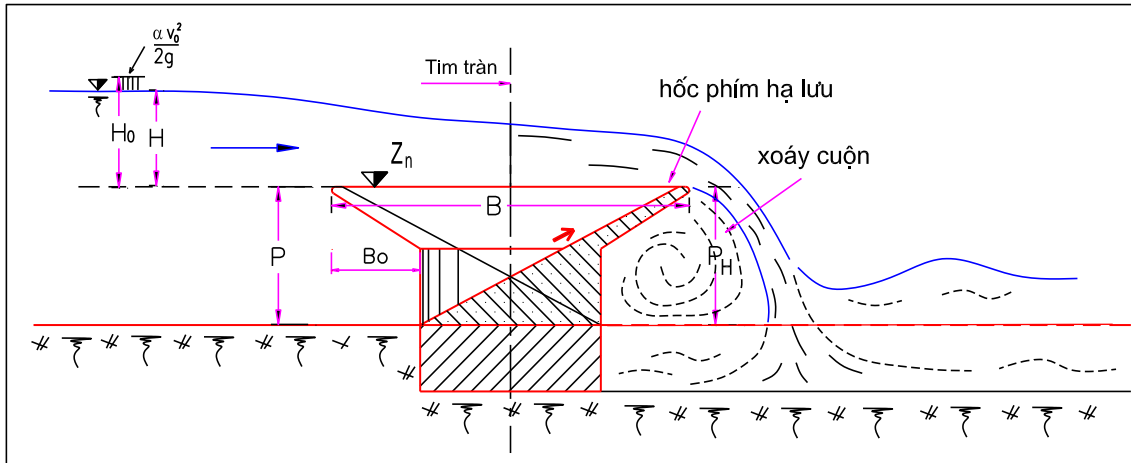
Với đặc điểm dòng chảy nối tiếp hạ lưu PKW như phân tích trên mục 3.1.3 cho thấy: Khi cột nước tràn lớn, xoáy cuộn ở gầm phím mạnh sẽ cản dòng chảy từ phím ra, làm ảnh hưởng giảm khả năng tháo qua PKW. Điều này xảy ra trong thực tế, khi tràn piano đặt trên lòng sông, địa hình đáy kênh hạ lưu nâng cao, diện tích mặt cắt ướt của dòng chảy ra bị giảm so với trường hợp PKW đặt trên đỉnh thực dụng, nên khả năng tháo qua tràn bị ảnh hưởng giảm, (Hình 3.16, Hình 3.17).

Từ số liệu thực nghiệm, luận án xác định được: với lưu lượng đơn vị nhỏ, lượng dòng chảy qua tường hạ lưu nhỏ, chỉ chiếm khoảng 5%÷10% tổng lượng dòng chảy qua tràn, nên cũng sinh ra dòng xoắn nhỏ, không ảnh hưởng tới hình dạng làn nước qua tràn, khả năng tháo của PKW không bị ảnh hưởng, (Hình 3.18).

Khi lưu lượng đơn vị lớn, bó dòng sinh dòng xoắn tăng, tạo thành xoáy cuộn dâng cao ở gầm hạ lưu phím nước vào, làm hạn chế dòng chảy thoát ra từ thành bên và phím nước ra, làm giảm khả năng thoát của tràn. Hay, với cùng cột nước thượng lưu, khi đáy kênh hạ lưu dâng lên (trường hợp thiết kế không để bậc thụt hoặc bị bồi lắng trong quá trình vận hành), diện tích mặt cắt ướt của lòng dẫn giảm, làm tăng mức độ xoáy cuộn, tăng tổn thất dòng chảy, giảm khả năng tháo của tràn piano, (Hình 3.19, Hình 3.20). Hệ số biểu thị mức độ giảm khả năng tháo được xác định trong mục 3.3.



Hình 3.16 Tràn piano có kênh hạ lưu cao ngang chân phím nước ra



Hình 3.17 Dòng chảy ở hạ lưu PKW khi đáy kênh hạ lưu cao



Hình 3.18 Dòng chảy ở hạ lưu tràn piano khi $H_0/P_H=0,2$



Hình 3.19 Dòng chảy ở hạ lưu tràn khi $H_0/P_H=0,7$



Hình 3.20 Dòng chảy ở hạ lưu tràn khi $H_0/P_H=1,0$

3.2 RANH GIỚI CÁC TRẠNG THÁI CHẢY QUA TRẦN PIANO

Từ đặc điểm dòng chảy và nối tiếp hạ lưu như đã trình bày trong 3.1, luận án xác định ranh giới của các đặc trưng này bằng phân tích bằng lý thuyết và số liệu thực nghiệm.

3.2.1 Ranh giới “chảy đầy phím ra”

Dòng chảy trên PKW được coi là chảy đầy phím ra khi mực nước hạ lưu cao hơn đỉnh thành phím. Ranh giới trạng thái chảy không đầy và chảy đầy phím ra được phân định bởi sự bắt đầu thay đổi hình dạng làn nước trên phím nước ra và phím nước vào. Khi mực nước trên kênh hạ lưu thấp, sự thay đổi này bị ảnh hưởng bởi vị trí giao thoa của làn nước đổ xuống từ hai bên thành phím. Xét vị trí điểm giao thoa là điểm giao ở mặt trên của hai làn nước, cho thấy:

Khi vị trí điểm giao thoa thấp hơn đỉnh tràn tức dòng chảy trên phím ra chưa vượt ngưỡng, hình dạng dòng chảy qua tường bên không đổi, dòng chảy qua tường bên và qua phím là chảy tự do. Toàn bộ dòng chảy bám theo đường zic zắc của đỉnh tràn. Trạng thái dòng chảy này gọi là “*chảy không đầy phím ra*”.

Khi cột nước tràn tăng dần, điểm giao thoa dần nâng lên, cao hơn đỉnh tràn, dòng chảy trên phím ra cao hơn ngưỡng, hình dạng làn nước qua thành bên thay đổi, bị vồng lên, phần lưu lượng tháo qua thành bên giảm, làm giảm khả năng tháo qua tràn piano. Trạng thái dòng chảy này gọi là “*chảy đầy phím ra*”.

Việc xác định giá trị của ranh giới này dựa trên đặc điểm dòng chảy của tràn piano, lý thuyết làn nước rơi qua tràn thành mỏng kết hợp với kết quả thực nghiệm.

+ Theo đặc điểm dòng chảy của tràn piano, lý thuyết làn nước rơi qua tràn thành mỏng như đã trình bày trong mục 2.1.1. Làn nước từ hai thành bên của phím đổ xuống, giao nhau tại vị trí cao hơn ngưỡng tràn khi tràn có cột nước lớn hơn $\frac{1}{2}$ chiều rộng phím nước ra, hay khi $H/W_0 > 0,5$.

+ Theo kết quả thực nghiệm của luận án:

Khi cột nước tràn $H_0/W_0 < 0,5$, làn nước qua PKW dạng đường nước rơi tự do, điểm giao thoa thấp hơn ngưỡng tràn, (Hình 3.21).

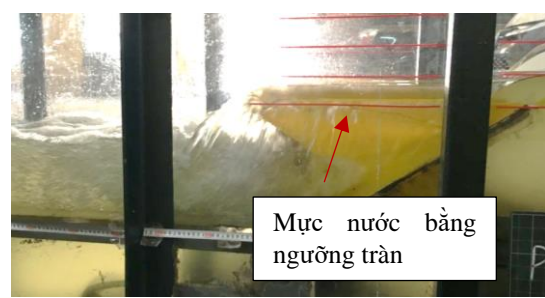
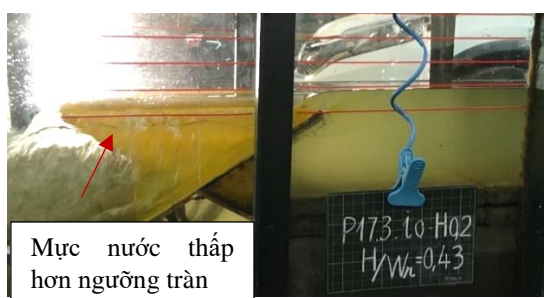
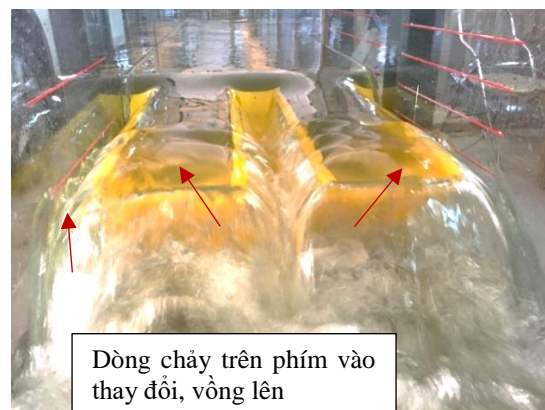
Khi cột nước tràn tăng dần, $0,5 < H_0/W_0 < 1,7$, điểm giao thoa bắt đầu cao hơn ngưỡng PKW, hình dạng làn nước qua tường bên bắt đầu thay đổi, dòng chảy trên phím vào vòng lên, dạng lượn sóng, làm tăng mực nước thượng lưu, khả năng tháo qua tràn giảm.

Khi cột nước đạt $H_0/W_0 > 1,7$, hình dạng đường mặt nước cắt ngang trên các phím là tương tự nhau, mực nước hạ thấp dần từ thượng lưu về hạ lưu, lưu lượng qua tràn piano như qua đập tràn thực dụng có mặt cắt ngang rộng dạng mai rùa. Hệ số khả năng tháo giảm chậm, không phụ thuộc nhiều vào phạm vi phím nước ra mà chỉ còn phụ thuộc vào cột nước H, tương tự như tràn truyền thống. Chi tiết đặc điểm dòng chảy của các trạng thái này như trình bày trong mục 3.1.

Trường hợp $H/W_0=0,43$



Trường hợp $H/W_0=0,5$



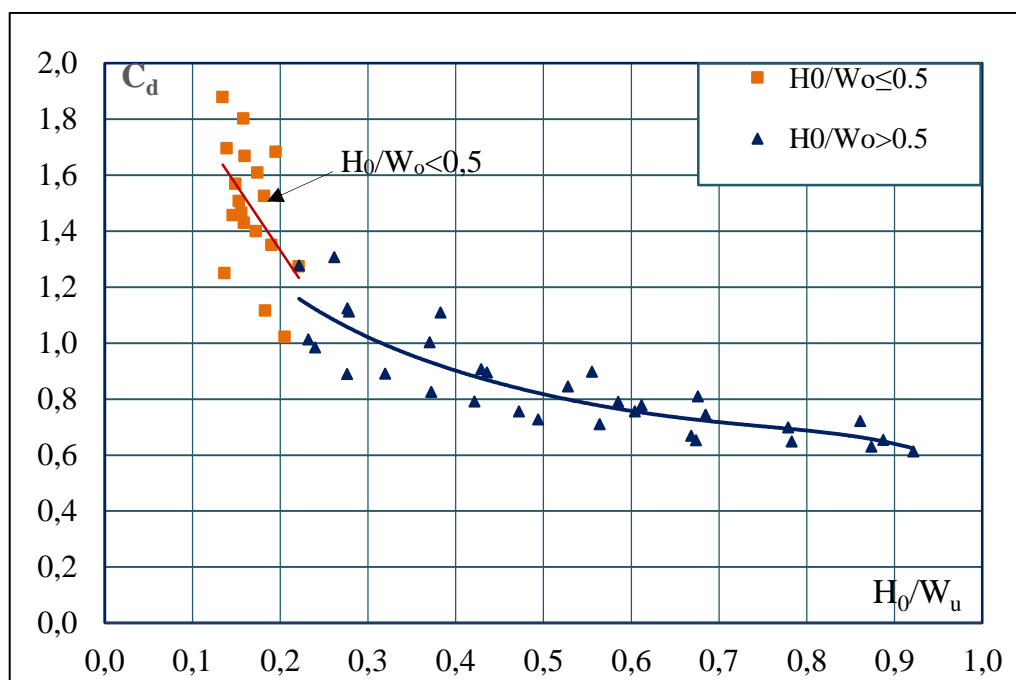
Hình 3.21 Đường mặt nước trên phím ra, phím vào khi $H/W_0=0,43; 0,5$

+ Phân tích kết quả thực nghiệm dưới dạng đồ thị giữa hệ số tháo C_d và tỷ lệ cột nước H_0/W_0 trên Hình 3.22 cho thấy:

- Khi $H_0/W_0 \leq 0,5$ đường quan hệ $C_d \sim H_0/W_0$ có độ dốc lớn, giá trị C_d giảm rất nhanh khi tăng cột nước tràn. Trong phạm vi này, các nghiên cứu khác cũng đã chỉ ra hệ số tháo C_d khác nhau rõ rệt giữa các loại PKW, giữa các tràn có tỷ lệ hình

học khác nhau như đã phân tích chi tiết trong phần tổng quan, mục 1.2.2. Giá trị C_d giảm từ $2,2 \div 1,7$ về khoảng 1,0 khi H/P thay đổi từ 0,2 lên 0,5.

- Khi $H_0/W_0 > 0,5$ các đường quan hệ này có độ dốc nhỏ, giá trị C_d giảm chậm khi tăng cột nước tràn và dần có xu hướng đi ngang. C_d thay đổi giảm nhẹ từ 1,0 về khoảng 0,6 khi H/P tăng từ 0,5 lên 2,0.



Hình 3.22 Quan hệ thực nghiệm hệ số tháo $C_d \sim H_0/W_u$ theo vùng H_0/W_0

- Điểm ranh giới chảy đầy cũng thu được khi phân tích các kết quả thực nghiệm của các tác giả trước đây. Trên hình Hình 1.9, Hình 1.12 cho thấy, khi $H/P < 0,2 \div 0,4$ tương đương $H/W_0 < 0,48$, tức là khi PKW có cột nước nhỏ hơn khoảng $\frac{1}{2}$ chiều rộng phím ra ($H < \frac{1}{2}W_0$), yếu tố đặc trưng hình học sẽ ảnh hưởng đáng kể tới khả năng tháo qua tràn, các PKW có tỷ lệ kích thước khác nhau có lưu lượng tháo khác nhau tới 15%. Khi cột nước lớn, $H > \frac{1}{2}W_0$, các thông số hình học sẽ ảnh hưởng không đáng kể tới khả năng tháo, sự khác nhau chỉ khoảng 3÷4%.

Như vậy, từ phân tích lý thuyết và thực nghiệm cho thấy hiệu quả tháo qua PKW biểu thị bởi hệ số tháo C_d là lớn hay nhỏ, phụ thuộc vào trạng thái dòng chảy là chảy không đầy phím ra hay chảy đầy phím ra. Giá trị ranh giới của 2 trạng thái chảy không đầy phím ra và chảy đầy phím ra là $H_0/W_0 = 0,5$. Điều này giải thích tại sao các nghiên cứu đã có phân biệt PKW loại A và PKW loại B hay các tỷ lệ kích

thước khác nhau, có xét đến L bởi với H/P nhỏ, dòng chảy trên tràn là trạng thái chảy không đầy phím ra.

Kết quả thực nghiệm cũng chỉ ra rằng việc coi đặc điểm làn nước rơi của tràn piano như tràn thành mỏng trong mục 2.1.1 là chấp nhận được.

3.2.2 Ranh giới chảy ngập

Tràn piano là chảy ngập khi thỏa mãn đồng thời 2 điều kiện, tương tự như tràn truyền thống: (1). Mức nước hạ lưu ảnh hưởng đến khả năng tháo, làm tăng mức nước thượng lưu, làm giảm lưu lượng qua tràn. (2). Dòng chảy qua tràn nối tiếp hạ lưu là nước nhảy ngập hoặc không có nước nhảy, dòng chảy ở ngay hạ lưu tràn là chảy êm.

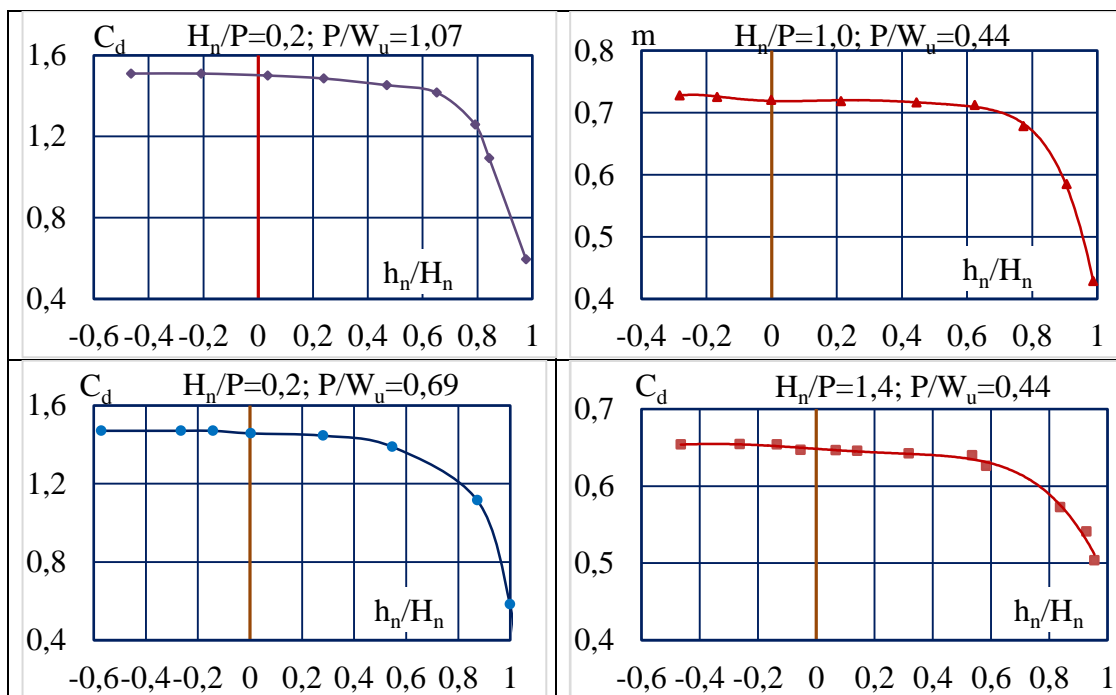
Từ đặc điểm, nối tiếp của dòng qua tràn piano được trình bày trong mục 3.1 cho thấy dòng chảy trong phím nước ra luôn nằm trong vùng chuyển tiếp, xáo trộn của dòng thượng lưu về hạ lưu, do đó mức nước hạ lưu để xem xét ảnh hưởng tới khả năng tháo qua tràn là mức nước ở lòng dẫn hạ lưu.

+ Ở điều kiện thứ nhất (điều kiện cần): Luận án xác định ranh giới chảy ngập là ranh giới khi thay đổi mức nước hạ lưu, bắt đầu làm ảnh hưởng, thay đổi hình dạng làn nước qua tràn, làm tăng cột nước thượng lưu và giảm năng lực tháo qua PKW.

Tiến hành thực nghiệm chi tiết theo trình tự: Giữ nguyên cao trình mức nước thượng lưu, nâng dần mức nước hạ lưu (MNHL) trong phạm vi rất nhỏ, tỷ lệ độ sâu ngập đạt từ -0,5 đến 0 ($h_n/H_n = -0,5 \div 0$), kết quả biểu thị trên Hình 3.23 cho thấy:

- Khi $h_n/H_n \leq -0,2$, mức nước hạ lưu thay đổi không làm tăng mức nước thượng lưu, lưu lượng qua PKW không bị ảnh hưởng.

- Khi mức nước hạ lưu gần xấp xỉ ngưỡng tràn ($h_n/H_n = -0,2 \div 0$), dòng chảy trên phím nước vào bị ảnh hưởng, hình dạng làn nước đổ xuống hạ lưu vòng lên, làm ảnh hưởng dâng mức nước thượng lưu, lưu lượng tháo qua PKW giảm. Mức độ ảnh hưởng giảm khả năng tháo rõ rệt hơn với những trường hợp xả lưu lượng lớn hoặc tỷ lệ cột nước H/P lớn. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, mức độ giảm khả năng tháo lớn nhất đạt 4% khi h_n/H_n tăng từ -0,2 đến 0.



Hình 3.23 Quan hệ $C_d \sim h_n/H_n$ ứng với các trường hợp thí nghiệm

+ Ở điều kiện thứ hai (điều kiện đủ): để có nước nhảy ngập sau tràn, chênh lệch cột nước thượng hạ lưu đảm bảo nhỏ hơn một giá trị phân giới, $(z/P_H) < (z/P_H)_{pg}$;

Giá trị cột nước phân giới z_{pg} xác định trong trường hợp là khi thay đổi mực nước hạ lưu, mực nước thượng lưu bắt đầu tăng.

Từ số liệu thực nghiệm, sử dụng hàm hồi quy tuyến tính, xác định được công thức xác định giá trị cột nước phân giới theo công thức (3.1). Ở đây với 6 số liệu thực nghiệm, xây dựng hàm thực nghiệm với 02 biến độc lập là đảm bảo yêu cầu về số thí nghiệm tối thiểu theo qui hoạch thực nghiệm.

$$\left(\frac{Z}{P_H}\right)_{pg} = 0,974 \cdot \left(\frac{H}{P}\right)^{0,977} \cdot \left(\frac{H}{W_u}\right)^{-0,055} \quad (3.1)$$

Trong (3.1), hệ số mũ của H/W_u rất nhỏ so với H/P , để thuận lợi cho tính toán, có thể bỏ qua đại lượng H/W_u , (3.1) trở thành:

$$z_{pg} = 0,974 \cdot \left(\frac{H}{P}\right)^{0,977} \cdot P_H \quad (3.2)$$

Số liệu thí nghiệm và kết quả tính toán cột nước phân giới theo các công thức (3.1), (3.2) chi tiết như trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2 Kết quả thí nghiệm và tính toán cột nước phân giới

| TT | q (m ² /s) | $\frac{h_n}{H_{n0}}$ | $\frac{H_{n0}}{P}$ | $\frac{H_{n0}}{W_u}$ | $\left(\frac{Z_{pg}}{P_H}\right)_{tn}$ | σ_n | $\left(\frac{Z_{pg}}{P_H}\right)_{tt}$ | | |
|----|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--|------------|--|-------|------------|
| | | | | | | | (3.1) | (3.2) | Sai số (%) |
| 1 | 0,270 | -0,157 | 1,015 | 0,893 | 1,050 | 0,998 | 0,995 | 0,989 | -5,2 |
| 2 | 0,199 | -0,119 | 1,518 | 0,671 | 1,520 | 0,993 | 1,498 | 1,465 | -1,5 |
| 3 | 0,210 | -0,066 | 0,522 | 0,559 | 0,501 | 0,965 | 0,533 | 0,516 | 6,3 |
| 4 | 0,064 | -0,199 | 0,169 | 0,181 | 0,194 | 0,979 | 0,188 | 0,171 | -3,0 |
| 5 | 0,141 | -0,151 | 1,125 | 0,497 | 1,181 | 0,960 | 1,136 | 1,093 | -3,8 |
| 6 | 0,044 | -0,139 | 0,209 | 0,144 | 0,231 | 0,978 | 0,235 | 0,211 | 1,4 |

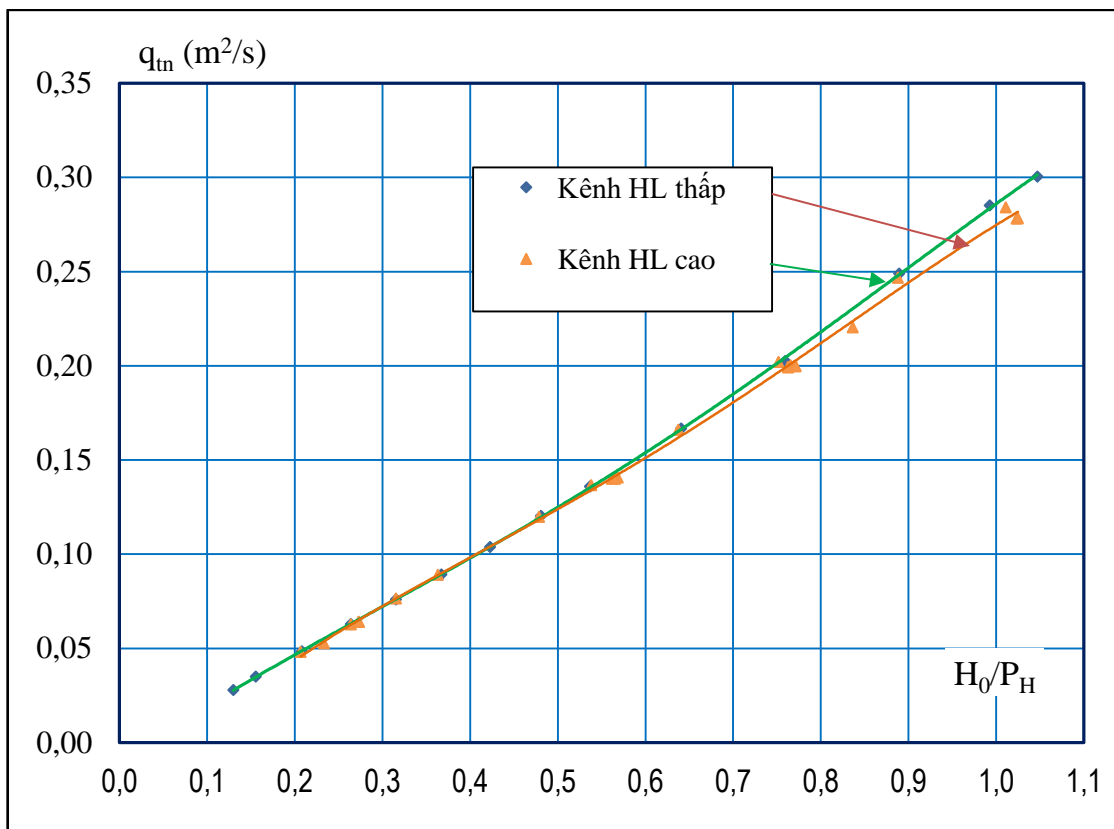
* Sai số được xác định là sai số giữa kết quả tính toán và số liệu thí nghiệm; sai số $= \left(\frac{Z_{pg}}{P_H} \right)_{tt} - \left(\frac{Z_{pg}}{P_H} \right)_{tn} / \left(\frac{Z_{pg}}{P_H} \right)_{tn}$.

3.2.3 Ranh giới ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu

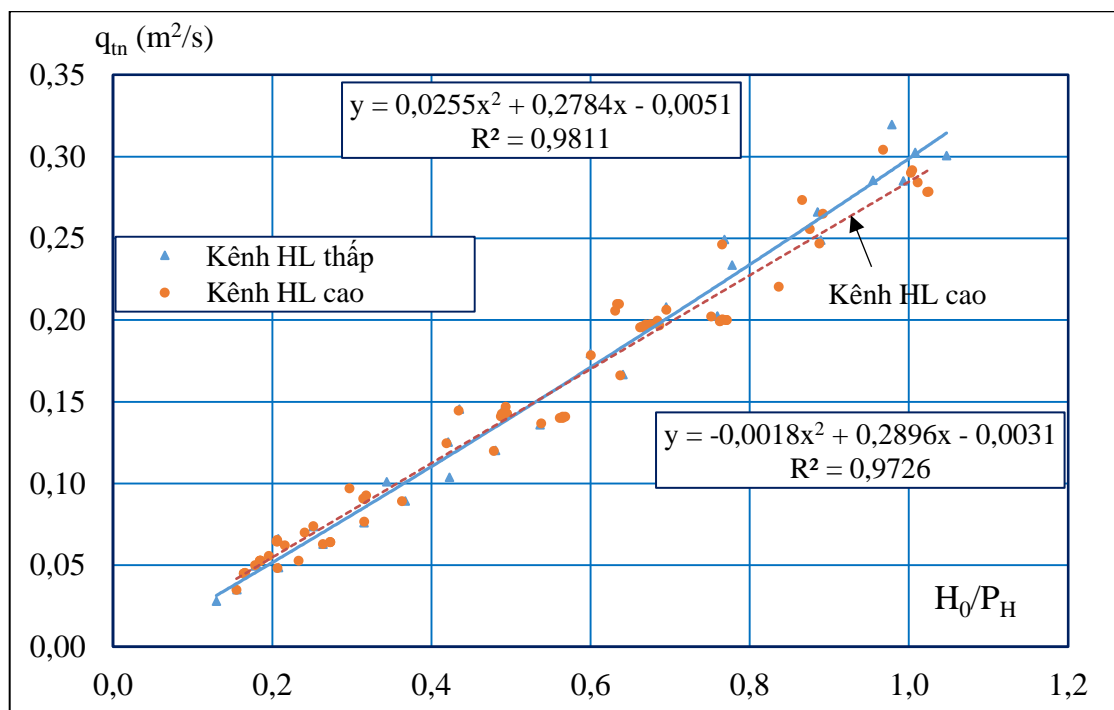
Để xác định ảnh hưởng của đáy kênh hạ lưu, nghiên cứu hai trường hợp giới hạn (P_H): trường hợp 1, đáy kênh hạ lưu không ảnh hưởng đến khả năng tháo, khi nó có cao độ rất thấp so với ngưỡng tràn; trường hợp 2, cao độ đáy kênh cao nhất, cao bằng chân phím nước ra của tràn piano; tương ứng mỗi trường hợp đáy kênh hạ lưu là 3 trường hợp chiều cao thượng lưu tràn P. Tổng số trường hợp nghiên cứu là 06.

Mức nước hạ lưu PKW là chảy tự do, không không chế (cửa cuối hạ hoàn toàn), (Hình 3.16). Không chế mức nước thượng lưu sao cho với 2 trường hợp đáy kênh hạ lưu sẽ có cùng điều kiện cột nước tràn hay cùng tỷ lệ cột nước tràn và chiều cao H/P.

Hình 3.24, Hình 3.25 biểu thị quan hệ giữa lưu lượng đơn vị và cột nước tràn ứng với các trường hợp chiều cao P/ W_u . Chi tiết tính toán xác định mức độ giảm lưu lượng đơn vị trình bày trong Bảng 3.3.



Hình 3.24 Lưu lượng đơn vị qua PKW khi kênh hạ lưu thấp/cao - $P/W_u=0,5$



Hình 3.25 Lưu lượng tháo qua PKW

Bảng 3.3 Mức độ giảm khả năng tháo khi kênh hạ lưu PKW cao/thấp

| H_0/P_H | Lưu lượng đơn vị ứng với đáy kênh hạ lưu PKW, q (m ² /s) | | Khả năng tháo giảm Δq (%) |
|-----------|---|-------|-----------------------------------|
| | Cao (ngang chân phím ra) | Thấp | |
| 0,70 | 0,201 | 0,202 | -1% |
| 0,75 | 0,215 | 0,218 | -1% |
| 0,80 | 0,230 | 0,234 | -2% |
| 0,85 | 0,245 | 0,250 | -2% |
| 0,90 | 0,259 | 0,266 | -3% |
| 0,95 | 0,274 | 0,282 | -3% |
| 1,00 | 0,289 | 0,299 | -3% |
| 1,05 | 0,304 | 0,315 | -4% |
| 1,10 | 0,318 | 0,332 | -4% |

Từ các kết quả thực nghiệm cho thấy:

- Khi $H_0/P_H < 0,7$, lưu lượng tháo qua PKW không bị ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu.

- Khi $H_0/P_H \geq 0,7$, khả năng tháo của tràn piano bị ảnh hưởng giảm. Mức độ ảnh hưởng lớn khi cột nước qua tràn tăng, trong phạm vi nghiên cứu giá trị giảm khả năng tháo lớn nhất là 4%.

3.2.4 Phân tích ảnh hưởng của trạng thái chảy tới khả năng tháo qua tràn

Theo các trạng thái chảy đã được xác định, cho thấy một cách rõ ràng hơn sự ảnh hưởng của yếu tố cấu tạo hình học và cấu tạo dòng chảy qua PKW tới khả năng tháo.

+ Với phân vùng theo trạng thái chảy không đầy và chảy đầy phím ra, giải thích ảnh hưởng của cấu tạo hình học PKW khác nhau tới khả năng tháo là đáng kể khi cột nước thấp là bởi:

- Khi tràn chảy không đầy phím ra, $H/W_0 \leq 0,5$, PKW làm việc như đập tràn thành mỏng, chiều dài thoát nước là đường zic zắc L.

Do đó lưu lượng qua PKW xác định theo công thức:

$$Q = m.L.\sqrt{2g}H_0^{3/2} \quad (3.3)$$

Trong (3.3), giá trị cột nước tràn $H_0 \leq 0,5W_0$ trong khi $L = (4 \div 6)W = (8 \div 15)\Sigma W_0$. Do đó ảnh hưởng tới lưu lượng qua PKW của thông số L lớn hơn

hiều so với H_0 , hay với các tràn piano có hình thức, cấu tạo khác nhau, khả năng tháo qua PKW sẽ khác nhau đáng kể.

- Khi tràn chảy đầy phím, $H_0/W_0 > 0,5$, hiệu quả tháo dọc theo tường bên của phím giảm dần do bị hạn chế bởi dòng chảy đầy phím ra. Dòng chảy qua tường bên giảm dần phương xiên và trở thành song song với phím. Đặc điểm đường mặt nước trên toàn mặt ngang các phím là tương tự nhau và theo phương dọc dòng chảy, đường mặt nước đồng nhất, hạ thấp dần từ thượng lưu về hạ lưu cho thấy tràn piano làm việc như tràn thực dụng có chiều rộng thoát nước bằng chiều rộng các phím, $W = \sum(W_i + W_0) = (2,2 \div 2,5) \sum W_0$. Do đó, ảnh hưởng tới Q của W so với H là không đáng kể, hay khả năng tháo của các PKW cấu tạo khác nhau là không đáng kể. Khi tràn có cột nước $H/W_0 > 2,0$, cấu tạo hình học tràn hầu như không ảnh hưởng tới khả năng tháo.

+ Về ảnh hưởng của mực nước hạ lưu:

- Khi mực nước hạ lưu thấp hơn ngưỡng tràn, $h_n/H_n < -0,2$, dòng chảy qua tràn là tự do hoàn toàn, hình dạng dòng chảy, mực nước thượng lưu và lưu lượng qua tràn là không đổi.

- Khi mực nước hạ lưu cao hơn ngưỡng tràn, $h_n/H_n > 0$, dòng qua tràn là chảy ngập, lưu tốc và dòng lượn sóng qua PKW giảm, khả năng tháo qua tràn giảm so với tràn tự do.

- Trong khoảng mực nước hạ lưu xấp xỉ ngưỡng tràn, $-0,2 < h_n/H \leq 0$, làn nước qua PKW bị ảnh hưởng vòng nhẹ lên, làm tăng mực nước thượng lưu, giảm khả năng tháo qua tràn, tạo nên ranh giới chảy ngập hay vùng quá độ từ chảy tự do sang chảy ngập.

Hiện tượng làn nước qua tràn vòng nhẹ khi $h_n/H \leq 0$ là do phía dưới làn nước cuối phím vào luôn tồn tại khu xoáy cuộn và chân không như một mặt tràn mềm có khả năng biến dạng. Khi mực nước hạ lưu tăng đến một mức nào đó ($h_n/H > -0,2$), dòng chảy hạ lưu ép luồng nước rơi về phía tràn. Khu xoáy cuộn và chân không bị ép lại, làm giảm tác dụng hút của chân không hay bọt khí dưới gầm phím bị ép lại đạt áp suất cao hơn áp suất khí trời, làm làn nước qua PKW vòng

lên, ảnh hưởng tăng mực nước thượng lưu, làm giảm hệ số khả năng tháo. PKW làm việc như đập tràn thực dụng có chân không.

Như vậy, dòng chảy qua tràn piano qua các trạng thái: khi $h_n/H_n \leq -0,2$ là chảy tự do hoàn toàn; khi $h_n/H_n > 0$ là chảy ngập hoàn toàn và $-0,2 < h_n/H_n \leq 0$ là ranh giới chuyển đổi trạng thái giữa chảy tự do hoàn toàn và chảy ngập hoàn toàn.

3.3 XÂY DỰNG CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

Công thức thực nghiệm xác định khả năng tháo qua tràn piano được xây dựng tương ứng với các trạng thái chảy có ranh giới như đã xác định trong mục 3.2.

3.3.1 Điều kiện, các trường hợp xây dựng công thức

Từ phương pháp và các dạng công thức trình bày trong mục 1.3.1, luận án thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano theo dạng tràn truyền thống, khi có kể tới ảnh hưởng của mực nước và đáy kênh hạ lưu:

$$Q = m \cdot k_H \cdot \sigma_n \cdot L \cdot \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} = k_H \cdot \sigma_n \cdot m \cdot N \cdot W \cdot \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} = k_H \cdot \sigma_n \cdot C_{d0} \cdot W \cdot \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4)$$

Với $C_{d0} = m \cdot N$ là hệ số tháo của tràn piano khi không bị ảnh hưởng bởi mực nước và điều kiện hạ lưu; $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$; v_0 xác định tại vị trí thượng lưu tràn, cách đường tràn từ 3÷5 lần cột nước H.

Xác định khả năng tháo qua tràn là xác định hệ số tháo trong điều kiện PKW chảy tự do, không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu; mở rộng công thức khi có ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu và chảy ngập. Tràn PKW chảy ngập là khi thỏa mãn điều kiện như trình bày trong mục 0.

Xây dựng và kiểm nghiệm công thức xác định hệ số tháo cho tràn piano chảy tự do, không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu, với 02 bộ số liệu:

(1). Xây dựng công thức từ **bộ số liệu độc lập của luận án**. Kiểm nghiệm với các nghiên cứu khác cho tràn có đơn vị tràn tiêu chuẩn. So sánh đánh giá với tràn phi chuẩn.

(2). Xây dựng công thức từ **bộ số liệu kết hợp** gồm một phần số liệu của luận án và một phần số liệu của các tác giả khác. Kiểm nghiệm với bộ số liệu còn lại sau xây dựng với PKW tiêu chuẩn. So sánh đánh giá với PKW phi chuẩn. Chi tiết trình bày trong Bảng 3.4.

Việc phân chia, tổng hợp số liệu trong tập xây dựng và tập kiểm định đảm bảo phù hợp được trình bày chi tiết trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4 Các bộ số liệu để xây dựng và kiểm nghiệm công thức

| Tác giả | q (m^2/s) | H_0/P | H_0/W_0 | P/W_u | B/P | W_i/W_0 | N | Loại trần |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| A | Bộ số liệu độc lập của luận án | | | | | | | |
| <i>I</i> | <i>Tập xây dựng</i> | | | | | | | |
| Luận án | 0,03÷ 0,32 | 0,17÷ 2,09 | 0,31÷ 2,08 | 0,44÷ 1,07 | 1,87÷ 4,52 | 1,25 | 5,0 | A |
| <i>II</i> | <i>Tập kiểm định, so sánh</i> | | | | | | | |
| N.T.Hai và cs (2015) | 0,03÷ 0,31 | 0,13÷ 2,15 | 0,23÷ 3,16 | 0,29÷ 2,4 | 1,50÷ 4,50 | 1,20 | 3,3÷ 8,2 | A, B |
| Machiels (2014) | 0,04÷ 0,41 | 0,06÷ 2,29 | 0,26÷ 2,45 | 0,33÷ 2,00 | 1,00÷ 6,00 | 1,50 | 5,0 | A |
| A.Noui & A.Ouamane (2011) | 0,03÷ 0,17 | 0,15÷ 0,95 | 0,26÷ 2,05 | 0,90 | 2,73 | 0,96÷ 1,53 | 5,9 | A, B |
| Kabiri và cs (2011) | 0,05÷ 0,20 | 0,13÷ 0,56 | 0,16÷ 1,87 | 0,63÷ 1,79 | 2,00 | 0,33÷ 1,67 | 3,5÷ 8,1 | A |
| B | Bộ số liệu kết hợp | | | | | | | |
| <i>I</i> | <i>Tập xây dựng</i> | | | | | | | |
| Luận án | 0,03÷ 0,32 | 0,17÷ 2,09 | 0,31÷ 2,08 | 0,44÷ 1,07 | 1,87÷ 4,52 | 1,25 | 5,0 | A |
| N.T.Hai và cs (2015)* | 0,05÷ 0,28 | 0,20÷ 1,57 | 0,33÷ 1,92 | 0,56÷ 0,76 | 2,18÷ 3,00 | 1,20 | 4,3 | A |
| O.Machiels (2014) | 0,06÷ 0,41 | 0,10÷ 0,99 | 0,34÷ 1,98 | 0,80÷ 1,33 | 1,50÷ 2,50 | 1,50 | 5,0 | A |
| A.Noui & A.Ouamane (2011) | 0,09÷ 0,17 | 0,49÷ 0,95 | 0,97÷ 1,87 | 0,90 | 2,73 | 1,20 | 5,9 | A |

| Tác giả | q (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ / W ₀ | P/W _u | B/P | W _i / W ₀ | N | Loại trần |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------|---------------|------------------------------------|-------------|--------------|
| <i>II</i> | <i>Tập kiểm định, so sánh</i> | | | | | | | |
| Luận án | 0,04÷ 0,30 | 0,21÷ 2,04 | 0,33÷ 2,03 | 0,44÷ 1,07 | 1,87÷ 4,52 | 1,25 | 5,0 | A |
| N.T.Hai và cs (2015) | 0,03÷ 0,31 | 0,13÷ 2,15 | 0,23÷ 3,16 | 0,29÷ 2,4 | 1,50÷ 4,50 | 1,20 | 3,3÷ 8,2 | A,B |
| O.Machiels (2014) | 0,04÷ 0,41 | 0,06÷ 2,68 | 0,26÷ 2,45 | 0,33÷ 2,00 | 1,00÷ 6,00 | 1,50 | 5,0 | A |
| A.Noui & A.Ouamane (2011) | 0,05÷ 0,17 | 0,15÷ 0,95 | 0,26÷ 2,05 | 0,90 | 2,73 | 0,96÷ 1,53 | 5,9 | A,B |
| Kabiri và cs (2011) | 0,05÷ 0,20 | 0,13÷ 0,56 | 0,16÷ 1,87 | 0,63÷ 1,79 | 2,00 | 0,33÷ 1,67 | 3,5÷ 8,1 | A |

*. Các giá trị có cột nước tràn trên mô hình nhỏ hơn 3cm đã được loại bỏ do bị ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài.

3.3.2 Công thức xác định khả năng tháo khi tràn chảy tự do

Từ (3.4), xác định khả năng tháo qua tràn PKW chảy tự do theo công thức:

$$Q = k_H \cdot C_{d0} \cdot W \cdot \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (3.5)$$

Trong đó, nghiên cứu xác định hệ số tháo C_{d0} khi tràn chảy tự do, không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu. Mở rộng công thức, xác định hệ số ảnh hưởng bởi địa hình k_H khi tràn chảy tự do có ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu.

3.3.2.1 Khi khả năng tháo không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu

Theo (2.31), khi khả năng tháo qua tràn piano không bị ảnh hưởng bởi mực nước và điều kiện lòng dẫn hạ lưu, hệ số tháo $C_{d0} = C_d$, là hàm của các biến H_0/P , H_0/W_u , H_0/L_u

$$C_{d0} = f(H_0/P, H_0/W_u, H_0/L_u) \quad (3.6)$$

Dựa vào phân tích đặc trưng dòng chảy trình bày trong mục 3.1 và ranh giới trạng thái chảy trong mục 3.2, ở đây xác định công thức thực nghiệm về khả năng tháo (3.6) cho hai trạng thái đầy và không đầy phím ra:

1. Với trạng thái chảy không đầy phím ra ($H_0/W_0 \leq 0,5$), khả năng tháo qua tràn phụ thuộc chủ yếu vào chiều dài ngưỡng tràn, C_{d0} có dạng tương tự như của đập tràn thành mỏng chảy tự do. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng khả năng

tháo của tràn thành mỏng được xác định theo dạng hàm đa thức tuyến tính của các đại lượng H_0 , chiều cao tràn P . Đối với PKW còn có thêm ảnh hưởng của chiều dài đường tràn L_u , do vậy công thức (3.6) và được viết thành:

$$C_{d0} = a + b \cdot \frac{H_0}{P} + c \cdot \frac{H_0}{L_u} \quad (3.7)$$

2. Với trạng thái chảy đầy phím ra ($H_0/W_0 > 0,5$), C_{d0} là hàm theo các biến H_0/P , H_0/W_u , H_0/L_u . Tuy nhiên tham số L_u không ảnh hưởng nhiều đến hệ số tháo qua PKW như phân tích trong mục 3.2.4. Do vậy xác định dạng hàm C_d theo hai tham số chính là H_0/P , H_0/W_u .

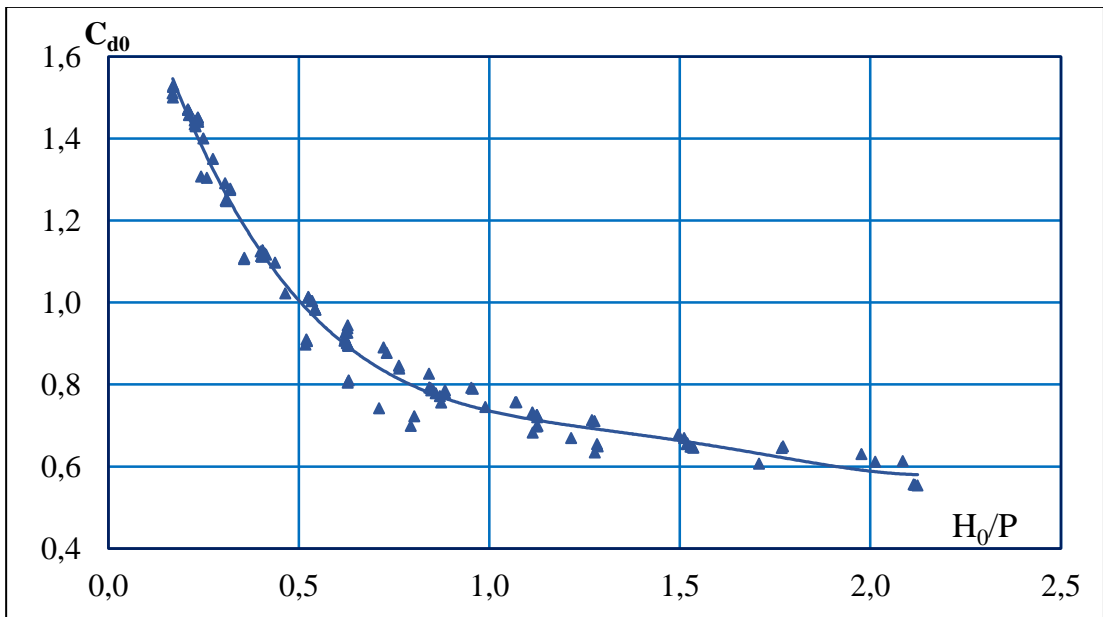
Để lựa chọn công thức phù hợp, các dạng đa thức tuyến tính, phi tuyến hoặc hàm mũ được sử dụng và tuyến tính hóa bởi toán học giải tích.

Các hệ số của công thức thực nghiệm được xác định theo phương pháp phân tích hồi quy tuyến tính, cực tiểu bình phương sai số.

Phân tích tương quan giữa C_{d0} và tỷ lệ cột nước H_0/P như Hình 3.26, khảo sát và thử nghiệm cho thấy dạng hàm mũ cho kết quả tốt nhất. Chi tiết kết quả tính toán khảo sát các dạng hàm trình bày trong phụ lục 3.

Theo đó, hệ số tháo C_{d0} là hàm tương quan biểu thị trong (3.8):

$$C_{d0} = a_0 \left(\frac{H_0}{P} \right)^{a_1} \left(\frac{H_0}{W_u} \right)^{a_2} \quad (3.8)$$



Hình 3.26 Quan hệ $C_{d0} \sim H_0/P$ theo số liệu thí nghiệm

Các hệ số của hàm thực nghiệm (3.7), (3.8), xây dựng theo 02 bộ số liệu gồm bộ số liệu độc lập của luận án và bộ số liệu kết hợp, chi tiết như trong Bảng 3.5.

Kết quả trên Bảng 3.5 cho thấy các công thức thực nghiệm thiết lập có tương quan rất tốt. Hệ số tương quan đạt $R=0,952\div 0,988$. Sai số chuẩn đạt $S=0,023\div 0,080$. Hệ số kiểm định Sig.F rất nhỏ, đạt $5E^{-12}$, nhỏ hơn nhiều so mức ý nghĩa 0,05 nên công thức được chấp nhận.

Bảng 3.5 Hệ số hàm thực nghiệm theo 02 bộ số liệu xây dựng công thức

| TT | Bộ số liệu xây dựng | Dạng công thức | Hệ số của hàm thực nghiệm | | | Tham số tương quan | | Hệ số kiểm định |
|----|---------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------|-------|-----------------|
| | | | a ₀ | a ₁ | a ₂ | R | S | Sig.F |
| 1 | Luận án | (3.7) | 1,885 | -1,768 | -1,215 | 0,988 | 0,023 | 2E-17 |
| 2 | | (3.8) | 0,705 | -0,306 | -0,150 | 0,985 | 0,029 | 2,7E-33 |
| 3 | Kết hợp | (3.7) | 2,016 | -1,868 | -2,214 | 0,952 | 0,080 | 5E-12 |
| 4 | | (3.8) | 0,711 | -0,326 | -0,140 | 0,982 | 0,049 | 9,3E-24 |

So sánh độ sai lệch khi tính theo công thức (3.7), (3.8) với số liệu xây dựng và số liệu kiểm định thể hiện trong Bảng 3.6. Sai số (%) = $(q_{TT}-q_{TN})/q_{TN}$ %.

Bảng 3.6 Sai số (%) khi tính khả năng tháo theo công thức so với số liệu thực nghiệm của tập xây dựng và tập kiểm định

| TT | Số liệu thực nghiệm / Công thức | Sai số (%) | Tập XD | Tập kiểm định | | | |
|----|---|------------|--------|---------------|-------|------|------|
| | | | | Luận án | [4] | [41] | [43] |
| I | Bộ số liệu độc lập của luận án | | | | | | |
| 1 | (3.7) | Tb | 1,2 | | 4,0 | 5,5 | 6,9 |
| | | max | 1,5 | | 7,2 | 9,7 | 8,5 |
| | | min | -4,6 | | -6,2 | -3,3 | 5,2 |
| 2 | (3.8) | Tb | 2,9 | | 5,9 | 4,4 | 3,0 |
| | | max | 7,4 | | 12,6 | 9,0 | 6,1 |
| | | min | -7,3 | | -10,5 | -0,2 | 0,7 |
| | <i>Giá trị sai số trung bình lớn nhất</i> | | 2,9 | | 5,9 | 5,5 | 6,9 |
| | <i>Giá trị sai số tuyệt đối lớn nhất</i> | | 7,4 | | 12,6 | 9,7 | 8,5 |

| TT | Số liệu thực nghiệm /Công thức | Sai số (%) | Tập XD | Tập kiểm định | | | |
|----|---|---------------|-----------|---------------|-------|------|------|
| | | | | Luận án | [4] | [41] | [43] |
| II | Bộ số liệu kết hợp | | | | | | |
| 1 | (3.7) | Tb | 4,3 | 5 | 6,1 | 3,2 | 4,5 |
| | | max | 5,9 | -4 | 4,0 | 7,8 | 7,1 |
| | | min | -6,8 | -6,2 | -10,5 | -9,1 | 1,9 |
| 3 | (3.8) | Tb | 3,7 | 2,6 | 5,8 | 3,6 | 1,9 |
| | | max | 8,7 | 2,6 | 12,0 | 7,8 | 4,6 |
| | | min | -8 | -7,8 | -10,5 | -1,4 | -0,3 |
| | <i>Giá trị sai số trung bình lớn nhất</i> | | 4,3 | 5,0 | 6,1 | 3,6 | 4,5 |
| | <i>Giá trị sai số tuyệt đối lớn nhất</i> | | 8,7 | 7,8 | 12,0 | 9,1 | 7,1 |

So sánh giữa kết quả tính theo công thức và số liệu thực nghiệm với 2 bộ số liệu xây dựng cho thấy: sai số trung bình và sai số tuyệt đối lớn nhất tương ứng của tập xây dựng và tập kiểm định khi xây dựng theo số liệu luận án là: 2,9%, 7,4% và 6,9%, 12,6%; tương ứng theo bộ số liệu kết hợp là 4,3%, 8,7% và 6,1%, 12,0%.

Như vậy sai số giữa kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm của tập xây dựng và tập kiểm nghiệm theo bộ số liệu độc lập và số liệu kết hợp là tương tự nhau. Sai số trung bình của tập xây dựng là nhỏ, dưới 5%, sai số tuyệt đối lớn nhất từ 7÷8%. Sai số trung bình của tập kiểm nghiệm đạt 6÷7% và sai số tuyệt đối lớn nhất đạt 12,6%.

Mặc dù công thức của luận án được thiết lập từ bộ số liệu có $N=5$ nhưng kết quả tính theo công thức so với số liệu thực nghiệm của các tác giả khác cho sai số nhỏ là bởi công thức đã thiết lập theo vùng trạng thái chảy đặc trưng của tràn piano, phản ánh rõ rệt ảnh hưởng của yếu tố chiều dài ngưỡng tràn L tới khả năng tháo khi tràn làm việc với cột nước nhỏ. Do đó, phạm vi phù hợp của công thức được mở rộng cho PKW có $N=4÷6$. Công thức xây dựng từ bộ số liệu độc lập của luận án đảm bảo phù hợp để xác định khả năng tháo cho tràn piano có đơn vị tràn tiêu chuẩn.

Luận án sử dụng các công thức xây dựng từ bộ số liệu độc lập để tiếp tục tính toán trong các bước tiếp theo.

Thay các hệ số từ Bảng 3.5 vào công thức (3.7), (3.8) thu được công thức thực nghiệm xác định hệ số tháo C_{d0} và lưu lượng Q tương ứng từ (3.9) đến (3.11):

$$Q = C_{d0} \cdot W \cdot \sqrt{2gH_0^{3/2}} \text{ hay } q = C_{d0} \cdot \sqrt{2gH_0^{3/2}} \quad (3.9)$$

Trong đó:

$$\text{- Khi } H_0/W_o \leq 0,5, C_{d0} = 1,885 - 1,768 \cdot \frac{H_0}{P} - 1,215 \cdot \frac{H_0}{L_u} \quad (3.10)$$

$$\text{- Khi } H_0/W_o > 0,5, C_{d0} = 0,705 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{-0,306} \left(\frac{H_0}{W_u}\right)^{-0,150} \quad (3.11)$$

Ở đây, với cấu tạo hình học của PKW tiêu chuẩn. Ta có:

$$P/W_u = 0,5 \div 1,3; W_i/W_o = 1,2 \div 1,5; \text{ hay } P/W_u = P/(2,2 \div 2,5)W_o = 0,5 \div 1,3$$

$$\rightarrow W_o = P/(1,1 \div 3,3)$$

$$\rightarrow \text{với } H_0/W_o \leq 0,5 \leftrightarrow H_0/P \leq (0,45 \div 0,15).$$

$$\text{Tương tự, } L_u = N \cdot W_u = (4 \div 6)W_u = (4 \div 6) \times (2,2 \div 2,5)W_o$$

$$\rightarrow H_0/L_u = H_0/((8,8 \div 15)W_o)$$

$$\rightarrow \text{với } H_0/W_o \leq 0,5 \leftrightarrow H_0/L_u \leq (0,06 \div 0,03).$$

3.3.2.2 Khi khả năng tháo có ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu

Khi khả năng tháo qua tràn piano chảy tự do có ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu, hệ số tháo qua tràn được điều chỉnh bởi hệ số địa hình k_H .

Để xác định k_H , theo (2.30) và (3.5), ta có:

$$C_d = f \left[\frac{H_0}{P}, \frac{H_0}{P_H}, \frac{H_0}{W_u}, \frac{H_0}{L_u} \right] = f \left[\frac{H_0}{P_H}, C_{d0} \right] = k_H \cdot C_{d0} \text{ hay } k_H = f \left[\frac{H_0}{P_H} \right]. \quad (3.12)$$

Phân tích số liệu thí nghiệm, sử dụng hàm hồi quy tuyến tính, lập được công thức xác định hệ số ảnh hưởng bởi cao trình đáy kênh hạ lưu, biểu thị mức độ ảnh hưởng giảm khả năng tháo qua tràn piano là:

$$\text{Khi } H_0/P_H < 0,7: k_H = 1,0;$$

$$\text{Khi } H_0/P_H \geq 0,7: k_H = 1,051 - 0,086 \frac{H_0}{P_H} \quad (3.13)$$

3.3.3 Công thức xác định khả năng tháo khi tràn chảy ngập

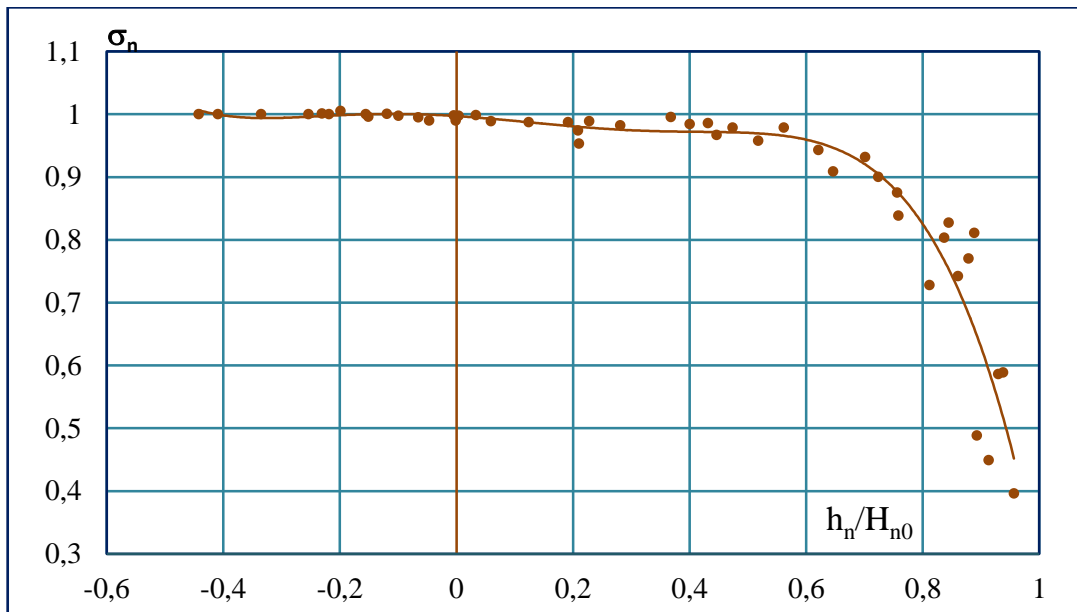
Lưu lượng tháo qua PKW chảy ngập được xác định gián tiếp thông qua lưu lượng tháo qua PKW chảy tự do Q_{TD} và hệ số ngập σ_n , theo công thức:

$$Q_n = \sigma_n \cdot Q_{TD} \quad (3.14)$$

Trong đó: Lưu lượng tháo khi PKW chảy tự do Q_{TD} được xác định theo công thức từ (3.9) đến (3.13);

+ Hệ số ngập σ_n được xác định bằng thực nghiệm với dòng chảy qua tràn là chảy ngập, theo phương pháp trình bày trong mục 2.1.3.

Xây dựng công thức xác định σ_n từ số liệu của luận án. Từ kết quả thí nghiệm, tổng hợp số liệu, phân tích, lập quan hệ giữa các đại lượng hệ số ngập σ_n và tỷ lệ cột nước ngập h_n/H_{n0} , (Hình 3.27, Hình 3.28).



Hình 3.27 Quan hệ giữa hệ số ngập và tỷ lệ cột nước $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$

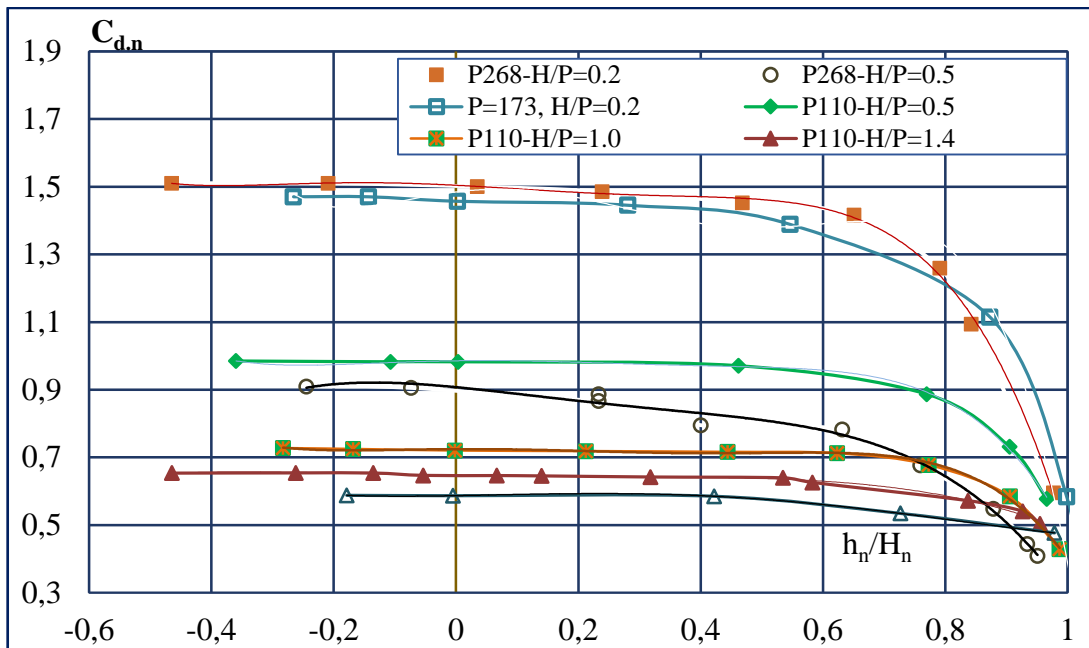
Sử dụng công cụ phân tích hồi quy, cực tiểu bình phương sai số, khảo sát và thử nghiệm cho thấy dạng hàm mũ cho kết quả phù hợp nhất. Luận án thiết lập được công thức xác định hệ số ngập dạng hàm mũ:

$$\sigma_n = 0,974 \left(\frac{Z}{P}\right)^{0,052} \left(1 - \frac{h_n}{H_{n0}}\right)^{0,045} \left(\frac{H_{n0}}{W_u}\right)^{-0,043} \quad (3.15)$$

Công thức thực nghiệm (3.15) có kết quả tương quan giữa các đại lượng là rất tốt, đạt $R=0,883$; $S=0,034$.

Sai số giữa kết quả tính toán theo công thức xây dựng và kết quả thực nghiệm nhỏ, sai số trung bình đạt 3% và sai số tuyệt đối lớn nhất đạt 7%.

Phạm vi phù hợp của công thức $-0,2 < h_n/H_n \leq 0,9$.



Hình 3.28 Quan hệ giữa hệ số tháo $C_{d,n}$ và tỷ lệ cột nước h_n/H_n ứng với các trường hợp P và H_n/P , khi tràn chảy ngập

3.4 ĐÁNH GIÁ SỰ PHÙ HỢP CỦA CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM

3.4.1 Trường hợp chảy tự do

Kiểm nghiệm công thức với hơn 450 số liệu thực nghiệm của 4 nghiên cứu khác nhau về tràn piano chảy tự do cho thấy:

+ Hầu hết các nghiên cứu thực nghiệm với tràn có $H_0/P_H < 0,7$, tức khả năng tháo qua tràn không bị ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu. Riêng nghiên cứu của đề tài cấp Bộ, khả năng tháo qua tràn trong mỗi phương án thí nghiệm (16 phương án) đều có 01 trường hợp bị ảnh hưởng giảm bởi điều kiện hạ lưu. Đó là trường hợp khi thí nghiệm với mực nước thượng lưu lớn nhất ($H_0=5,8m \div 6,5m$). Mức độ ảnh hưởng giảm khả năng tháo nhỏ, đạt $2 \div 3\%$. Điều này cũng minh chứng cho thấy ảnh hưởng của đáy kênh hạ lưu chưa được các nghiên cứu quan tâm.

+ Kiểm định cho PKW tiêu chuẩn, so sánh với PKW phi chuẩn, cho thấy:

Tính theo công thức từ (3.9) đến (3.13) cho kết quả phù hợp về xu hướng, phân bố, cho sai số nhỏ khi so sánh với số liệu thực nghiệm, biểu thị trên Hình 3.29. Sai số trung bình lớn nhất là 2,9% so với tập xây dựng và là 6,9% so với tập kiểm định. Tương tự, sai số tuyệt đối lớn nhất là 7,4% so với tập xây dựng, với tập kiểm định là 12,6%.

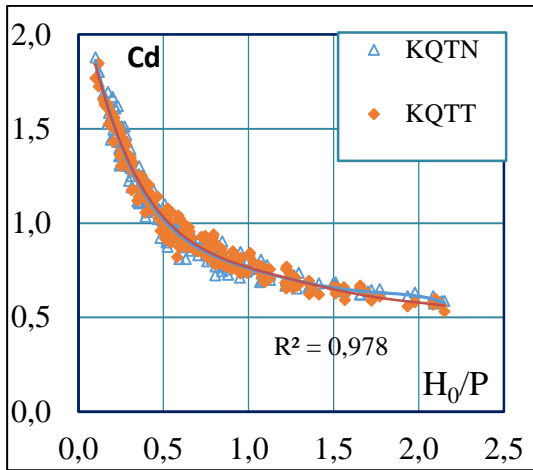
Kết quả so sánh chi tiết thể hiện trên Bảng 3.6, Hình 3.30 và Hình 3.31. Sai số trung bình này là nhỏ, so với sai số của những công thức đã công bố, khi đánh giá với chính tập xây dựng của công thức đó, khoảng từ 10% đến 27%. Do đó công thức của luận án cho sự phù hợp hơn cả.

Ngoài ra công thức được thiết lập, kiểm chứng với miền rộng, đại diện cho PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn, dải giá trị tỷ lệ cột nước rộng $H/P = 0,2 \div 2,5$ đảm bảo bao quát sự biến thiên của hệ số tháo C_d , nên phù hợp khi áp dụng thiết kế cho các công trình trong điều kiện khác nhau.

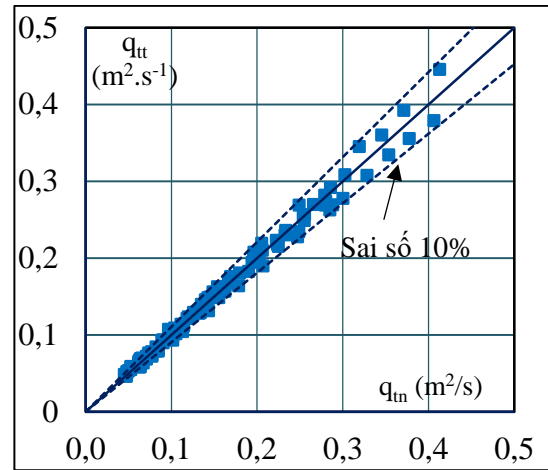
Công thức (3.9) đến (3.11) cũng phù hợp để tính cho PKW loại B với sai số trung bình lớn nhất là 7,2%, sai số tuyệt đối lớn nhất mắc phải là 13,5%, biểu thị trên Hình 3.34. Đó là do hiệu quả tháo của các hình thức tràn chỉ khác nhau rõ rệt với cột nhỏ, khi luận án chia vùng công thức theo trạng thái chảy không đầy và đầy phím ra theo ranh giới $H_0/W_0=0,5$ đã đồng nhất được PKW loại A và loại B theo thông số chiều dài zíc zắc L trong (3.10). Khi cột nước tràn lớn, ảnh hưởng của hình thức PKW loại A và loại B là không đáng kể tới khả năng tháo.

Khi áp dụng công thức tính cho tràn piano phi chuẩn, sai số tuyệt đối lớn nhất mắc phải là 18,6% với tràn có $P/W_u=0,3; 2,0$ hoặc $W_i/W_0=0,33 \div 0,56$. Thậm chí sai số đạt tới 70% khi tính cho PKW có đỉnh tường dạng nhọn, làm việc với cột nước nhỏ $H/P < 0,3$. Kết quả so sánh thể hiện trên Hình 3.32, Hình 3.33.

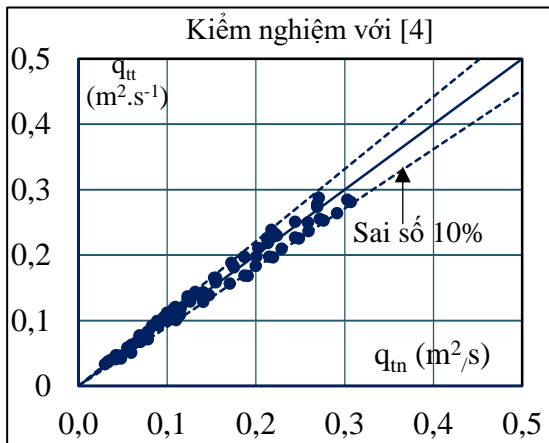
Trong các số liệu thực nghiệm được sử dụng, số liệu có $H < 0,03m$ đã được loại bỏ vì vi phạm điều kiện tương tự mô hình khi xét đến ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài. Đây cũng là nguyên nhân khiến công thức của một số tác giả khác có sai số lớn.



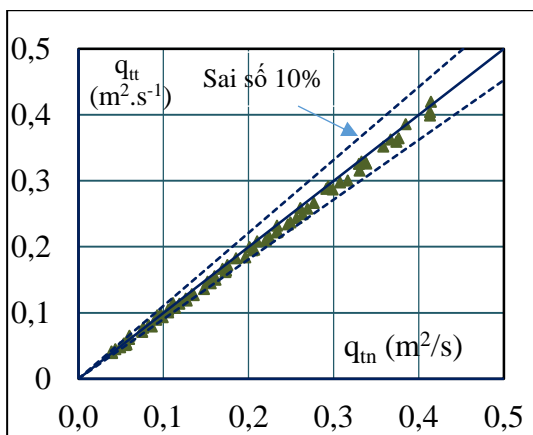
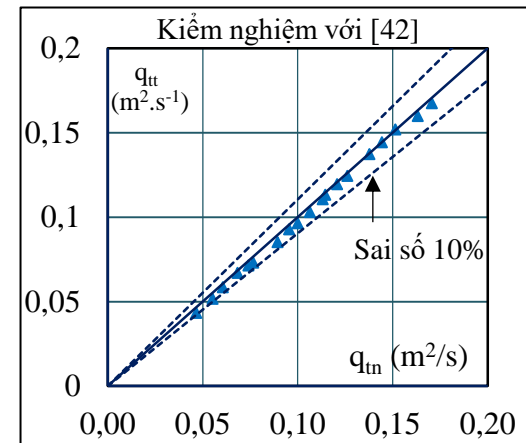
Hình 3.29 So sánh kết quả tính theo (3.10), (3.11) và số liệu thực nghiệm



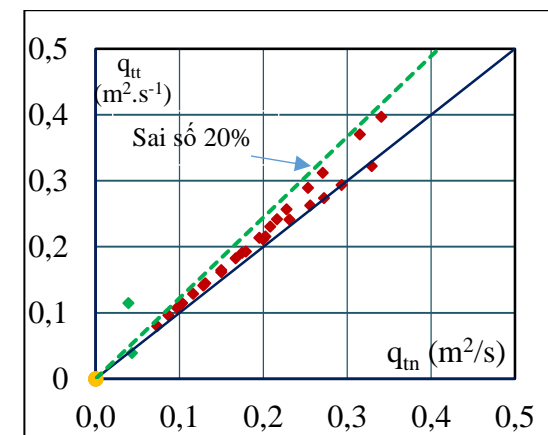
Hình 3.30 So sánh kết quả tính q_{tt} theo (3.9) và số liệu thực nghiệm của luận án, q_{tn}



Hình 3.31 Kết quả tính q_{tt} theo công thức (3.9) và số liệu thực nghiệm của nghiên cứu khác, q_{tn}

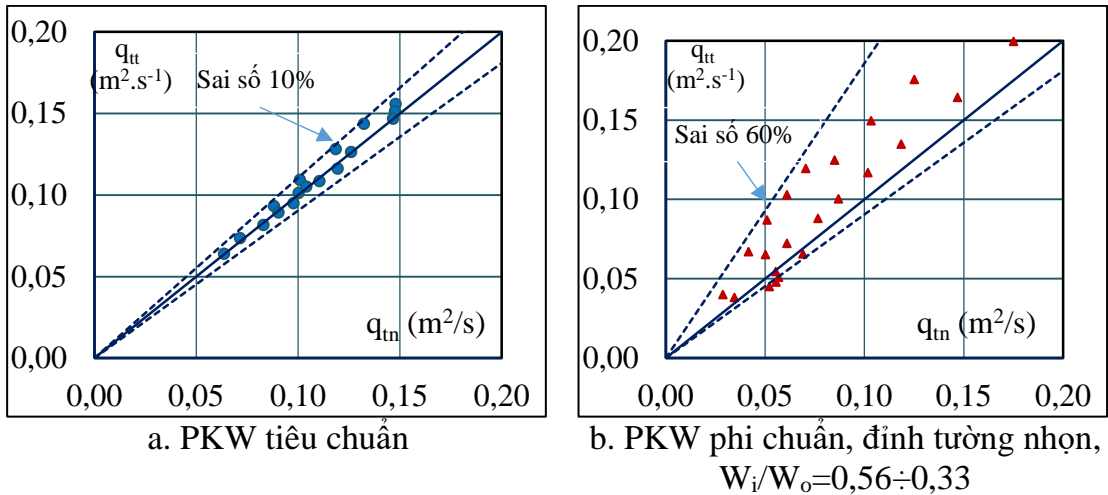


Trần tiêu chuẩn

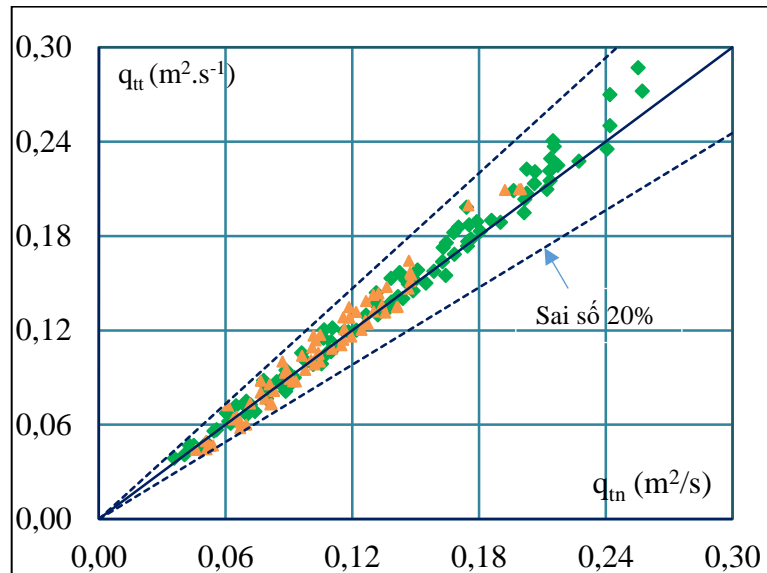


Trần phi chuẩn, $P/W_u=0,3; 2,0$.

Hình 3.32 Kết quả tính q_{tt} theo công thức (3.9) và số liệu thực nghiệm của [41], đường nét đứt sai số 10%



Hình 3.33 So sánh kết quả tính q_{tt} theo (3.9) và số liệu thực nghiệm của [30]



Hình 3.34 So sánh công thức (3.9) và kết quả thực nghiệm của [4], [43] và [30] cho PKW loại B.

Như vậy công thức (3.9) đến (3.11) xác định khả năng tháo qua tràn piano chảy tự do, không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu, có sai số nhỏ, áp dụng tốt cho PKW loại A, loại B có đơn vị tràn tiêu chuẩn, trong điều kiện công trình khác nhau. Công thức đã được kiểm chứng, phù hợp với nghiên cứu khác ở trong và ngoài nước. Do đó công thức của tràn chảy tự do đủ độ tin cậy, chính xác để sử dụng tính toán khả năng tháo khi tràn chảy ngập.

Áp dụng các công thức từ (3.9) đến (3.11) tính khả năng tháo cho PKW, so sánh hiệu quả tháo tăng so với tràn truyền thống thông qua hệ số $r=C_d/m$. Trong đó hệ số lưu lượng của tràn truyền thống xét với $m=0,35; 0,42$ và $0,49$.

Kết quả biểu thị trên Hình 3.35 cho thấy hiệu quả tháo qua tràn piano gấp từ 3 tới 5 lần so với tràn truyền thống ($r=3\div 5$), khi có cùng chiều rộng tràn và với cột nước tràn thấp $H/P\approx 0,2$. Hiệu quả này là do PKW được tăng chiều dài thoát nước gấp N lần so với chiều rộng thoát của tràn thực dụng, $L=N.W$.

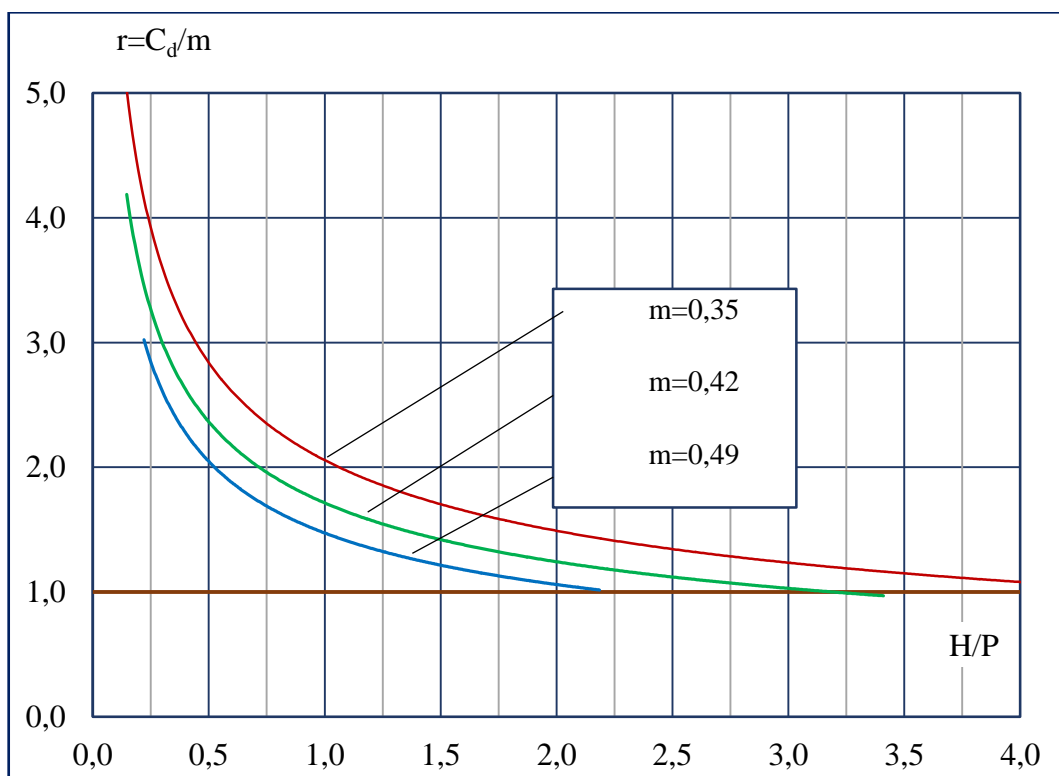
Khi cột nước tràn tăng, hiệu quả tháo giảm dần. Với $H/P=1,0$, r chỉ đạt từ $1,5\div 2,0$ lần.

Khi $H/P\geq 2,0$, tràn piano làm việc như tràn thực dụng, hiệu quả tháo qua đường zic zắc không đáng kể.

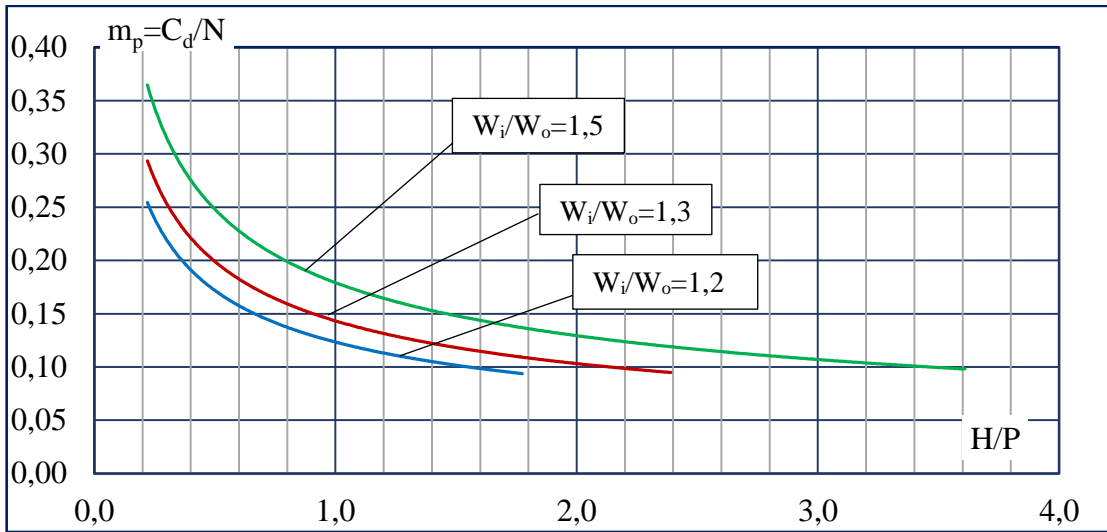
Hình 3.36 biểu thị quan hệ giữa hệ số lưu lượng qua tràn piano và cột nước H/P cho thấy:

Khi làm việc với cột nước thấp, dòng chảy qua PKW như qua đập tràn thành mỏng, với đỉnh tường lượn tròn, hệ số lưu lượng của PKW lớn nhất đạt khoảng $m_p=0,25\div 0,36$ tùy thuộc vào độ rộng phím nước ra hay tỷ lệ W_i/W_o .

Khi cột nước tràn tăng, hệ số lưu lượng của tràn piano giảm nhanh, hiệu quả tháo qua tràn giảm. Coi phân bố lưu lượng đơn vị trên chiều dài đường zic zắc là như nhau, với $H/P=1,0$, hệ số lưu lượng của PKW chỉ đạt $m_p=C_d/N\approx 0,12\div 0,18$.



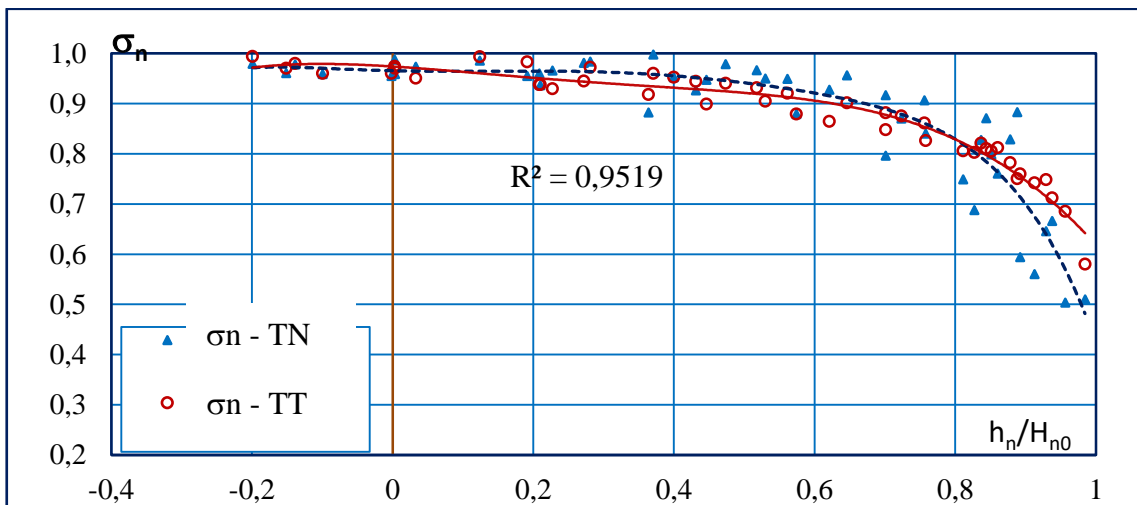
Hình 3.35 Quan hệ $r\sim H/P$ của PKW so với tràn truyền thống



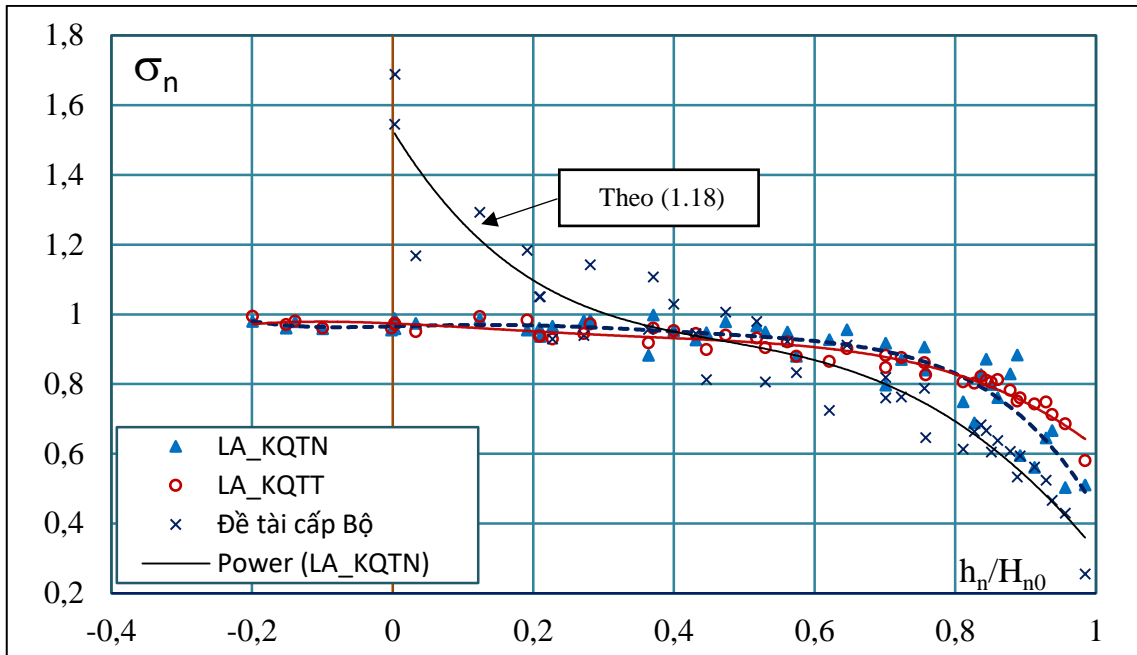
Hình 3.36 Quan hệ $m_p \sim H/P$ của tràn piano

3.4.2 Trường hợp chảy ngập

Xác định lưu lượng tháo qua tràn chảy ngập theo công thức (3.14), trong đó hệ số ngập tính theo công thức (3.15). So sánh kết quả tính theo công thức và kết quả thí nghiệm cho sai số nhỏ. Sai số trung bình lớn nhất mắc phải là 3% và sai số tuyệt đối lớn nhất mắc phải là 7%. Xu hướng phân bố của σ_n trong quan hệ $\sigma_n \sim h_n/H_n$ là phù hợp với quy luật dòng chảy ngập, biểu thị trên Hình 3.37. Khi độ ngập nhỏ, hệ số ngập có giá trị lớn, với h_n/H_n gần về 0, σ_n đạt dần tới giá trị 1,0 và ngược lại. Khi độ ngập lớn, σ_n có giá trị nhỏ, $\sigma_n \approx 0,75$ khi $h_n/H_n=0,9$. Xu hướng này phù hợp hơn kết quả tính σ_n theo công thức (1.18), (1.19) như biểu thị trên Hình 3.38.



Hình 3.37 So sánh kết quả tính hệ số ngập σ_n theo công thức (3.15) và kết quả thí nghiệm của luận án



Hình 3.38 Quan hệ $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$ tính theo công thức (3.15) và (1.18)

3.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

+ Luận án đã xác định đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy trên các phím và dòng chảy nối tiếp hạ lưu tràn piano. Đặc điểm, hình dạng, phân bố lưu tốc, lưu hướng của dòng trên phím nước vào và phím nước ra là khác nhau. Tương ứng, dọc theo các phím, dòng chảy nối tiếp hạ lưu cũng khác nhau rõ rệt gồm nối tiếp dòng mặt, nối tiếp dòng đáy và xoáy quẩn hạ lưu ngay chân công trình, tạo nên những trạng thái chảy đặc thù khác nhiều so với tràn truyền thống.

+ Bằng phân tích lý thuyết và kết quả thực nghiệm, luận án đã xác định được hai trạng thái “chảy không đầy phím ra” và “chảy đầy phím ra” với ranh giới là $H_0/W_0=0,5$; ranh giới ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu là $H_0/P_H=0,7$; ranh giới chế độ chảy tự do hoàn toàn, chảy ngập hoàn toàn và vùng quá độ từ chảy tự do sang chảy ngập là $h_n/H_n=-0,2 \div 0$, cũng như phân tích ảnh hưởng của các trạng thái chảy này tới khả năng tháo.

+ Từ số liệu thực nghiệm, luận án đã thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano khi chảy tự do và chảy ngập cho tràn loại A, $N=5$. Lưu lượng tháo qua PKW tính theo dạng công thức của tràn thực dụng truyền thống, đơn giản, dễ sử dụng. Công thức được kiểm định với tập kiểm định có $N=5$ của luận án và

tập kiểm định gồm hơn 450 số liệu thực nghiệm của các tác giả khác với tràn loại A, loại B, đơn vị tràn tiêu chuẩn, $N=4\div 6$ cho thấy:

- Với tràn chảy tự do: khả năng tháo qua tràn xác định theo các công thức từ (3.9) đến (3.13). So sánh với tập kiểm định của luận án và các tác giả khác cho sai số nhỏ. Sai số trung bình lớn nhất của công thức với tập xây dựng là 2,9%, với tập kiểm định là 6,9%. Sai số tuyệt đối lớn nhất tương ứng là 7,4% và 12,6%. Kết quả kiểm định này cho thấy công thức luận án được xây dựng trên bộ số liệu thí nghiệm với $N=5$ cho tràn loại A, nhưng với việc phân định trạng thái chảy đặc trưng qua tràn nên các công thức từ (3.9) đến (3.13) được kiểm chứng cho thấy phù hợp với các số liệu thực nghiệm của các tác giả khác với tràn tiêu chuẩn. Do vậy phạm vi ứng dụng công thức được mở rộng áp dụng phù hợp cho tràn tiêu chuẩn, cột nước tràn $H_0/P = 0,17\div 2,5$; độ ngập $-0,2 < h_n/H_{n0} \leq 0,9$; Kết cấu tường bên mép lượn tròn. Công thức cũng phù hợp để tính khả năng tháo cho PKW loại B, sai số trung bình lớn nhất là 7,2%.

- Với tràn chảy ngập: hệ số ngập σ_n xác định theo công thức (3.15). So sánh kết quả tính theo công thức và kết quả thực nghiệm cho sai số nhỏ. Sai số trung bình lớn nhất mắc phải là 3%, sai số tuyệt đối lớn nhất mắc phải là 7%. Xu hướng phân bố của σ_n trong quan hệ $\sigma_n \sim h_n/H_n$ là phù hợp với quy luật dòng chảy ngập. Phạm vi phù hợp của công thức $-0,2 < h_n/H_{n0} \leq 0,9$.

Để thuận tiện khi áp dụng các kết quả nghiên cứu này, luận án tính toán cho một số trường hợp tràn piano cụ thể, được trình bày trong chương 4.

Chương 4 LỰA CHỌN KÍCH THƯỚC HỢP LÝ, TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG THÁO CHO CÔNG TRÌNH THỰC TẾ KIỂU PHÍM PIANO

Sử dụng các kết quả chương 3, trong chương này luận án trình bày các bước tính toán, lựa chọn thông số hình học và xác định khả năng tháo qua tràn piano, ứng dụng cho công trình thực tế.

4.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Từ phân tích các ảnh hưởng của đặc trưng hình học tới khả năng tháo, đặc điểm dòng chảy, các kết quả nghiên cứu của luận án cho thấy: để ứng dụng PKW trong thiết kế, cần lựa chọn hình thức tràn và 3 thông số ảnh hưởng chính nhất đến khả năng tháo theo thứ tự: chiều cao tràn, chiều rộng và chiều dài phím, biểu thị bởi các đại lượng không thứ nguyên P/W_u , W_i/W_o và $N=L/W$.

Khảo sát ảnh hưởng của các thông số trong công thức (3.10), (3.11) thể hiện trên Hình 4.1 thấy rằng, khi cột nước tràn nhỏ ($H/W_o < 0,5$), thông số tỷ lệ cột nước và chiều cao tràn H/P chiếm tỷ trọng ảnh hưởng lớn (trên 80%), thông số tỷ lệ cột nước trên chiều dài tràn H/L_u có tỷ trọng ảnh hưởng nhỏ (khoảng 20%). Khi cột nước tràn lớn, $H/W_o > 0,5$, ảnh hưởng của đại lượng H/P và H/W_u là tương tự nhau, ảnh hưởng bởi H/P lớn hơn bởi H/W_u khi H có giá trị nhỏ và ngược lại.

Do đó, ưu tiên lựa chọn thông số hình học PKW theo mức độ ảnh hưởng thứ tự là chiều cao tràn P , chiều rộng tràn W và chiều dài L .

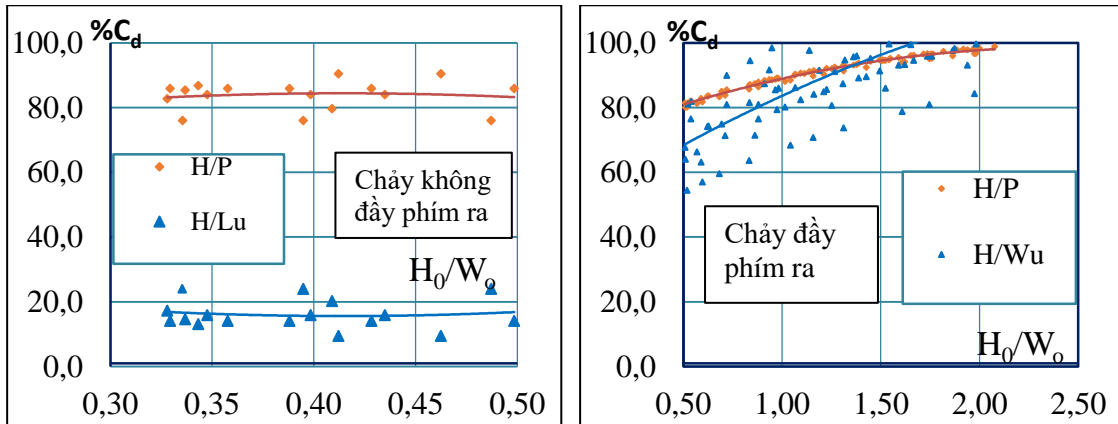
Để tối ưu về khả năng tháo và kinh tế, chọn PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn với tỷ lệ hình học trong phạm vi: $P/W_u = 0,5 \div 1,3$; $W_i/W_o = 1,2 \div 1,5$; $N=L/W = 4 \div 6$; và $S_i = 0,4 \div 0,8$. Chọn chỉ số lớn sẽ thiên về thủy lực và chọn chỉ số nhỏ sẽ thiên về kinh tế.

Thứ tự xác định, sắp xếp các yếu tố hình học có ảnh hưởng giảm dần đến khả năng tháo trong tính toán thiết kế tràn piano là:

- (1): Chọn loại tràn;
- (2): Chọn chiều cao tràn, chiều rộng đơn vị tràn tức theo tỷ lệ P/W_u ;
- (3): Khi có W_u , lựa chọn tỷ lệ W_i/W_o và chiều dày thành bên, T_s ;

(4): Khi có P, chọn chiều dài N, xác định được $L=N*W$ và $B=(L-W)/2$. Khi có B và P dễ dàng xác định được độ dốc hốc phím $S_i, S_o, (S=P/B)$;

(5): Vẽ sơ bộ mặt cắt PKW.



Hình 4.1 Tỷ trọng ảnh hưởng của các thông số trong công thức (3.10), (3.11)

4.2 CÁC BƯỚC TÍNH TOÁN, LỰA CHỌN TRẦN PIANO HỢP LÝ

4.2.1 Lựa chọn hình thức trần piano

Việc khảo sát xác định điều kiện địa hình, địa chất, vị trí đặt tuyến (đối với công trình xây dựng mới) hoặc mức độ của nền móng công trình hiện có (đối với công trình cải tạo, nâng cấp) tuân thủ theo các tiêu chuẩn quy định hiện hành và tương tự như thiết kế, cải tạo đối với đập tràn truyền thống.

Lựa chọn PKW kiểu B (trần bất đối xứng) khi công trình có điều kiện địa chất nền tốt. Loại tràn này cũng hiệu quả hơn nếu áp dụng cho công trình xây mới. Với địa chất kém hơn nên lựa chọn PKW kiểu A hoặc kiểu D nhằm phân bố đều và đối xứng tải trọng, ứng suất cho nền, tăng độ ổn định cho công trình.

4.2.2 Lựa chọn thông số cấu tạo trần piano

Tính toán điều tiết tương tự như tràn truyền thống, xác định được mực nước thượng lưu tràn (Z_{TL}) ứng với các tần suất thiết kế. Cao trình ngưỡng tràn (Z_{ng}) bằng cao trình mực nước dâng bình thường. Cột nước thiết kế tương ứng xác định được: $H=Z_{TL}-Z_{ng}$

Trần piano nên chọn có đơn vị tràn tiêu chuẩn, thứ tự ưu tiên lựa chọn các thông số hình học như trình bày trong mục 4.1.

Chi tiết xác định các thông số hình học và lưu lượng tháo qua PKW gồm:

(1). Chiều cao tràn, chiều cao phím:

Chiều cao tràn piano (P) được tính từ cao trình ngưỡng tràn đến chân tràn (là đỉnh tràn thực dụng có cao trình Z_{ngTD} với công trình hỗn hợp, nâng cấp hoặc là đáy kênh thượng lưu với PKW đặt trực tiếp trên đáy sông), tương ứng $P=Z_{ng}-Z_{ngTD}$ hoặc $P=Z_{ng}-Z_{đkTL}$; Chiều cao tràn tuân theo tỷ lệ $P/W_u=0,5\div 1,3$, lấy giá trị nhỏ sẽ thiên về kinh tế và giá trị lớn thiên về tăng khả năng tháo.

Chiều cao phím P_p được tính từ cao trình ngưỡng tràn tới điểm giao của hai đáy phím vào và phím ra (P_p): $P_p=(0,5\div 0,9)P$.

Chiều cao lớn nhất của phím nước vào (P_i), phím nước ra (P_o), $P_i=P_o=P$.

Nên bố trí đoạn chuyển tiếp thuận dòng chảy ở thượng lưu với công trình cột nước thấp hoặc ở hạ lưu với công trình có đáy kênh hạ lưu nâng cao, khi đó $P_i=P_o<P$.

Tràn piano làm việc hiệu quả hơn khi tỷ lệ cột nước tràn thiết kế và chiều cao tràn $H_{TK}/P<1,0$. Khi $H/P=2,0$ tràn piano làm việc như tràn thực dụng mặt cong.

(2). Xác định chiều rộng đơn vị tràn (đơn nguyên phím)

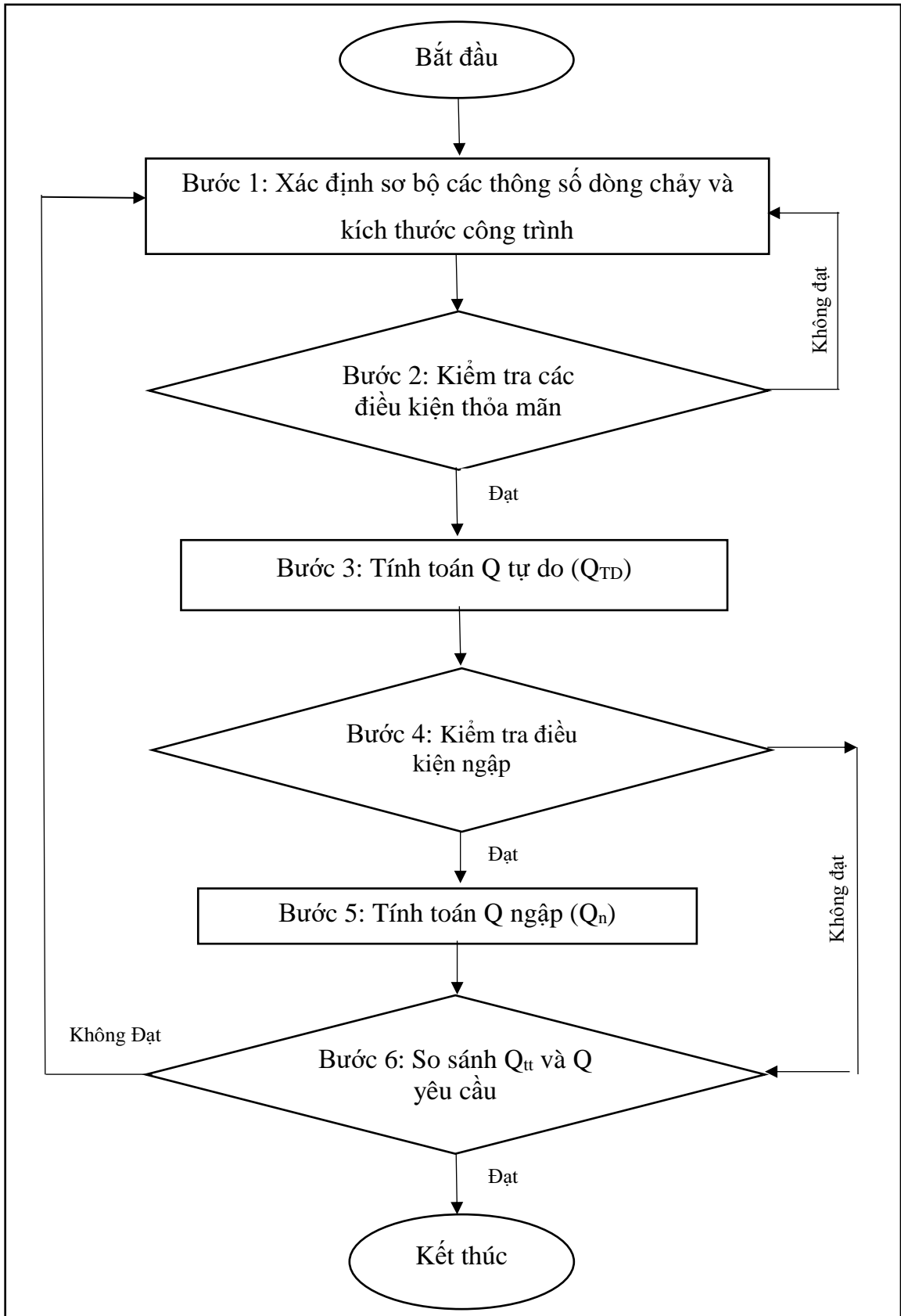
Một đơn vị tràn gồm một khoang phím vào (chiều rộng trong lòng phím W'_i), một khoang phím ra (W'_o) và 2 vách ngăn (T_s). Chiều rộng đơn vị phím là: $W_u=W'_i+W'_o+2T_s$ hay $W_u=W_i+W_o$ (chiều rộng phím tính đến tim tường ngăn).

Chiều rộng phím nước vào $W_i=(0,6\div 2,0)P_p=(0,3\div 1,8)P$; lấy tỷ lệ lớn khi công trình có P nhỏ.

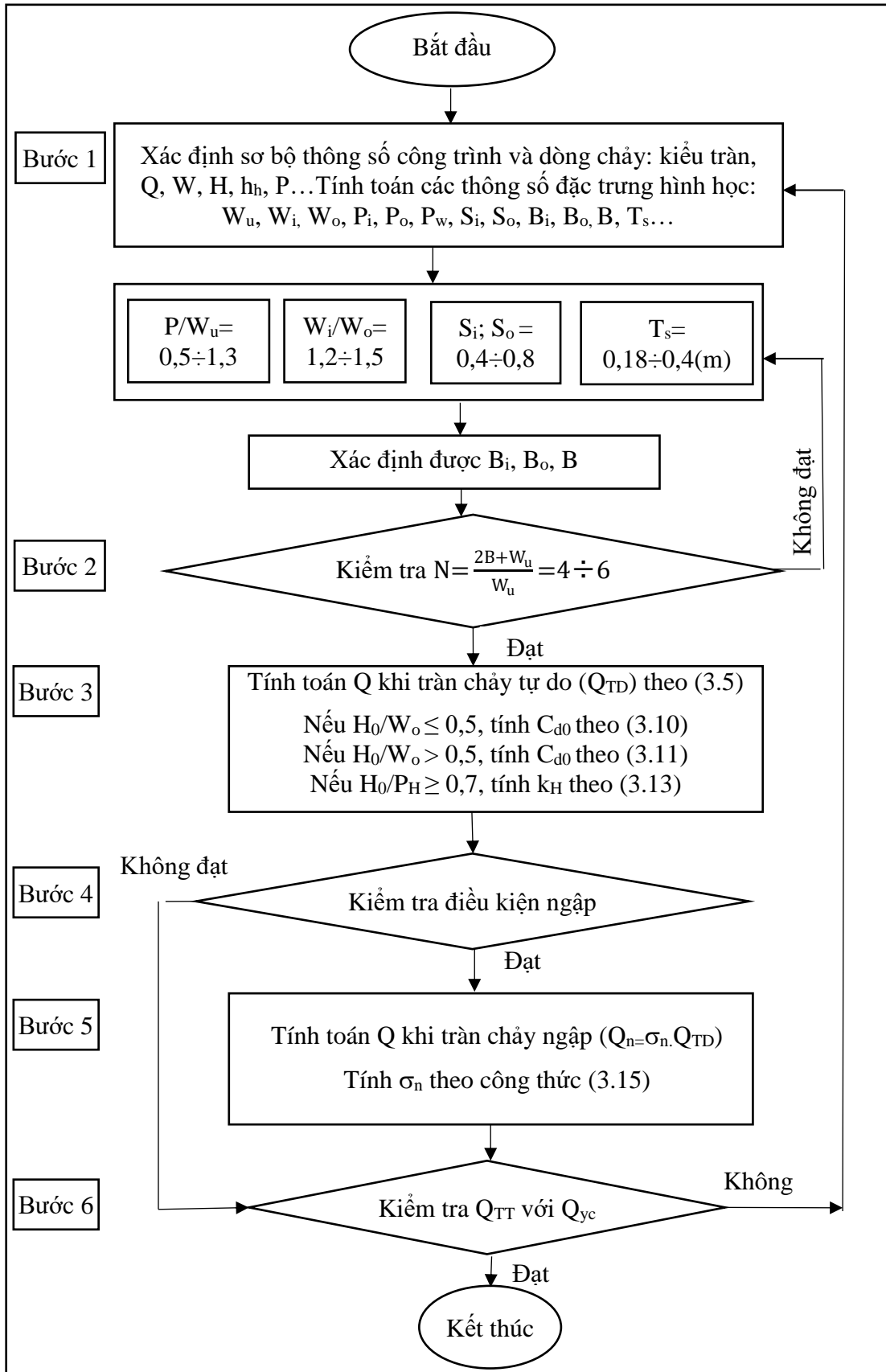
Chiều rộng phím nước vào và phím nước ra (tính tới tim vách ngăn) theo tỷ lệ $W_i/W_o=1,2\div 1,5$.

Chiều rộng phím nước ra W_o không nên nhỏ hơn 1,0m nhằm đảm bảo về hiệu quả tháo và khả năng tháo cây trôi, vật nổi.

Chiều dày vách ngăn khoảng $T_s=0,18\div 0,4$ m tùy theo chiều cao PKW, đảm bảo tính ổn định cho kết cấu và công trình trong quá trình làm việc.



Hình 4.2 Khái quát sơ đồ lựa chọn, tính toán khả năng tháo qua tràn piano



Hình 4.3 Sơ đồ chi tiết lựa chọn, tính toán khả năng tháo qua tràn piano

(3). Xác định chiều dài phím:

Chiều dài phím được xác định: $B = (3 \div 4) \cdot P_p$, lấy chỉ số nhỏ với tràn loại B.
Tối ưu về thủy lực là $B = 3,6 \cdot P_p$;

$B = B_o + B_i + B_c$, trong đó B_i là chiều dài phần nhô ra hạ lưu của phím nước vào, B_o là chiều dài phần nhô ra thượng lưu của phím nước ra và B_c là chiều dài phần đế PKW.

Tràn loại A: $B_i \approx B_o \approx 1/4B$; $B_c \approx 1/2B$.

Tràn loại B: $B_o = 0$; $B_i \approx 1/3B$; $B_c \approx 2/3B$.

Độ dốc đáy phím được xác định liên quan:

Phím nước vào: $S_i = P_i / (B_i + B_c)$; Phím nước ra: $S_o = P_o / (B_i + B_c)$;

Để hiệu quả về thủy lực và kinh tế, độ dốc đáy phím chọn từ 0,4 đến 0,8.
Nếu thiên chọn tối ưu về thủy lực nhưng tốn kém hơn về kinh tế, độ dốc phím từ 1,1 đến 1,2.

Trên đáy phím ra có thể bố trí các bậc để tăng hiệu quả tiêu năng mà không làm ảnh hưởng đến khả năng tháo qua PKW, chiều cao bậc nhỏ hơn $1/2$ chiều cao phím nước ra.

(4). Kiểm tra các tỷ lệ tương quan hình học:

Tỷ lệ chiều cao tràn và chiều rộng đơn vị $P/W_u = 0,5 \div 1,3$;

Tỷ lệ chiều rộng phím $W_i/W_o = 1,2 \div 1,5$;

Tỷ lệ chiều dài tràn $N = L/W = L_u/W_u = (W_u + 2B)/W_u = 4 \div 6$;

Nếu tỷ lệ các đặc trưng hình học không nằm trong phạm vi này, chọn và tính toán lại các thông số cấu tạo PKW theo các bước trên, cụ thể như trình bày trong sơ đồ Hình 4.2, Hình 4.3.

4.2.3 Tính toán xác định khả năng tháo qua tràn piano

4.2.3.1 Trường hợp chảy tự do

(1). Xác định các đại lượng đặc trưng hình học của PKW: H_0/W_o ; H_0/P ; H_0/L_u ;
 H_0/W_u ;

(2). Kiểm tra, so sánh giá trị H_0/W_o :

- Nếu $H_0/W_o \leq 0,5$, xác định hệ số tháo C_d theo công thức (3.10);

- Nếu $H_0/W_0 > 0,5$, xác định hệ số tháo C_d theo công thức (3.11);
- Nếu $H_0/P_H > 0,7$, xác định hệ số địa hình k_H theo công thức (3.13);

Có thể sử dụng hàm IF trong công cụ Excel để tính toán theo cấu trúc:

$$=IF(H_0/W_0 \leq 0,5, \text{ công thức 3.10}, \text{ công thức 3.11})$$

Xác định lưu lượng Q_{TD} qua tràn piano theo công thức (3.5).

4.2.3.2 Trường hợp chảy ngập

Lưu lượng qua tràn khi chảy ngập được xác định theo công thức: $Q_n = \sigma_n \cdot Q_{TD}$

Trong đó: - Q_{TD} được xác định ở mục 4.2.3.1;

- Độ ngập σ_n xác định theo công thức (3.15);

4.3 ỨNG DỤNG CHO CÔNG TRÌNH THỰC TẾ

4.3.1 Ứng dụng trong công trình cột nước thấp, đáy kênh hạ lưu hạ thấp

Tràn xả lũ Xuân Minh là công trình cột nước thấp, được thiết kế theo mẫu là tràn Văn Phong và triển khai thí nghiệm trên mô hình mặt cắt tại đơn vị Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển. Luận án sử dụng số liệu mực nước, lưu lượng của tràn xả lũ Xuân Minh để tính toán ứng dụng, so sánh kết quả tính theo công thức luận án và kết quả kết quả thí nghiệm mô hình của công trình.

4.3.1.1 Giới thiệu và tính toán thông số công trình

Thủy điện Xuân Minh thuộc hệ thống bậc thang thủy điện dòng chính sông Chu, tỉnh Thanh Hoá, cách thủy điện Cửa Đạt 7km hạ lưu, phía trên đập Bái Thượng. Tràn xả lũ được xây dựng gồm hai phần là có cửa van và tràn piano. Phần tràn có cửa van gồm 2 khoang đỉnh rộng, mỗi khoang rộng 10m, điều tiết bằng cửa van phẳng, trụ pin rộng 2,5m, cao trình ngưỡng tràn $\nabla 17,5$ m, cao trình đỉnh cửa van $\nabla 28,0$ m. Phần đập tràn tự do là tràn piano loại B, ở phía phải tràn van phẳng, có cao trình ngưỡng tràn $\nabla 27,5$ m, chiều rộng chính diện tràn Piano là 140m;

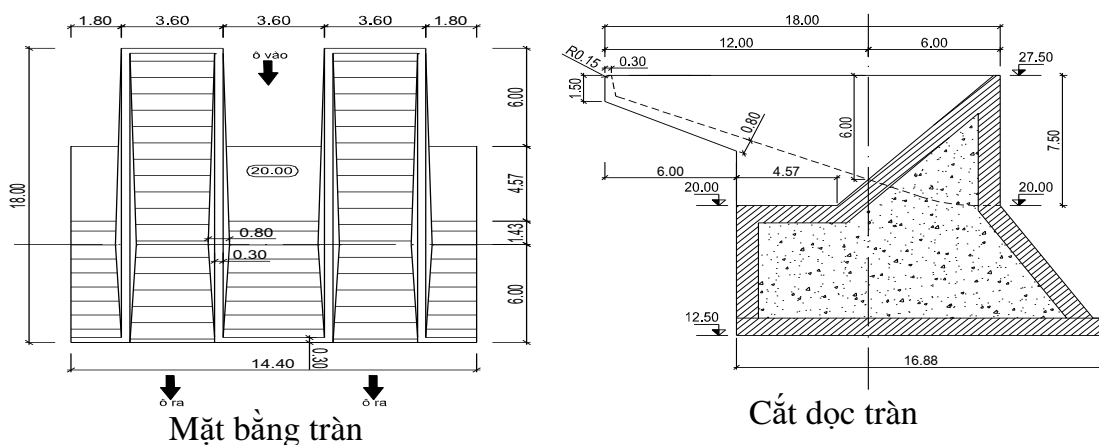
Các thông số về hồ chứa và lưu lượng dòng chảy lũ của công trình: + Lưu lượng dòng chảy lũ ứng với các tần suất: $Q_{0.01\%} = 11831 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{0.1\%} = 8501 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{0.2\%} = 7261 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{0.5\%} = 3815 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{1\%} = 3691 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{5\%} = 3593 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{10\%} = 3553 \text{ m}^3/\text{s}$; + Cao trình mực nước hồ (m): MNDBT +27,5 (m); Mực nước

chết MNC +27,0m; Mức nước lũ kiểm tra $Z_{KT0.01\%} = +35,66\text{m}$; $Z_{KT 0.2\%} = +31,64\text{m}$; $Z_{TK1\%} = +29,19\text{m}$; + Cao trình mực nước hạ lưu $Z_{HL}(\text{m})$: $Z_{HLMAX0.01\%} +32,66\text{M}$; $Z_{HLMIN} = +17,54\text{m}$; Mực nước hạ lưu khi chạy hai tổ máy $Z_{HL} = +18,59\text{m}$.

Tính toán, lựa chọn thông số tràn piano theo các bước được trình bày như mục 4.1; Hình 4.3, được các giá trị trong Bảng 4.1:

Bảng 4.1 Bảng thông số công trình

| Thông số công trình | Thông số tràn (m) | | Tỷ lệ hình học |
|--|-----------------------|------------------------|-----------------|
| $Z_{ng} = 27,5 \text{ m}$ | Loại B | $P_o = 7,5 \text{ m}$ | $W_i/P_p = 0,7$ |
| $Z_{đkTL} = 20 \text{ m}$ | $W_i = 3,9 \text{ m}$ | $S_i = 1,0$ | $W_i/W_o = 1,2$ |
| $P_T = 7,5 \text{ m}$ | $W_o = 3,3 \text{ m}$ | $S_o = 0,5$ | $P/W_u = 1,0$ |
| $W = 140 \text{ m}$ | $W_u = 7,2 \text{ m}$ | $B_i = 0$ | $B/P_p = 3,0$ |
| $H_{TK1\%} = 1,5 \text{ m}$ | $P_p = 6,0 \text{ m}$ | $B_o = 6,0 \text{ m}$ | $N = 6,0$ |
| $H_{KT0,2\%} = 4,0 \text{ m}$ | $P_H = 14,0\text{m}$ | $B = 18,0 \text{ m}$ | |
| $q_{TK} = 15,5 \text{ (m}^2/\text{s)}$ | $P_i = 7,5 \text{ m}$ | $L_u = 43,2 \text{ m}$ | |
| $q_{KT} = 38,9 \text{ (m}^2/\text{s)}$ | | | |



Hình 4.4 Cấu tạo tràn piano của thủy điện Xuân Minh, [13]

4.3.1.2 Tính toán lưu lượng tháo qua tràn Xuân Minh

Tràn xả lũ Xuân Minh được thiết kế, tính toán điều tiết bởi Công ty cổ phần tư vấn xây dựng điện 1 (PECC1) và triển khai thí nghiệm mô hình mặt cắt theo các thông số thực tế của công trình (gọi là kết quả thí nghiệm công trình). Do đó, trong tính toán ứng dụng này, lưu lượng tháo qua tràn Xuân Minh được tính theo công

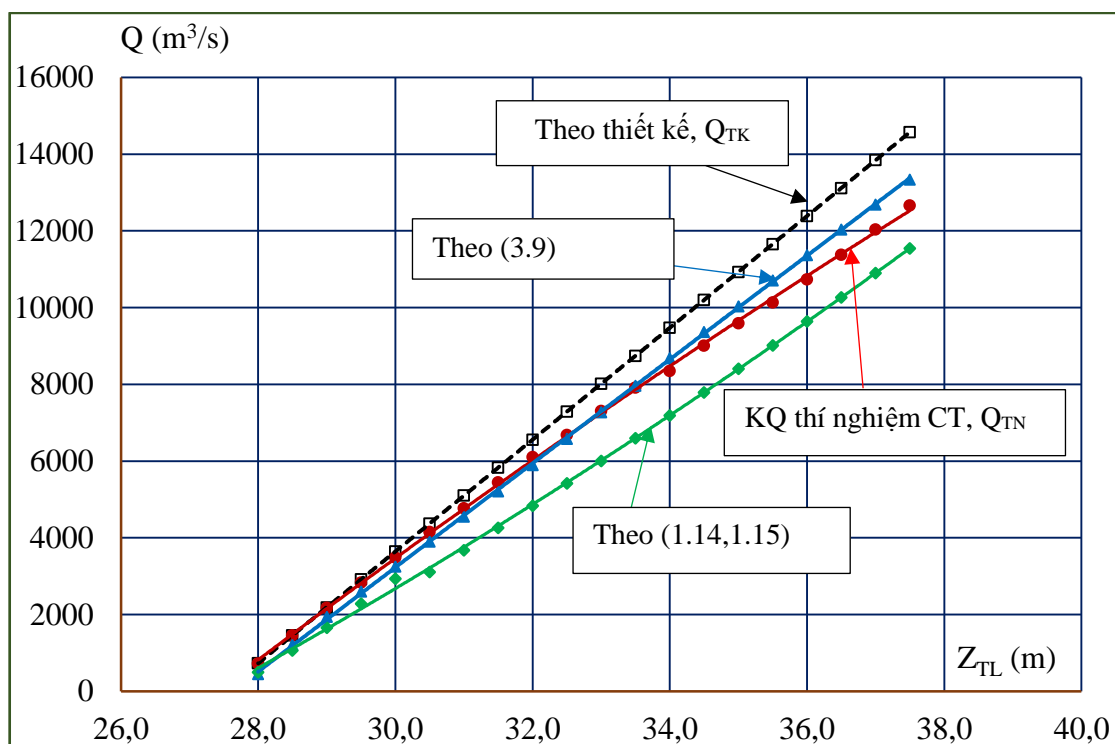
thức của luận án và so sánh với 3 kết quả: một là kết quả thí nghiệm công trình; hai là kết quả tính toán do tư vấn thiết kế tính điều tiết cung cấp (kết quả theo thiết kế); ba là kết quả tính theo công thức cho tràn có mặt cắt tương tự của tác giả khác đã đề cập trong chương 1; Ở đây, kết quả thí nghiệm của dự án Xuân Minh là kết quả tư vấn công trình, được thực hiện độc lập về nhóm nghiên cứu, thời điểm so với các nghiên cứu thực nghiệm của luận án.

Các kết quả thí nghiệm dự án và tính toán khả năng tháo cho tràn chảy tự do, tràn chảy ngập theo các phương pháp trên thể hiện chi tiết trong Bảng 4.2, Bảng 4.3, biểu thị trên Hình 4.5, Hình 4.6.

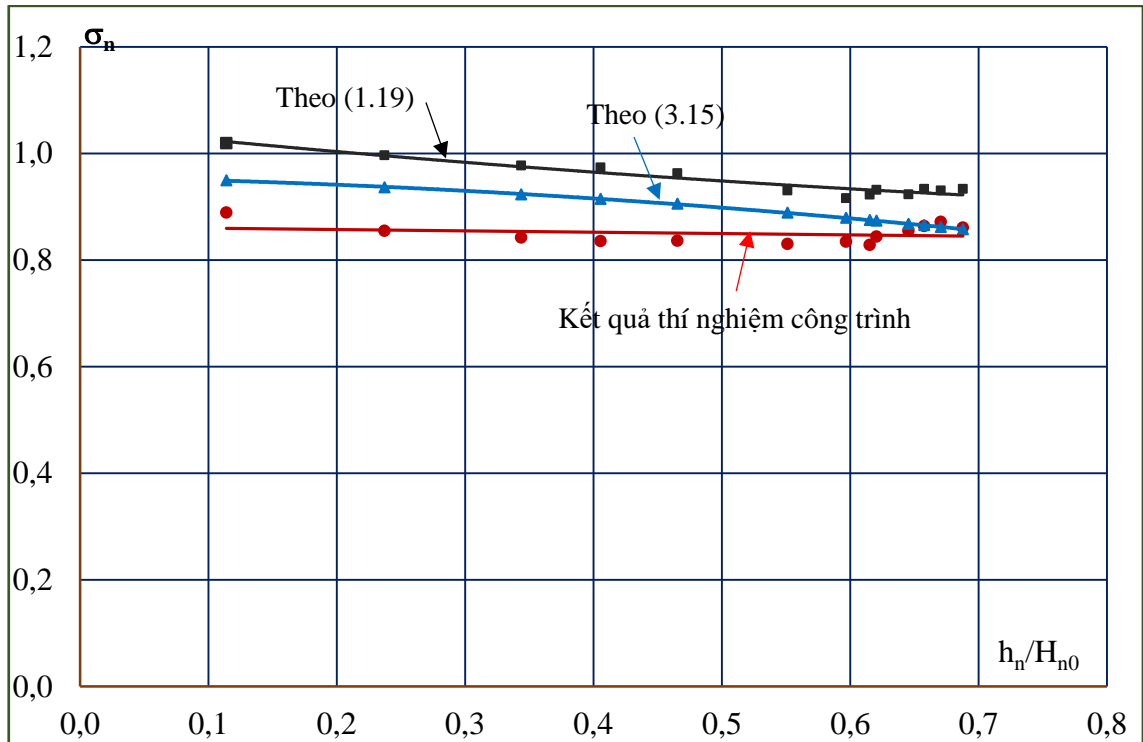
Bảng 4.2 Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua tràn Xuân Minh chảy tự do

| TT | Kết quả thí nghiệm dự án | | | | | Theo (3.9) đến (3.11) | | | Theo (1.14), (1.15) | | |
|----|--------------------------|-----------------------|--|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---------------|---------------------|--|---------------|
| | Z _{TL} (m) | H ₀ (m) | q _{TN} (m ² /s) | H ₀ / W _o | H ₀ / P | C _d | q _{TT} (m ² /s) | Sai số (%) | C _d | q _{TT} (m ² /s) | Sai số (%) |
| 1 | 28,0 | 0,53 | 5,20 | 0,16 | 0,07 | 1,75 | 2,98 | -43% | 2,287 | 3,58 | -31% |
| 2 | 28,5 | 1,10 | 10,39 | 0,33 | 0,15 | 1,59 | 8,15 | -22% | 1,721 | 7,63 | -27% |
| 3 | 29,0 | 1,70 | 15,54 | 0,52 | 0,23 | 1,38 | 13,54 | -13% | 1,453 | 11,83 | -24% |
| 4 | 29,5 | 2,26 | 20,26 | 0,68 | 0,30 | 1,21 | 18,22 | -10% | 1,301 | 16,30 | -20% |
| 5 | 30,0 | 2,80 | 24,89 | 0,85 | 0,37 | 1,10 | 22,79 | -8% | 1,197 | 20,96 | -16% |
| 6 | 30,5 | 3,34 | 29,65 | 1,01 | 0,45 | 1,01 | 27,40 | -8% | 0,964 | 22,19 | -25% |
| 7 | 31,0 | 3,88 | 34,10 | 1,18 | 0,52 | 0,95 | 32,04 | -6% | 0,906 | 26,28 | -23% |
| 8 | 31,5 | 4,42 | 38,89 | 1,34 | 0,59 | 0,89 | 36,71 | -6% | 0,858 | 30,42 | -22% |
| 9 | 32,0 | 4,98 | 43,61 | 1,51 | 0,66 | 0,84 | 41,57 | -5% | 0,817 | 34,54 | -21% |
| 10 | 32,5 | 5,54 | 47,74 | 1,68 | 0,74 | 0,80 | 46,47 | -3% | 0,782 | 38,70 | -19% |
| 11 | 33,0 | 6,10 | 52,21 | 1,85 | 0,81 | 0,77 | 51,38 | -2% | 0,751 | 42,90 | -18% |
| 12 | 33,5 | 6,66 | 56,51 | 2,02 | 0,89 | 0,74 | 56,31 | 0% | 0,724 | 47,13 | -17% |

| TT | Kết quả thí nghiệm dự án | | | | | Theo (3.9) đến (3.11) | | | Theo (1.14), (1.15) | | |
|----|--------------------------|-----------------------|--|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---------------|---------------------|--|---------------|
| | Z _{TL} (m) | H ₀ (m) | q _{TN} (m ² /s) | H ₀ / W _o | H ₀ / P | C _d | q _{TT} (m ² /s) | Sai số (%) | C _d | q _{TT} (m ² /s) | Sai số (%) |
| 13 | 34,0 | 7,24 | 59,64 | 2,19 | 0,97 | 0,71 | 61,44 | 3% | 0,699 | 51,34 | -14% |
| 14 | 34,5 | 7,79 | 64,32 | 2,36 | 1,04 | 0,69 | 66,32 | 3% | 0,678 | 55,66 | -13% |
| 15 | 35,0 | 8,33 | 68,50 | 2,52 | 1,11 | 0,67 | 71,13 | 4% | 0,660 | 60,03 | -12% |
| 16 | 35,5 | 8,87 | 72,36 | 2,69 | 1,18 | 0,65 | 75,95 | 5% | 0,643 | 64,43 | -11% |
| 17 | 36,0 | 9,40 | 76,69 | 2,85 | 1,25 | 0,63 | 80,70 | 5% | 0,628 | 68,89 | -10% |
| 18 | 36,5 | 9,93 | 81,28 | 3,01 | 1,32 | 0,62 | 85,45 | 5% | 0,613 | 73,36 | -10% |
| 19 | 37,0 | 10,45 | 85,98 | 3,17 | 1,39 | 0,60 | 90,13 | 5% | 0,601 | 77,89 | -9% |
| 20 | 37,5 | 10,97 | 90,46 | 3,32 | 1,46 | 0,59 | 94,82 | 5% | 0,589 | 82,45 | -9% |



Hình 4.5 So sánh kết quả (KQ) tính theo công thức (3.9) với kết quả theo thiết kế, thí nghiệm công trình và công thức (1.14), (1.15), tràn chảy tự do



Hình 4.6 So sánh $\sigma_n \sim h_n/H_{n0}$ giữa kết quả tính theo công thức (3.15) với (1.19) và kết quả thí nghiệm công trình

Bảng 4.3 Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua tràn Xuân Minh chảy ngập

| TT | Z_{TL} (m) | H_{n0} (m) | h_n/H_{n0} | q_{TN} (m^2/s) | H_0/P | C_d | q_{TT} (m^2/s) | z/PH | $(z/PH)_{pg}$ | σ_n | q_{nTT} (m^2/s) | Sai số (%) |
|----|-----------------|-----------------|--------------|-------------------------|---------|-------|-------------------------|--------|---------------|------------|--------------------------|------------|
| 1 | 30,1 | 3,33 | 0,11 | 27,07 | 0,44 | 1,01 | 27,31 | 0,19 | 0,44 | 0,95 | 25,94 | -4% |
| 2 | 30,5 | 3,92 | 0,24 | 30,20 | 0,52 | 0,94 | 32,38 | 0,19 | 0,52 | 0,94 | 30,33 | 0% |
| 3 | 31,0 | 4,51 | 0,34 | 34,10 | 0,60 | 0,88 | 37,49 | 0,19 | 0,59 | 0,92 | 34,61 | 1% |
| 4 | 31,5 | 5,13 | 0,41 | 38,10 | 0,68 | 0,83 | 42,88 | 0,19 | 0,67 | 0,91 | 39,23 | 3% |
| 5 | 32,0 | 5,65 | 0,47 | 41,65 | 0,75 | 0,80 | 47,43 | 0,19 | 0,74 | 0,91 | 42,95 | 3% |
| 6 | 32,5 | 6,26 | 0,55 | 45,28 | 0,83 | 0,76 | 52,79 | 0,17 | 0,82 | 0,89 | 46,94 | 4% |
| 7 | 33,0 | 6,87 | 0,60 | 48,78 | 0,92 | 0,73 | 58,17 | 0,16 | 0,89 | 0,88 | 51,14 | 5% |
| 8 | 33,6 | 7,64 | 0,62 | 53,34 | 1,02 | 0,69 | 64,99 | 0,17 | 0,99 | 0,88 | 56,89 | 7% |
| 9 | 34,2 | 8,22 | 0,62 | 57,96 | 1,10 | 0,67 | 70,15 | 0,17 | 1,07 | 0,87 | 61,33 | 6% |

| TT | Z _{TL} (m) | H _{n0} (m) | h _n /H _{n0} | q _{TN} (m ² /s) | H ₀ /P | C _d | q _{TT} (m ² /s) | z/PH | (z/ PH) _{pg} | σ _n | q _{nTT} (m ² /s) | Sai số (%) |
|----|------------------------|------------------------|---------------------------------|--|-------------------|----------------|--|------|--------------------------|----------------|---|------------------|
| 10 | 34,8 | 8,83 | 0,65 | 62,32 | 1,18 | 0,65 | 75,59 | 0,17 | 1,14 | 0,87 | 65,59 | 5% |
| 11 | 35,7 | 9,73 | 0,66 | 69,40 | 1,30 | 0,62 | 83,66 | 0,18 | 1,26 | 0,87 | 72,39 | 4% |
| 12 | 36,2 | 10,20 | 0,67 | 73,45 | 1,36 | 0,61 | 87,88 | 0,18 | 1,32 | 0,86 | 75,73 | 3% |
| 13 | 36,9 | 11,05 | 0,69 | 78,97 | 1,47 | 0,59 | 95,54 | 0,18 | 1,42 | 0,86 | 81,95 | 4% |

$$\text{Sai số} = (q_{TT} - q_{TN}) / q_{TN} \%$$

So sánh các kết quả tính toán theo công thức luận án, công thức của các tác giả khác với số liệu thí nghiệm công trình cho thấy:

Kết quả tính theo công thức luận án thiết lập phù hợp với kết quả thí nghiệm của công trình và phù hợp hơn nhiều so với kết quả tính toán theo các công thức của tác giả khác. So với kết quả thí nghiệm công trình, khả năng tháo khi tràn chảy tự do tính theo công thức luận án cho sai số lớn nhất là 10%. Khi tính theo công thức của các tác giả khác, sai số này đến 20%.

Khi mực nước thượng lưu nhỏ hơn +28,5m (Z_{TL} < +28,5m), sai số này đạt tới 43%. Đó là do cột nước tràn mỏng, trên mô hình giá trị cột nước thượng lưu tràn nhỏ hơn 3cm, dòng chảy qua PKW chịu ảnh hưởng nhiều của sức căng mặt ngoài, mô hình không tương tự về động lực học, kết quả thí nghiệm dự án cho trường hợp này là không phù hợp.

Tính toán, so sánh hệ số ngập σ_n thể hiện trên Bảng 4.2, Hình 4.5 và Hình 4.6 cũng cho thấy: kết quả tính toán theo công thức luận án sát với kết quả thí nghiệm dự án, cho sai số nhỏ, đạt 7%. Khi tính theo công thức của tác giả khác, sai số này là 13%.

Như vậy, với số liệu của công trình thực tế, một lần nữa cho thấy mặc dù công thức của luận án thiết lập từ tràn loại A, N=5 nhưng với việc phân định trạng thái, chế độ chảy phản ánh bản chất vật lý của dòng qua công trình nên công thức không chỉ đúng với các trường hợp thí nghiệm của luận án, đúng cho tràn tiêu chuẩn N=4-6 mà còn đúng cho tràn loại B như đã kiểm định trong chương 3. Việc kiểm chứng với công trình thực tế có kích thước thứ nguyên này cho kết quả tốt

hơn công thức của các tác giả khác thể hiện phạm vi ứng dụng của công thức luận án là hoàn toàn phù hợp.

4.3.2 Ứng dụng cho công trình có đáy kênh hạ lưu bằng chân phím ra

Trần Ngàn Trươi là công trình thực tế đã được thiết kế và thí nghiệm trên mô hình, có nối tiếp dạng bậc nước cao trình đáy ngang chân phím ra. Do đó, luận án sử dụng công trình tràn xả lũ Ngàn Trươi PA3 để tính toán ứng dụng cho trường hợp tràn piano có đáy kênh hạ lưu ngang chân phím nước ra.

4.3.2.1 Giới thiệu về công trình

Trần xả lũ Ngàn Trươi thuộc công trình đầu mối hồ chứa nước Ngàn Trươi, huyện Vũ Quang, tỉnh Hà Tĩnh. Phương án chọn được đưa vào xây dựng là dạng tràn thực dụng có van điều tiết, nối tiếp dốc nước. Tuy nhiên trong quá trình thiết kế, so chọn, phương án tràn xả lũ hỗn hợp gồm tràn có cửa và tràn tự do kiểu phím piano loại A (PA3) đã được nghiên cứu, thí nghiệm chi tiết trên mô hình vật lý. Phương án này dù không được chọn để thi công do chưa hợp lý về bố trí tổng thể công trình (chiều rộng tràn gấp 3 lần chiều rộng kênh xả hạ lưu) nhưng các kết quả trong thiết kế cũng như thí nghiệm của tràn piano Ngàn Trươi là những tài liệu tham khảo rất hữu ích cho nghiên cứu cũng như ứng dụng trong các công trình tương tự.

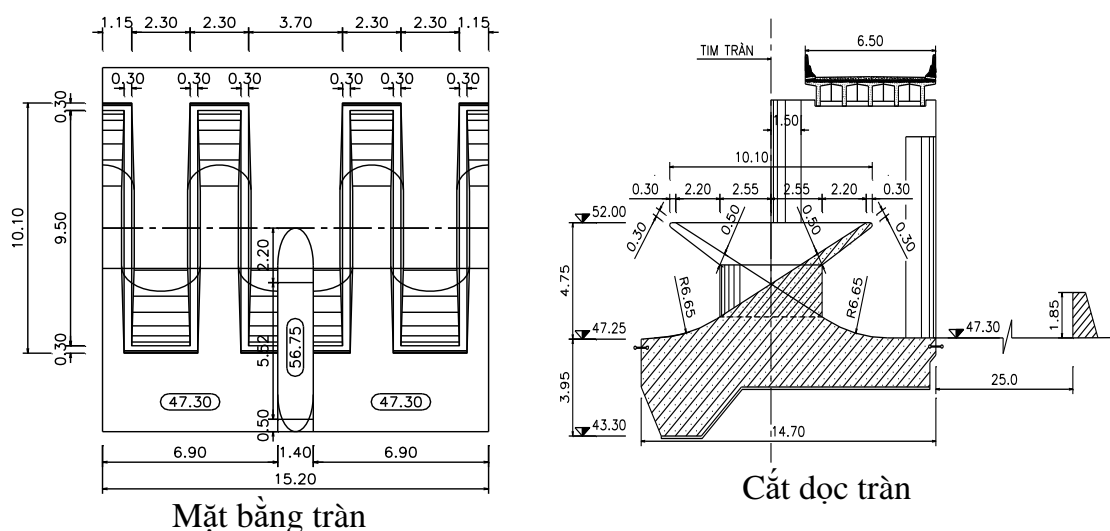
Phương án tràn hỗn hợp – PA3, tràn xả lũ gồm tràn xả mặt dạng mặt cắt thực dụng và tràn piano. Đỉnh đập dâng ở cao trình $\nabla 56.50\text{m}$. Đỉnh tràn có cửa ở cao trình $\nabla 49.50\text{m}$ gồm 5 khoang rộng 12.0m , cửa van cung điều tiết $(12 \times 2.5)\text{m}$. Đỉnh tràn piano là $\nabla 52.0\text{m}$, đặt ở bên phải tràn có cửa, tổng chiều dài tràn piano là 105.80m , gồm 7 khoang, phân giữa các khoang là trụ pin đỡ cầu công tác dày 1.40m .

Các thông số hồ chứa và dòng chảy lũ qua tràn: Mực nước dâng bình thường (MNDBT) $+52.00\text{m}$; Mực nước lớn nhất thiết kế $P=0,5\%$ $+54.62\text{m}$; Mực nước lớn nhất kiểm tra $P=0,1\%$ $+55.50\text{m}$; Mực nước chết (MNC) $+25.00\text{m}$; Lưu lượng xả lũ kiểm tra $P=0,1\%$ $Q_{KT} = 4053\text{m}^3/\text{s}$; Lưu lượng xả lũ thiết kế $P=0,5\%$ $Q_{TK} = 2932\text{m}^3/\text{s}$.

Tính toán, lựa chọn thông số tràn piano theo các bước được trình bày như trên mục 4.1; Hình 4.3, được các giá trị như trong Bảng 4.4.

Bảng 4.4 Bảng thông số công trình

| Thông số công trình | Thông số tràn | | Tỷ lệ hình học |
|-------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|
| $Z_{ng} = 52,0$ m | Loại A | $T_s = 0,3$ m | $W_i/P_p = 1,0$ |
| $Z_{đkTL} = 47,3$ m | $W_i = 2,6$ m | $S_i = 0,52$ | $W_i/W_o = 1,3$ |
| $P = P_T = P_H = 4,7$ m | $W_o = 2,0$ m | $S_o = 0,52$ | $P/W_u = 1,0$ |
| $W = 105,8$ m | $W_u = 4,6$ m | $B_i = 2,2$ m | $B/P_p = 3,8$ |
| $H_{TK1\%} = 2,62$ m | $P_p = 2,5$ m | $B_o = 2,2$ m | $N = 5,1$ |
| $H_{KT0,2\%} = 4,04$ m | $P_i = 4,7$ m | $B = 9,5$ m | |
| $q_{TK} = 17,5$ (m ² /s) | $P_o = 4,7$ m | $L_u = 23,6$ m | |
| $q_{KT} = 27,7$ (m ² /s) | | | |

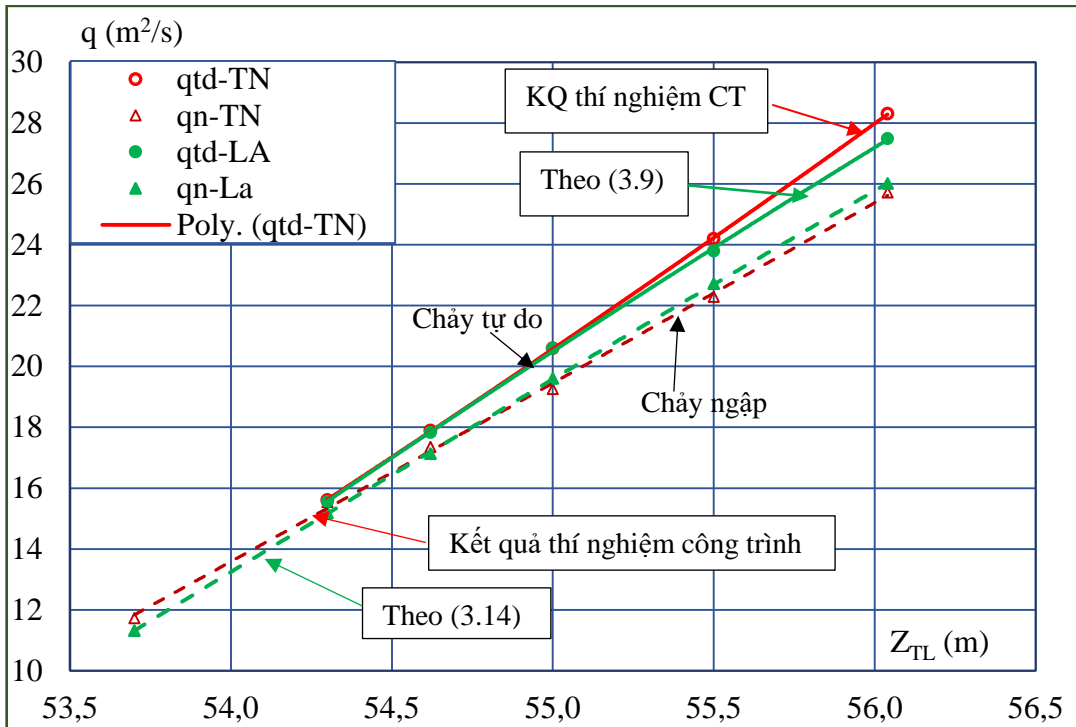


Hình 4.7 Cấu tạo tràn piano Ngàn Trươi [10]

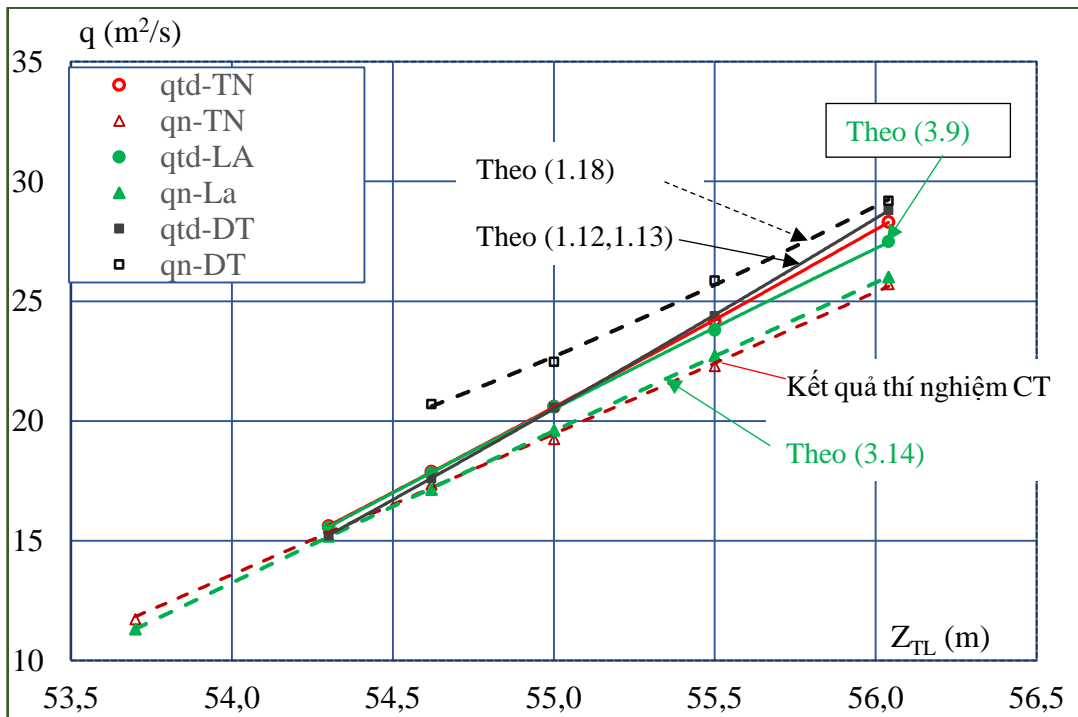
4.3.2.2 Tính toán lưu lượng

Tràn piano Ngàn Trươi tuy có hình dạng mặt cắt không giống hoàn toàn tràn Văn Phong nhưng các thông số chính cũng được thiết kế gần với tỷ lệ và kích thước của Văn Phong, tương tự mô hình nghiên cứu của tác giả khác và của luận án. Do đó, lưu lượng qua tràn Ngàn Trươi được tính toán theo công thức luận án, theo công thức của tác giả khác và so sánh với kết quả thí nghiệm công trình (CT).

Kết quả tính toán xác định khả năng tháo qua PKW Ngàn Trươi thể hiện chi tiết trong Bảng 4.5, Bảng 4.6 và Hình 4.8, Hình 4.9.



Hình 4.8 So sánh giữa kết quả thí nghiệm công trình, kết quả tính theo các công thức (3.9) - (3.15) khi tràn chảy tự do và chảy ngập



Hình 4.9 So sánh với kết quả tính theo công thức (1.12), (1.13), (1.18)

Bảng 4.5 Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua PKW
Ngàn Trươi chảy tự do

| TT | Z_{TL} (m) | H_0 (m) | q_{TN} (m^2/s) | H_0/W_0 | H_0/P | k_{dh} | C_d | q_{TT} (m^2/s) | Sai số (%) |
|----|--------------|-----------|----------------------|-----------|---------|----------|-------|----------------------|------------|
| 1 | 56,04 | 4,16 | 28,31 | 2,08 | 0,89 | 0,97 | 0,72 | 27,22 | -3,8 |
| 2 | 55,5 | 3,58 | 24,19 | 1,79 | 0,76 | 0,99 | 0,78 | 23,52 | -2,7 |
| 3 | 55,00 | 3,07 | 20,60 | 1,54 | 0,65 | 1,00 | 0,85 | 20,33 | -1,3 |
| 4 | 54,62 | 2,67 | 17,89 | 1,34 | 0,57 | 1,00 | 0,91 | 17,57 | -1,7 |
| 5 | 54,3 | 2,34 | 15,61 | 1,17 | 0,50 | 1,00 | 0,97 | 15,31 | -1,9 |

Bảng 4.6 Kết quả thí nghiệm công trình và tính toán khả năng tháo qua PKW
Ngàn Trươi chảy ngập

| TT | H_{n0} (m) | h_n/H_{n0} | q_{TN} (m^2/s) | H_0/P | k_{dh} | C_d | q_{TT} (m^2/s) | z/P_H | $(z/P_H)_{pg}$ | σ_n | q_{nTT} (m^2/s) | Sai số (%) |
|----|--------------|--------------|----------------------|---------|----------|-------|----------------------|---------|----------------|------------|-----------------------|------------|
| 1 | 56,04 | 0,38 | 25,72 | 0,88 | 0,98 | 0,727 | 27,03 | 0,53 | 0,86 | 0,926 | 25,04 | -2,6 |
| 2 | 55,50 | 0,29 | 22,29 | 0,76 | 0,99 | 0,785 | 23,46 | 0,53 | 0,74 | 0,938 | 22,01 | -1,3 |
| 3 | 55,00 | 0,21 | 19,25 | 0,65 | 1,00 | 0,856 | 20,19 | 0,50 | 0,64 | 0,947 | 19,12 | -0,7 |
| 4 | 54,62 | 0,11 | 17,35 | 0,57 | 1,00 | 0,909 | 17,57 | 0,49 | 0,56 | 0,956 | 16,80 | -3,2 |
| 5 | 54,30 | -0,17 | 15,54 | 0,50 | 1,00 | 0,966 | 15,31 | 0,57 | 0,49 | 0,981 | 15,02 | -3,4 |
| 6 | 53,70 | -0,54 | 11,72 | 0,37 | 1,00 | 1,111 | 11,10 | 0,56 | 0,36 | 1,000 | 11,10 | -5,2 |

Khi tràn chảy tự do, so sánh với kết quả thí nghiệm của công trình, kết quả tính theo công thức từ (3.9) đến (3.15) của luận án và công thức (1.12), (1.13) của tác giả khác đều phù hợp và cho sai số nhỏ, dưới 5%. Tuy nhiên với cột nước lớn $Z_{TL} > 55,0m$, kết quả tính toán theo công thức của tác giả khác bắt đầu cho sự sai lệch đáng kể đó là bởi thực tế khả năng tháo qua tràn đã bắt đầu bị ảnh hưởng giảm do đáy kênh hạ lưu. Theo (3.13), khả năng tháo qua tràn bị ảnh hưởng giảm từ mực nước thiết kế trở lên. Với $H_{TK}=3,5m$, hiệu quả khả năng tháo giảm 1,5%.

Khi tràn chảy ngập, kết quả tính toán theo công thức xây dựng cho độ chính xác cao, sai số tuyệt đối lớn nhất so với kết quả thí nghiệm là 5,2%; hệ số ngập đạt

$\sigma_n=0,94$, khi cột nước ngập của công trình lớn nhất $h_n/H_{n0}=0,38$. Khi tính theo (1.18) còn cho sai số lớn 19% như biểu thị trên Hình 4.9.

4.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Luận án đã đưa ra các bước tính toán, ứng dụng lựa chọn thông số hình học tràn piano giúp người thiết kế có cái nhìn từ tổng quát đến cụ thể, lựa chọn được đơn vị tràn PKW cho khả năng tháo tốt nhất.

Luận án đã tính toán, áp dụng cho công trình thực tế không chỉ với tràn loại A, $N=5$ mà còn với tràn loại B, $N=6$. Đó là tràn xả lũ Ngân Trươi công trình xả lũ có đáy kênh hạ lưu bằng chân phím nước ra và tràn xả lũ Xuân Minh – dạng công trình tháo nước cột nước thấp, đáy kênh hạ lưu thấp. Kết quả tính khả năng tháo qua tràn piano theo công thức luận án cho thấy sự phù hợp cao với kết quả thí nghiệm độc lập của các công trình thực tế này và phù hợp hơn so với các công thức hiện có. Sai số lớn nhất tính cho tràn Ngân Trươi là 3,8% chảy tự do, là 5,2% khi tràn chảy ngập và tràn Xuân Minh là 7% so với kết quả thí nghiệm. Khi tính theo công thức (1.12) đến (1.19), sai số này là 19% và 25%.

Kết quả tính toán này cũng cho thấy dù công thức luận án được thiết lập với tràn loại A, $N=5$ nhưng phạm vi áp dụng phù hợp mở rộng cho PKW loại A và PKW loại B có đơn vị tràn tiêu chuẩn.

Các bước tính toán, xác định khả năng tháo của luận án đã giúp có cách nhìn rõ hơn về thiết kế, lựa chọn mặt cắt tràn piano. Công thức tính đơn giản, phạm vi áp dụng rộng, thuận lợi cho thiết kế, phù hợp nhất trong những công thức đã công bố và cho sai số nhỏ khi tính cho các công trình có điều kiện khác nhau.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

Trần piano là loại trần mới, đang được nghiên cứu và áp dụng rộng rãi trong thực tế xây dựng, nâng cấp công trình bởi khả năng tháo lớn, nhưng PKW cũng có nhiều khác biệt về chế độ thủy lực, nối tiếp hạ lưu so với trần truyền thống. Luận án đã góp phần làm sáng tỏ và phong phú hơn các hiểu biết về các đặc trưng hình dạng, thủy lực, chế độ chảy qua trần piano, tạo điều kiện thuận cho công việc thiết kế và vận hành công trình. Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đặt ra và đạt được các kết quả:

1. Đã tổng quan các kết quả nghiên cứu về trần piano được công bố tới thời điểm hiện tại. Các nghiên cứu đã đạt được nhiều thành tựu trong xác định ảnh hưởng của kích thước hình học tới khả năng tháo:

+ Trần piano có cấu tạo gồm 20 thông số hình học với 09 thông số chính và chỉ 03 thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng tháo, theo thứ tự: chiều cao trần, chiều rộng đơn vị trần và chiều dài phím. + Hình thức trần và các tỷ lệ kích thước hình học này chỉ ảnh hưởng rõ rệt tới hiệu quả tháo khi trần làm việc với cột nước $H/P=0,2\div 0,4$.

+ Các nghiên cứu đã có còn tồn tại: + Chưa phân tích, xác định các chế độ, trạng thái chảy đặc trưng qua trần piano khi $H/P>0,2$ cũng như xem xét ảnh hưởng tới khả năng tháo qua trần của điều kiện hạ lưu khi đáy kênh cao ngang bằng chân phím ra; + Chưa xác định ranh giới khả năng tháo qua trần bị ảnh hưởng bởi mực nước hạ lưu và xem xét đến hiện tượng ảnh hưởng tới khả năng tháo khi $h_n<0$, như trần thực dụng có chân không; + Chưa có cấu tạo hay công thức chung ứng dụng tổng quát trong thiết kế trần piano; + Phạm vi ứng dụng của các công thức tính khả năng tháo giới hạn cho cột nước trần nhỏ, công trình cụ thể, hoặc cho sai số lớn dù công trình trong miền phù hợp.

2. Luận án sử dụng lý thuyết tương tự, lý thuyết thứ nguyên, phương pháp thực nghiệm bằng mô hình vật lý, mô hình toán 3D để thiết lập hàm hồi quy thực

nghiệm, các thí nghiệm được bố trí chủ động. Phân tích các số liệu thí nghiệm bằng phần mềm thương mại theo lý thuyết hồi quy thực nghiệm.

3. Các kết quả khoa học thu được:

+ Luận án đã xác định được đơn vị tràn piano tiêu chuẩn, cho tối ưu về khả năng tháo và kinh tế từ phân tích các nghiên cứu đã có. Đơn vị tràn tiêu chuẩn có các tỷ lệ hình học tháo mãn phạm vi: $P/W_u=0,5\div 1,3$; $W_i/W_o=1,2\div 1,5$; $N=L/W=4\div 6$.

+ Lưu lượng tháo qua tràn piano phụ thuộc chủ yếu vào các kích thước cơ bản của tràn gồm: chiều cao P, P_H , chiều rộng W, chiều rộng phím ra W_o , chiều dài L và chiều cao tràn tính tới đáy kênh hạ lưu P_H ; khi chảy ngập còn phụ thuộc vào các tham số dòng chảy H_0 , h_h , h_n và z.

+ Đã phát hiện, mô tả chi tiết và lý giải đặc trưng dòng chảy trên tràn và dòng chảy nối tiếp hạ lưu. Các đặc trưng này dọc theo phím nước vào, phím nước ra là rất rất phức tạp, chuyển hóa liên tục, ảnh hưởng lẫn nhau, để tạo nên những trạng thái chảy đặc thù khác nhiều so với tràn truyền thống.

+ Công thức xác định khả năng tháo được thiết lập phân vùng theo trạng thái của dòng chảy qua tràn piano là “chảy không đầy phím ra” và “chảy đầy phím ra” với ranh giới là $H_0/W_o=0,5$; chảy có ảnh hưởng và không ảnh hưởng bởi đáy kênh hạ lưu với ranh giới là $H_0/P_H=0,7$; chảy tự do hoàn toàn và chảy ngập hoàn toàn với ranh giới vùng quá độ là $h_n/H_n=0,2\div 0$.

+ Lưu lượng tháo qua tràn piano tiêu chuẩn tính theo dạng công thức của tràn thực dụng. Lưu lượng tháo qua tràn chảy tự do xác định theo công thức (3.5), trong đó hệ số tháo C_{d0} xác định theo công thức (3.10), (3.11), hệ số k_H xác định theo (3.13). Sai số trung bình lớn nhất của công thức với tập xây dựng là 2,9%, với tập kiểm định là 6,9%. Sai số tuyệt đối lớn nhất tương ứng là 7,4% và 12,6%. + Hệ số ngập σ_n xác định theo công thức (3.15). Sai số trung bình lớn nhất là 3%, sai số tuyệt đối lớn nhất là 7%. Xu hướng phân bố của σ_n trong quan hệ $\sigma_n \sim h_n/H_n$ là phù hợp với quy luật dòng chảy ngập. + Xác định cột nước phân giới z_{pg} theo công thức (3.2). Công thức luận án thiết lập với tràn loại A, $N=5$ nhưng phạm vi áp dụng được mở rộng, phù hợp cho tràn tiêu chuẩn; Phạm vi cột nước tràn $H_0/P = 0,17\div 2,5$;

độ ngập là $-0,2 < h_n/H_{n0} \leq 0,9$; kết cấu tường ngăn của phím có mép lượn tròn. + Công thức cũng phù hợp để tính khả năng tháo cho tràn loại B, sai số trung bình lớn nhất là 7,2%.

Các công thức xác định lưu lượng tháo qua tràn khi chảy tự do và chảy ngập được thiết lập có dạng đơn giản, tổng quát, sai số nhỏ hơn những công thức đã công bố, phù hợp và thuận lợi khi áp dụng trong tính toán, thiết kế tràn piano cho các công trình có điều kiện khác nhau. Ứng dụng kết quả nghiên cứu của luận án vào thực tiễn đã cho thấy sự thuận lợi của kết quả nghiên cứu và phù hợp với số liệu thí nghiệm của nhiều tác giả khác nhau cho các công trình thực tế.

4. Các đóng góp mới của luận án

(1). Luận án đã xác định được ranh giới các trạng thái phân định chế độ chảy của dòng qua tràn piano gồm: + Ranh giới trạng thái chảy đầy phím ra và không đầy phím ra là $H_0/W_0=0,5$; + Ranh giới dòng chảy qua tràn có ảnh hưởng và không ảnh hưởng bởi điều kiện hạ lưu (đáy kênh hạ lưu nâng cao) là $H_0/P_H=0,7$; + Ranh giới của trạng thái quá độ giữa chảy tự do hoàn toàn và chảy ngập hoàn toàn là $h_n/H = -0,2 \div 0$.

(2). Luận án đã xây dựng được công thức xác định hệ số tháo qua tràn piano tính theo (3.4) là công thức (3.10), (3.11); hệ số ảnh hưởng bởi địa hình hạ lưu tính theo công thức (3.13); hệ số ngập tính theo công thức (3.15); giá trị cột nước phân giới nối tiếp nước nhảy ngập sau tràn tính theo công thức (3.2).

II. TỒN TẠI VÀ HẠN CHẾ

+ Kết quả nghiên cứu của luận án mới dừng lại ở bài toán phẳng, trên thực tế nối tiếp thượng, hạ lưu tràn còn bị ảnh hưởng bởi tính không gian theo cả chiều đứng và chiều ngang do đó nên xem xét tính toán hoặc thí nghiệm trên mô hình tổng thể nếu cần thiết để đảm bảo khả năng tháo cho công trình;

+ Công thức từ (3.10) đến (3.15) xây dựng từ tập số liệu của tràn loại A, $N=5$; được kiểm chứng phù hợp với số liệu thí nghiệm của tràn loại A, $N=4 \div 6$ và loại B, sai số tuyệt đối lớn nhất mắc phải khi tính cho tràn loại B là 16%, lớn hơn so với tràn loại A (chỉ 8%). Chưa tính toán và kiểm định cho tràn loại C, loại D.

+ Phạm vi phù hợp của công thức là: $H_0/P = 0,2 \div 2,5$; $P/W_u = 0,5 \div 1,3$; $W_i/W_o = 1,2 \div 1,5$; $N = 4 \div 6$; Mép đỉnh tường tràn dạng lượn tròn.

III. KIẾN NGHỊ

+ Sử dụng đơn vị tràn piano tiêu chuẩn để tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo và áp dụng cho thiết kế tràn piano.

+ Sử dụng những số liệu thí nghiệm, đường quan hệ, công thức của luận án để tính toán xác định lưu lượng tháo, đặc trưng thủy động lực học qua tràn piano trong điều kiện chảy tự do, chảy ngập và ảnh hưởng của điều kiện đáy kênh hạ lưu.

IV. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

+ Tiếp tục nghiên cứu, kiểm chứng với tràn piano loại C và loại D.

+ Thay đổi hình dạng phím để tăng phạm vi dòng chảy không đầy phím ra (như mở rộng dần phím ra về hạ lưu) nhằm tăng vùng cột nước có khả năng tháo lớn qua tràn piano.

+ Mở rộng phạm vi nghiên cứu nối tiếp thượng hạ lưu tràn, nghiên cứu xác định phạm vi bồi lắng, tháo cây trôi, vật nổi để xác định khả năng tháo khi bị ảnh hưởng bởi co hẹp bên cho các kết quả tốt hơn khi áp dụng trong tính toán thiết kế;

+ Nghiên cứu chi tiết hơn về phân bố lưu tốc dòng chảy, áp suất mạch động, khả năng phân tán, tiêu hao năng lượng của dòng chảy ở hạ lưu tràn piano.

+ Nghiên cứu chi tiết để luận giải sự hình thành hình dạng đường mặt nước, nối tiếp dòng chảy trong lòng phím nước ra.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **PGS.TS. Lê Văn Nghi, Ths.Đoàn Thị Minh Yến**, Xác định ảnh hưởng của độ ngập, co hẹp bên tới khả năng tháo của tràn piano bằng nghiên cứu thực nghiệm, *Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi*, tr 09÷16, số 23 tháng 10-2014;
2. **Ths.Đoàn Thị Minh Yến, PGS.TS. Lê Văn Nghi**, Khả năng tháo qua tràn piano loại A chảy tự do, *Tuyển tập khoa học công nghệ Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam năm 2016*, tr 74÷85, Hà nội 2016;
3. **NCS.Đoàn Thị Minh Yến**, Phân tích ảnh hưởng của các đặc trưng hình học đến khả năng tháo và lựa chọn mặt cắt tiêu chuẩn cho tràn piano, *Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi*, tr62÷70, số 41 tháng 11 năm 2017;
4. **NCS.Đoàn Thị Minh Yến**, Đặc trưng hình dạng và nối tiếp của dòng chảy qua tràn piano, *Tuyển tập Báo cáo kết quả nghiên cứu của các cán bộ khoa học trẻ Phòng Thí nghiệm trọng điểm QG về ĐLHSB*, Hà nội, tháng 11 năm 2017;
5. **NCS.Đoàn Thị Minh Yến**, Nghiên cứu xác định ranh giới và hệ số ngập của tràn piano, *Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi*, tháng 5 năm 2018 (đã gửi đăng bài, đang chờ phản biện);
6. **LE VAN NGHI, DOAN THI MINH YEN**, Discharge capacity on piano key weirs, *Journal of Applied Water Engineering and Research (JAWER)*, tháng 2 năm 2017 (đã gửi đăng bài, đang chờ phản biện).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Cảnh Cầm, Nguyễn Văn Cung, cs (2006), Thủy lực tập 1, 2, *Nhà xuất bản Nông nghiệp*, Hà Nội;
- [2] Nguyễn Hữu Chí (1974), Cơ học chất lỏng ứng dụng, *Nxb Đại học và Trung học chuyên nghiệp*, Hà nội;
- [3] Nguyễn Văn Cung, Nguyễn Xuân Đặng, Ngô Trí Viêng (1977). Công trình tháo lũ trong đầu mối hệ thống thủy lợi, *Nxb Khoa học và Kỹ thuật*, Hà nội
- [4] Nguyễn Thanh Hải và cs (2014). “Báo cáo sản phẩm đề tài NCKHCN Nghiên cứu ứng dụng tràn có ngưỡng kiểu phím Piano vào xây dựng công trình thủy lợi ở Việt Nam”, *Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam*, TP Hồ Chí Minh;
- [5] Nguyễn Thanh Hải và cs (2010). “ Báo cáo kết quả thí nghiệm mô hình thủy lực tràn, công đập dâng Văn Phong, tỉnh Bình Định” *Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam*, TP Hồ Chí Minh;
- [6] Trương Chí Hiền, Trần Hiếu Thuận (2009). “Khả năng tháo nước của đập tràn phím Piano ngưỡng thấp trên kênh tiêu nước”, *Tạp chí phát triển Khoa học và Công nghệ*;
- [7] Trương Chí Hiền, M.Hồ Tá Khanh (2014). “Kết quả nghiên cứu khả năng tháo nước của đập tràn phím Piano loại A, D và Labyrinth chữ nhật trên mô hình vật lý”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*;
- [8] Nguyễn Lanh (2005). “Quy hoạch hóa thực nghiệm”, *Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam*.
- [9] Giang Thị Kim Liên (2009). “Quy hoạch thực nghiệm”, *Đại Học Đà Nẵng*.
- [10] Lê Văn Nghị, Đoàn Thị Minh Yến và cs (2012). “Báo cáo kết quả thí nghiệm mô hình thủy lực tràn xả lũ Ngàn Trươi PA3 – tràn hỗn hợp trên nền mềm”, Phòng Thí nghiệm trọng điểm QG về ĐLH sông biển, Hà nội;
- [11] Phạm Ngọc Quý (2003a), *Mô hình toán và mô hình vật lý công trình thủy lợi*, Bài giảng dùng cho cao học, Đại học Thủy lợi, Hà Nội;
- [12] Bùi Thế Tâm (2007). “*Giải các bài toán tối ưu và thống kê trên Microsoft Excel*”, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [13] Giang Thư, Nguyễn Thanh Khởi và cs (2015). “Báo cáo kết quả thí nghiệm mô hình thủy lực đập tràn phím đàn Piano – Phương án P=6m, dự án thủy điện Xuân Minh, tỉnh Thanh Hóa”, *Phòng Thí nghiệm trọng điểm QG về ĐLH sông biển*, Hà nội;
- [14] Trần Quốc Thương (2005). “Thí nghiệm mô hình thủy lực công trình”, *Nhà xuất bản Xây dựng*, Hà Nội.

- [15] Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2011). *Tiêu chuẩn thiết kế tràn phìm đàn Piano áp dụng cho công trình đập dâng Văn Phong*, Hà Nội;
- [16] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8214 (2009), Thí nghiệm mô hình thủy lực công trình thủy lợi, thủy điện, Hà Nội
- [17] Kixelep.P.G, Altsul.A.D, Danhitsenko.N.V, Kaxpaxon.A.A., Kriptsenko.G.I, Paskop.N.N và Xlixki.X.M (1950). *Sổ tay tính toán thủy lực*, Nxb Xây dựng, Hà nội – 2010;
- [18] Belaabed.F & Ouamane.A (2011). “Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.89-95;
- [19] Belaabed.F & Ouamane.A (2013). “Submerged flow regimes of Piano Key weir”, *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-138-00085-8, pp. 85-92;
- [20] Belaabed.F, Athmani.B, Ouamane. A & Laiadi. A (2017). “Study of the influence of submerging on the upstream flow of Piano Key weir (PKW)”, *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*;
- [21] Blancher.B, Montarros.F and Laugier.F (2011). “Hydraulic comparison between piano-keys weir and labyrinth spillways”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.141-150.
- [22] Booyse.D (2017). “Raising of Hazelmere Dam by means of PKW”, *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*.
- [23] Chapuis.A, Thomas.M, Deroo.L and Guillemot.T (2017). “Ramdane Djamel dam Piano Key weirs on a lateral spillway”, *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*.
- [24] Cicero.G.M & Delisle.J.R (2013). “Discharge characteristics of Piano Key weir under submerged flow”, *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-138-00085-8, pp. 101-108;
- [25] Cicero.G.M & Delisle.J.R (2013). “Effects of the crest shape on the discharge efficiency of a type A Piano Key weir”, *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-138-00085-8, pp. 41-48;
- [26] Erpicum.S, Archambeau.P, Dewals.B.J and Piroton.M (2017). “Hydraulics of Piano Key weirs: a review”. *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*.

- [27] Erpicum.S, Archambeau.P, Piroton.M, and Dewals.B.J (2014). “Geometric parameters influence on Piano Key Weir hydraulic performances”. *5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Brisbane, Australia, (1-8). 25-27 June 2014.
- [28] Erpicum.S, Machiels.O, Dewals.B.J, Archambeau.P and Piroton.M (2013b). “Considerations about the optimum design of PKW”, *Proc. Intl. Conf. Water Storage and Hydropower Development for Africa (Africa 2013)*, Addis Ababa (Ethiopia).
- [29] Nguyen Thanh Hai, Tang Duc Thang, Ho Ta Khanh (2017). “Research on Piano Key weirs for free and submerged flows”, *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*.
- [30] Kabiri-Samani.A & Javaheri.A (2012). Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*.
- [31] Karimi Mahmoud, Attari Jalal, Saneie Mojtaba, Ghazizadeh. Mohammad R. J, (2017). “Experimental Study of Discharge Coefficient of a Piano Key Side Weir” *Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017*.
- [32] M. Ho Ta Khanh, T. Chi Hien & N. Thanh Hai (2011). “Main Result of the P.K weir model tests in Viet Nam (2004-2010)”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.191-198;
- [33] M. Ho Ta Khanh (2012). “Utilization of Piano Key Weirs for low barrages”, *Hydro 2012*, Bilbao, Spain;
- [34] M. Ho Ta Khanh (2013). “The Piano Key Weirs: 15 years of Research and Development - Prospect”, *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-138-00085-8, pp.3-14;
- [35] Lefebvre.V, Verneulen.J and Blancher.B (2013). “Influence of geometrical parameters on PK-Weir discharge with 3D numerical analysis”, *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-138-00085-8, pp.49-56;
- [36] Leite Ribeiro.M, Boillat.J-L, Schleiss.A.J, Doucen.O.Le and Laugier.F (2011). “Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4, pp.183-190;
- [37] Leite Ribeiro.M, Pfister. M and Schleiss Anton J (2013). Overview of Piano Key weir prototypes and scientific model investigations, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs - PKW 2013*, p. 273-281;

- [38] Lempérière.F & Ouamane.A (2003). “The Piano Keys weir: a new cost – effective solution for spillways”, *Hydropower & Dams*, 7(5):144-149;
- [39] Lempérière.F, Vigny.J.P & Ouamane.A (2011). “General comments on Labyrinths and Piano Key Weirs: The past and present”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.17-24;
- [40] Machiels.O, Erpicum.S, Archambeau.P, Dewals.B and Piroton.M (2011). “Influence of the Piano Key Weir height on its discharge capacity”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.59-66;
- [41] Machiels.O, Piroton.M. et al. (2014). “Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs”, *Journal of Hydraulic Research*.
- [42] Mehboudi. A, Attari Jalal; Hosseini.S.A (2017). “Flow Regimes over Trapezoidal Piano Key Weirs”, Presented at 3rd International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2017.
- [43] Noui.A & Ouamane.A (2011). “Study of optimization of the Piano Key Weir”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4, pp.175-182;
- [44] Ouamane.A (2011). “Nine years of study of the Piano Key Weir in the university laboratory of Biskra lesson and reflections”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4, pp.51-58;
- [45] Pralong.J, Montarros.F, Blancher.B & Laugier.F (2011). “A sensitivity analysis of Piano Key Weirs geometrical parameters based on 3D numerical modeling”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.133-139;
- [46] Schleiss.A.J (2011). “From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4: pp.3-15;
- [47] Singhal.G.Das & Sharma.N (2011). “Rehabilitation of Sawara Kuddu Hydroelectric Project – Model studies of Piano Key Weir in India”, *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*, Published by CRC Press, London, ISBN 978-0-415-68282-4 , pp.241-249;

PHỤ LỤC

Phụ lục 1. CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO CỦA O. MACHIELS VÀ CS

O Machiels và cs (2014) kế thừa, phát triển công thức của (2010) xác định lưu lượng đơn vị qua tràn piano là tổng của 3 lưu lượng đơn vị thành phần gồm lưu lượng đơn vị qua tường thượng lưu q_u , tường hạ lưu q_d và tường bên của phím q_s .

$$q = q_u \frac{W_o}{W_u} + q_d \frac{W_i}{W_u} + q_s \frac{2B}{W_u} \quad (1)$$

Trong đó: Lưu lượng đơn vị qua tường thượng lưu q_u , tường hạ lưu q_d được tính theo công thức của đập tràn thành mỏng tiêu chuẩn:

$$q_u = 0,374 \left(1 + \frac{1}{1000H+1,6}\right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{H}{H+P_T}\right)^2\right] \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2)$$

$$q_d = 0,445 \left(1 + \frac{1}{1000H+1,6}\right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{H}{H+P}\right)^2\right] \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (3)$$

$$q_s = 0,41 \left(1 + \frac{1}{0,833H+1,6}\right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{0,833H}{0,833H+P_e}\right)^2\right] \left[\frac{P_e^{\alpha+\beta}}{(0,833H+P_e)^{\alpha+\beta}}\right] K_{wi} K_{wo} \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (4)$$

$$P_e = \frac{B_o}{B} P_T + \left(1 - \frac{B_o}{B}\right) \frac{P}{2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{0,7}{S_i^2} - \frac{3,58}{S_i} + 7,55 \quad (6)$$

$$\beta = 0,029 e^{-1,446/S_i} \quad (7)$$

$$K_{wi} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + W_i^2}; \quad (8)$$

γ được xác định từ kết quả thí nghiệm với $P/W_u = 1,3$ và $W_i/W_o \leq 1$:

$$\gamma = 0,0037 \left(1 - \frac{W_i}{W_o}\right) \quad (9)$$

Hệ số K_{wo} phụ thuộc vào tỷ lệ cột nước và chiều rộng phím ra H/W_o :

$$K_{wo} = 1 \text{ nếu } \frac{H}{W_o} \leq \delta_1;$$

$$K_{wo} = \frac{2}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right)^3 - \frac{3(\delta_2 + \delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right)^2 + \frac{6\delta_2\delta_1}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o}\right) + \frac{\delta_2^2(\delta_2 - 3\delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \text{ nếu } \delta_1 \leq \frac{H}{W_o} \leq \delta_2; \quad (10)$$

$$K_{wo} = 0 \text{ nếu } \delta_1 \leq \frac{H}{W_o}; \delta_1 = -0,788S_o^{-1,88} + 5 \quad (11)$$

$$\delta_2 = 0,236S_o^{-1,94} + 5 \quad (12)$$

Phụ lục 2. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM KHẢ NĂNG THÁO TRÀN PIANO

Bảng PL2-1. Kết quả thí nghiệm khả năng tháo tràn chảy tự do

| TT | q (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /W _u | TT | q (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /W _u |
|----|---|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|--|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| A | Đáy kênh hạ lưu bằng chân phím nước ra | | | | 47 | 0,197 | 0,874 | 1,361 | 0,604 |
| I | <i>Trường hợp P/W_u=0,44</i> | | | | 48 | 0,206 | 0,884 | 1,378 | 0,612 |
| 1 | 0,035 | 0,309 | 0,307 | 0,136 | 49 | 0,256 | 1,114 | 1,736 | 0,771 |
| 2 | 0,048 | 0,411 | 0,409 | 0,182 | 50 | 0,265 | 1,135 | 1,768 | 0,785 |
| 3 | 0,053 | 0,464 | 0,462 | 0,205 | 51 | 0,290 | 1,276 | 1,987 | 0,882 |
| 4 | 0,063 | 0,525 | 0,523 | 0,232 | 52 | 0,292 | 1,277 | 1,991 | 0,884 |
| 5 | 0,064 | 0,542 | 0,540 | 0,240 | III | <i>Trường hợp P/W_u=1,07</i> | | | |
| 6 | 0,077 | 0,628 | 0,625 | 0,278 | 53 | 0,064 | 0,169 | 0,407 | 0,181 |
| 7 | 0,089 | 0,723 | 0,720 | 0,319 | 54 | 0,065 | 0,169 | 0,409 | 0,182 |
| 8 | 0,120 | 0,953 | 0,949 | 0,421 | 55 | 0,064 | 0,169 | 0,409 | 0,182 |
| 9 | 0,137 | 1,072 | 1,067 | 0,474 | 56 | 0,097 | 0,244 | 0,589 | 0,262 |
| 10 | 0,140 | 1,118 | 1,113 | 0,494 | 57 | 0,145 | 0,356 | 0,860 | 0,382 |
| 11 | 0,140 | 1,125 | 1,120 | 0,497 | 58 | 0,206 | 0,518 | 1,250 | 0,555 |
| 12 | 0,141 | 1,125 | 1,120 | 0,497 | 59 | 0,210 | 0,520 | 1,256 | 0,558 |
| 13 | 0,166 | 1,269 | 1,263 | 0,561 | 60 | 0,246 | 0,628 | 1,517 | 0,674 |
| 14 | 0,199 | 1,519 | 1,512 | 0,671 | 61 | 0,283 | 0,711 | 1,716 | 0,762 |
| 15 | 0,200 | 1,524 | 1,518 | 0,674 | B | Đáy kênh hạ lưu thấp so chân phím nước ra | | | |
| 16 | 0,200 | 1,534 | 1,527 | 0,678 | I | <i>Trường hợp P/W_u=0,44;</i> | | | |
| 17 | 0,202 | 1,497 | 1,490 | 0,662 | 62 | 0,035 | 0,309 | 0,308 | 0,137 |
| 18 | 0,220 | 1,665 | 1,658 | 0,736 | 63 | 0,048 | 0,414 | 0,412 | 0,183 |
| 19 | 0,247 | 1,767 | 1,760 | 0,781 | 64 | 0,063 | 0,525 | 0,523 | 0,232 |
| 20 | 0,278 | 2,037 | 2,028 | 0,900 | 65 | 0,075 | 0,625 | 0,622 | 0,276 |
| 21 | 0,284 | 2,013 | 2,004 | 0,890 | 66 | 0,089 | 0,731 | 0,728 | 0,323 |
| II | <i>Trường hợp P/W_u=0,69;</i> | | | | 67 | 0,104 | 0,842 | 0,838 | 0,372 |
| 22 | 0,045 | 0,209 | 0,326 | 0,145 | 68 | 0,120 | 0,957 | 0,953 | 0,423 |
| 23 | 0,045 | 0,211 | 0,329 | 0,146 | 69 | 0,136 | 1,068 | 1,064 | 0,472 |
| 24 | 0,050 | 0,227 | 0,354 | 0,157 | 70 | 0,167 | 1,276 | 1,270 | 0,564 |
| 25 | 0,053 | 0,235 | 0,366 | 0,163 | 71 | 0,202 | 1,512 | 1,505 | 0,668 |
| 26 | 0,053 | 0,236 | 0,367 | 0,163 | 72 | 0,249 | 1,771 | 1,763 | 0,783 |
| 27 | 0,053 | 0,236 | 0,368 | 0,163 | 73 | 0,285 | 1,977 | 1,968 | 0,874 |
| 28 | 0,055 | 0,249 | 0,388 | 0,172 | 74 | 0,300 | 2,085 | 2,076 | 0,922 |
| 29 | 0,062 | 0,275 | 0,428 | 0,190 | II | <i>Trường hợp P/W_u=0,69;</i> | | | |

| TT | q (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /W _u | TT | q (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /W _u |
|----|--------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 30 | 0,070 | 0,307 | 0,477 | 0,212 | 75 | 0,049 | 0,227 | 0,354 | 0,157 |
| 31 | 0,074 | 0,320 | 0,499 | 0,221 | 76 | 0,050 | 0,230 | 0,358 | 0,159 |
| 32 | 0,091 | 0,402 | 0,626 | 0,278 | 77 | 0,073 | 0,320 | 0,498 | 0,221 |
| 33 | 0,093 | 0,405 | 0,630 | 0,280 | 78 | 0,101 | 0,437 | 0,681 | 0,302 |
| 34 | 0,124 | 0,533 | 0,831 | 0,369 | 79 | 0,125 | 0,536 | 0,834 | 0,370 |
| 35 | 0,141 | 0,620 | 0,966 | 0,429 | 80 | 0,145 | 0,623 | 0,970 | 0,431 |
| 36 | 0,142 | 0,622 | 0,968 | 0,430 | 81 | 0,180 | 0,763 | 1,189 | 0,528 |
| 37 | 0,142 | 0,627 | 0,977 | 0,434 | 82 | 0,208 | 0,884 | 1,377 | 0,612 |
| 38 | 0,147 | 0,627 | 0,978 | 0,434 | 83 | 0,234 | 0,990 | 1,542 | 0,685 |
| 39 | 0,143 | 0,630 | 0,981 | 0,436 | 84 | 0,266 | 1,126 | 1,754 | 0,779 |
| 40 | 0,178 | 0,764 | 1,190 | 0,528 | 85 | 0,285 | 1,215 | 1,893 | 0,840 |
| 41 | 0,195 | 0,843 | 1,313 | 0,583 | 86 | 0,303 | 1,283 | 1,998 | 0,887 |
| 42 | 0,196 | 0,846 | 1,318 | 0,585 | III | Trường hợp P/W _u =1,07; | | | |
| 43 | 0,195 | 0,848 | 1,321 | 0,586 | 87 | 0,066 | 0,170 | 0,411 | 0,183 |
| 44 | 0,197 | 0,852 | 1,327 | 0,589 | 88 | 0,145 | 0,357 | 0,862 | 0,383 |
| 45 | 0,197 | 0,859 | 1,338 | 0,594 | 89 | 0,249 | 0,631 | 1,523 | 0,676 |
| 46 | 0,199 | 0,870 | 1,356 | 0,602 | 90 | 0,320 | 0,803 | 1,939 | 0,861 |

Bảng PL2-2 Kết quả thí nghiệm khả năng tháo khi tràn chảy ngập

| TT | h _n /H _{n0} | z/P | q (m ² /s) | H _{n0} /P | H _{n0} /W _u | σ _n |
|----|---------------------------------|-------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|
| 1 | -0,410 | 1,968 | 0,200 | 1,524 | 0,674 | 1,000 |
| 2 | -0,254 | 1,289 | 0,140 | 1,118 | 0,494 | 1,000 |
| 3 | -0,219 | 0,579 | 0,210 | 0,520 | 0,558 | 1,000 |
| 4 | -0,199 | 0,194 | 0,064 | 0,169 | 0,181 | 0,979 |
| 5 | -0,157 | 2,090 | 0,270 | 2,021 | 0,893 | 0,998 |
| 6 | -0,151 | 1,181 | 0,141 | 1,125 | 0,497 | 0,960 |
| 7 | -0,139 | 0,231 | 0,044 | 0,209 | 0,144 | 0,978 |
| 8 | -0,119 | 1,520 | 0,199 | 1,518 | 0,671 | 0,993 |
| 9 | -0,100 | 0,561 | 0,066 | 0,546 | 0,241 | 0,959 |
| 10 | -0,066 | 0,501 | 0,210 | 0,522 | 0,559 | 0,965 |
| 11 | -0,047 | 1,427 | 0,200 | 1,533 | 0,678 | 0,987 |
| 12 | -0,004 | 1,786 | 0,270 | 2,026 | 0,895 | 0,998 |
| 13 | -0,002 | 1,014 | 0,140 | 1,125 | 0,497 | 0,955 |
| 14 | 0,003 | 0,204 | 0,045 | 0,211 | 0,146 | 0,987 |
| 15 | 0,003 | 0,505 | 0,066 | 0,546 | 0,241 | 0,959 |
| 16 | 0,033 | 0,156 | 0,064 | 0,169 | 0,182 | 0,974 |
| 17 | 0,059 | 1,265 | 0,200 | 1,534 | 0,678 | 0,987 |

| TT | h_n/H_{n0} | z/P | q (m ² /s) | H_{n0}/P | H_{n0}/W_u | σ_n |
|----|--------------|-------|-------------------------|------------|--------------|------------|
| 18 | 0,124 | 1,167 | 0,200 | 1,536 | 0,679 | 0,985 |
| 19 | 0,191 | 0,802 | 0,141 | 1,131 | 0,500 | 0,955 |
| 20 | 0,208 | 0,371 | 0,216 | 0,541 | 0,579 | 0,960 |
| 21 | 0,210 | 0,371 | 0,210 | 0,537 | 0,576 | 0,937 |
| 22 | 0,227 | 0,124 | 0,064 | 0,171 | 0,183 | 0,965 |
| 23 | 0,272 | 0,148 | 0,045 | 0,213 | 0,147 | 0,981 |
| 24 | 0,281 | 0,932 | 0,201 | 1,545 | 0,683 | 0,983 |
| 25 | 0,364 | 0,310 | 0,210 | 0,569 | 0,610 | 0,882 |
| 26 | 0,400 | 0,567 | 0,141 | 1,134 | 0,501 | 0,952 |
| 27 | 0,431 | 0,275 | 0,064 | 0,548 | 0,242 | 0,926 |
| 28 | 0,446 | 0,088 | 0,064 | 0,173 | 0,186 | 0,947 |
| 29 | 0,474 | 0,635 | 0,199 | 1,542 | 0,681 | 0,978 |
| 30 | 0,518 | 0,583 | 0,201 | 1,573 | 0,695 | 0,967 |
| 31 | 0,530 | 0,096 | 0,045 | 0,218 | 0,151 | 0,950 |
| 32 | 0,561 | 0,386 | 0,141 | 1,138 | 0,503 | 0,949 |
| 33 | 0,574 | 0,196 | 0,215 | 0,585 | 0,627 | 0,879 |
| 34 | 0,621 | 0,059 | 0,064 | 0,176 | 0,189 | 0,927 |
| 35 | 0,646 | 0,528 | 0,278 | 2,172 | 0,960 | 0,956 |
| 36 | 0,701 | 0,243 | 0,141 | 1,176 | 0,520 | 0,917 |
| 37 | 0,701 | 0,144 | 0,217 | 0,648 | 0,694 | 0,796 |
| 38 | 0,723 | 0,126 | 0,064 | 0,582 | 0,257 | 0,870 |
| 39 | 0,756 | 0,244 | 0,200 | 1,664 | 0,735 | 0,906 |
| 40 | 0,758 | 0,038 | 0,064 | 0,190 | 0,204 | 0,840 |
| 41 | 0,811 | 0,032 | 0,064 | 0,209 | 0,224 | 0,749 |
| 42 | 0,827 | 0,085 | 0,217 | 0,745 | 0,799 | 0,688 |
| 43 | 0,837 | 0,113 | 0,141 | 1,298 | 0,574 | 0,827 |
| 44 | 0,844 | 0,115 | 0,199 | 1,724 | 0,762 | 0,871 |
| 45 | 0,851 | 0,031 | 0,045 | 0,253 | 0,175 | 0,799 |
| 46 | 0,860 | 0,060 | 0,064 | 0,662 | 0,292 | 0,761 |
| 47 | 0,878 | 0,075 | 0,199 | 1,808 | 0,799 | 0,828 |
| 48 | 0,888 | 0,045 | 0,278 | 2,343 | 1,036 | 0,883 |
| 49 | 0,892 | 0,054 | 0,217 | 0,857 | 0,919 | 0,594 |
| 50 | 0,913 | 0,043 | 0,217 | 0,907 | 0,972 | 0,560 |
| 51 | 0,929 | 0,025 | 0,064 | 0,774 | 0,342 | 0,645 |
| 52 | 0,938 | 0,020 | 0,141 | 1,597 | 0,706 | 0,666 |
| 53 | 0,957 | 0,007 | 0,064 | 0,314 | 0,337 | 0,503 |
| 54 | 0,984 | 0,001 | 0,045 | 0,389 | 0,269 | 0,510 |

Phụ lục 3. KHẢO SÁT CÁC DẠNG HÀM CỦA PHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM (3.6) KHI $H_0/W_0 > 0,5$

Để lựa chọn công thức phù hợp các dạng đa thức tuyến tính, phi tuyến hoặc hàm mũ được sử dụng và tuyến tính hóa bởi toán học giải tích, thu được các phương trình:

a. Dạng hàm mũ: $C_d = a_0 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{a_1} \left(\frac{H_0}{W_u}\right)^{a_2}$ (PL3-1)

b. Dạng hàm đa thức:

$$C_d = b_0 + b_1 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{\beta_1} + b_2 \left(\frac{H_0}{W_u}\right)^{\beta_2} + b_3 \left(\frac{H_0}{P} \cdot \frac{H_0}{W_u}\right)^{\beta_3}$$
 (PL3-2)

c. Dạng hàm Hypebol bội:

$$C_d = c_0 + c_1/(H_0/P) + c_2/(H_0/W_u)$$
 (PL3-3)

d. Dạng hàm tuyến tính đa biến:

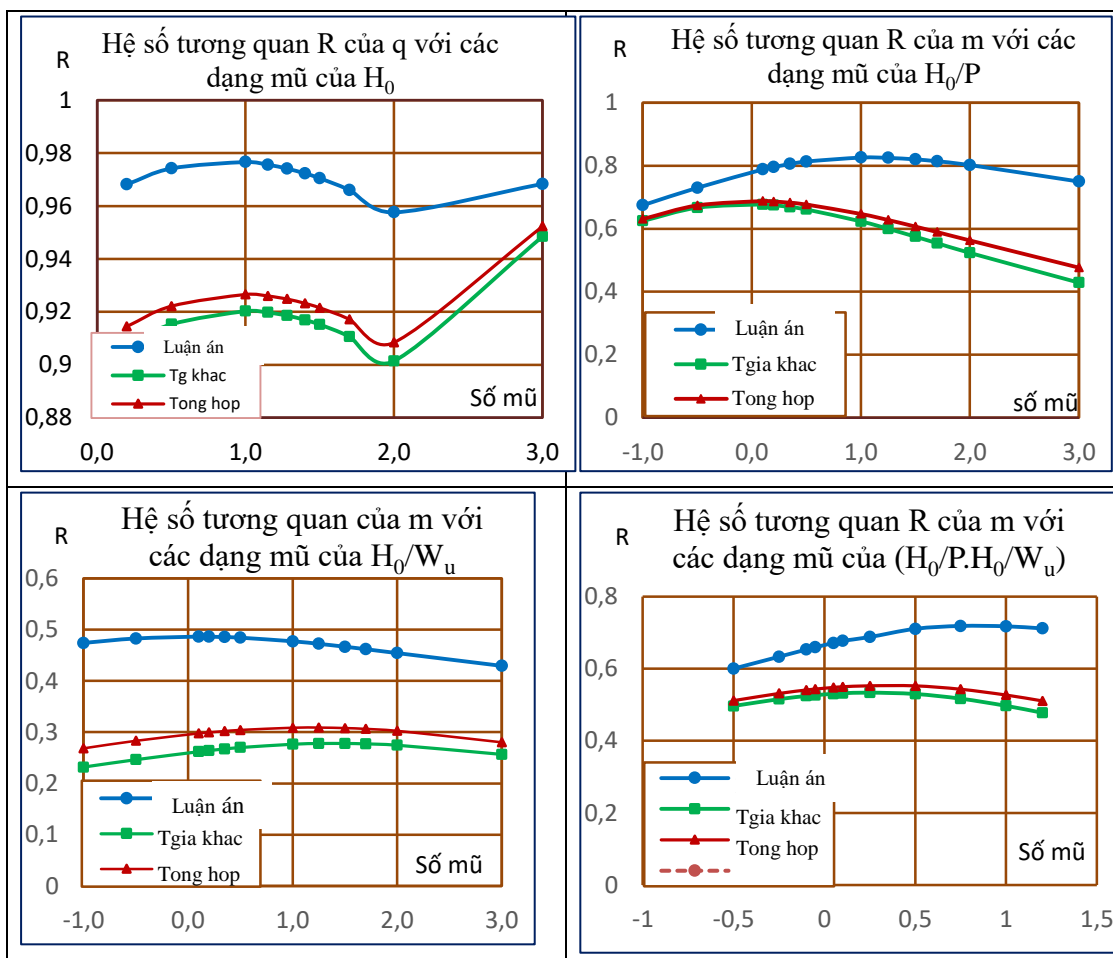
$$C_d = d_0 + d_1.(H_0/P) + d_2.(H_0/W_u)$$
 (PL3-4)

Các hệ số của công thức thực nghiệm được xác định theo phương pháp phân tích hồi quy tuyến tính, cực tiểu bình phương sai số thu được kết quả ghi ở Bảng PL3-1.

Các hệ số mũ của phương trình (PL3-2) được xác định qua đánh giá tương quan giữa C_d và hệ số mũ của các đại lượng kết quả thu được $\beta_1=0,5$; $\beta_2=1,0$; $\beta_3=0,5$ là các giá trị cho hệ số tương quan lớn nhất (Hình PL3-1).

Bảng PL3-1. Các hệ số của hàm thực nghiệm trong các công thức thực nghiệm

| Công thức | Dạng hàm của m | Hệ số của các hàm thực nghiệm | | | |
|-----------|------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Hệ số thứ 1 | Hệ số thứ 2 | Hệ số thứ 3 | Hệ số thứ 4 |
| (PL3-1) | Hàm mũ | 0,705 | -0,306 | -0,150 | |
| (PL3-2) | Hàm đa thức | 2,262 | -2,299 | -1,667 | 2,325 |
| (PL3-3) | Hàm Hypebol bội | 0,466 | 0,189 | 0,052 | |
| (PL3-4) | Hàm tuyến tính đa biến | 1,149 | -0,159 | -0,318 | |



Hình PL 3-1. Hệ số tương quan của các đại lượng với số mũ khác nhau

Thay các hệ số từ Bảng PL 3-1 vào các phương trình thu được các công thức xác định hệ số tháo qua tràn piano:

a. Dạng hàm mũ: $C_d = 0,705 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{-0,306} \left(\frac{H_0}{W_u}\right)^{-0,150}$ (PL3-5)

b. Dạng hàm đa thức:

$$C_d = 2,262 - 2,299 \left(\frac{H_0}{P}\right)^{0,5} - 1,667 \left(\frac{H_0}{W_u}\right) + 2,325 \left(\frac{H_0}{P} \cdot \frac{H_0}{W_u}\right)^{0,5}$$
 (PL3-6)

c. Dạng hàm Hypebol bội:

$$C_d = 0,466 + \frac{0,189}{(H_0/P)} + \frac{0,052}{(H_0/W_u)}$$
 (PL3-7)

d. Dạng hàm tuyến tính đa biến:

$$C_d = 1,149 - 0,159 \frac{H_0}{P} - 0,318 \frac{H_0}{W_u}$$
 (PL3-8)

So sánh kết quả tính theo công thức thực nghiệm thu được và số liệu thực nghiệm, trình bày trong Bảng PL3-2.

Bảng PL3-2 Đánh giá sai số giữa tính toán theo công thức thực nghiệm và số liệu thí nghiệm của luận án và các nghiên cứu khác

| TT | Dạng công thức | Sai số | Tập XD | Tập kiểm nghiệm -loại A | | | Tập kiểm nghiệm - loại B | |
|----|---|--------|---------|-------------------------|---------|-------------|--------------------------|---------|
| | | | Luận án | N.T. Hai | A. Noui | O.Ma chiels | N.T. Hai | A. Noui |
| 1 | Hàm mũ, công thức (PL3-1) | Tb | 3% | 6% | 3% | 4% | 5% | 3% |
| | | max | 7% | 13% | 6% | 9% | 10% | 8% |
| | | min | -7% | -11% | 1% | 0% | -13% | -9% |
| 2 | Hàm đa thức, công thức (PL3-2) | Tb | 1% | 5% | 4% | 5% | 8% | 3% |
| | | max | 3% | 22% | 13% | 13% | 37% | 9% |
| | | min | -3% | -9% | -2% | -28% | -11% | -9% |
| 3 | Hàm hypebol bội, công thức (PL3-3) | Tb | 2% | 5% | 4% | 9% | 6% | 3% |
| | | max | 4% | 14% | 9% | 12% | 12% | 10% |
| | | min | -5% | -11% | -3% | -46% | -16% | -5% |
| 4 | Hàm tuyến tính đa biến, công thức (PL3-4) | Tb | 6% | 9% | 6% | 12% | 11% | 6% |
| | | max | 14% | 35% | 27% | 38% | 29% | 21% |
| | | min | -10% | -21% | -4% | -22% | -23% | -6% |

Ghi chú: tb/max/min: là sai số tuyệt đối trung bình/sai số lớn nhất/sai số nhỏ nhất, trong đó, sai số = $(q_{TT}-q_{TN})/q_{TN} \%$;

Từ Bảng PL3-2 cho thấy công thức hàm mũ (PL3-1) cho sai số nhỏ nhất giữa tính toán và thực nghiệm, có hệ số tương quan rất tốt, $R=0,985$; $S=0,039$.

Phụ lục 4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN SAI SỐ CHI TIẾT

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|------------|---|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| I | TẬP XÂY DỰNG CÔNG THỨC | | | | | | | | | | | |
| I.1 | Khi H₀/W_o<0,5 | | | | | | | | | | | |
| N124 | 0,034 | 0,035 | 0,309 | 0,31 | 0,03 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,249 | 1,306 | 0,036 | -4,5 |
| N111 | 0,034 | 0,035 | 0,31 | 0,31 | 0,03 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,247 | 1,305 | 0,037 | -4,6 |
| N77 | 0,036 | 0,045 | 0,21 | 0,33 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,470 | 1,480 | 0,045 | -0,7 |
| N80 | 0,037 | 0,045 | 0,21 | 0,33 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,457 | 1,476 | 0,046 | -1,3 |
| N99 | 0,039 | 0,049 | 0,23 | 0,35 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,434 | 1,445 | 0,050 | -0,8 |
| N92 | 0,039 | 0,050 | 0,23 | 0,35 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,444 | 1,445 | 0,050 | -0,1 |
| N98 | 0,040 | 0,050 | 0,23 | 0,36 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,430 | 1,441 | 0,050 | -0,7 |
| N22 | 0,041 | 0,053 | 0,23 | 0,37 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,451 | 1,430 | 0,052 | 1,5 |
| N24 | 0,041 | 0,053 | 0,24 | 0,37 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,446 | 1,429 | 0,052 | 1,2 |
| N25 | 0,041 | 0,053 | 0,24 | 0,37 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,441 | 1,428 | 0,052 | 0,9 |
| N93 | 0,043 | 0,055 | 0,25 | 0,39 | 0,03 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,400 | 1,403 | 0,056 | -0,2 |
| N63 | 0,045 | 0,064 | 0,17 | 0,41 | 0,04 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,510 | 1,543 | 0,066 | -2,2 |
| N142 | 0,045 | 0,065 | 0,17 | 0,41 | 0,04 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,526 | 1,541 | 0,066 | -1,0 |
| N62 | 0,045 | 0,064 | 0,17 | 0,41 | 0,04 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,500 | 1,541 | 0,066 | -2,7 |
| N125 | 0,045 | 0,048 | 0,41 | 0,41 | 0,04 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,120 | 1,114 | 0,048 | 0,5 |
| N149 | 0,046 | 0,066 | 0,17 | 0,41 | 0,04 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,530 | 1,540 | 0,067 | -0,6 |
| N112 | 0,046 | 0,048 | 0,41 | 0,41 | 0,04 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,117 | 1,109 | 0,048 | 0,7 |
| N94 | 0,048 | 0,062 | 0,27 | 0,43 | 0,04 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,351 | 1,353 | 0,062 | -0,2 |
| N26 | 0,051 | 0,053 | 0,46 | 0,46 | 0,04 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,022 | 1,014 | 0,052 | 0,8 |
| N89 | 0,053 | 0,070 | 0,31 | 0,48 | 0,04 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,291 | 1,292 | 0,070 | -0,1 |
| N100 | 0,055 | 0,073 | 0,32 | 0,50 | 0,04 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,274 | 1,265 | 0,073 | 0,7 |
| N95 | 0,055 | 0,074 | 0,32 | 0,50 | 0,04 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,278 | 1,265 | 0,073 | 1,0 |
| I.2 | Khi H₀/W_o>0,5 | | | | | | | | | | | |
| N126 | 0,058 | 0,063 | 0,53 | 0,52 | 0,05 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,012 | 1,068 | 0,066 | -5,5 |
| N113 | 0,058 | 0,063 | 0,53 | 0,52 | 0,05 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 1,014 | 1,068 | 0,066 | -5,4 |
| N53 | 0,060 | 0,064 | 0,54 | 0,54 | 0,05 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,985 | 1,053 | 0,068 | -6,9 |
| N143 | 0,065 | 0,097 | 0,24 | 0,59 | 0,05 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,307 | 1,327 | 0,098 | -1,5 |
| N114 | 0,069 | 0,075 | 0,63 | 0,62 | 0,06 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,933 | 0,987 | 0,079 | -5,8 |
| N127 | 0,069 | 0,077 | 0,63 | 0,63 | 0,06 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,944 | 0,985 | 0,080 | -4,3 |
| N3 | 0,070 | 0,091 | 0,40 | 0,63 | 0,06 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,115 | 1,128 | 0,092 | -1,2 |
| N135 | 0,070 | 0,093 | 0,40 | 0,63 | 0,06 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,128 | 1,125 | 0,092 | 0,3 |
| N107 | 0,076 | 0,101 | 0,44 | 0,68 | 0,06 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,097 | 1,086 | 0,100 | 1,0 |
| N128 | 0,080 | 0,089 | 0,72 | 0,72 | 0,06 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,890 | 0,924 | 0,092 | -3,7 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W ₀ | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| N115 | 0,081 | 0,089 | 0,73 | 0,73 | 0,06 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,877 | 0,919 | 0,093 | -4,8 |
| N136 | 0,092 | 0,124 | 0,53 | 0,83 | 0,07 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,003 | 0,992 | 0,123 | 1,1 |
| N106 | 0,093 | 0,125 | 0,54 | 0,83 | 0,07 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 1,004 | 0,990 | 0,124 | 1,3 |
| N116 | 0,093 | 0,104 | 0,84 | 0,84 | 0,07 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,826 | 0,862 | 0,108 | -4,3 |
| N144 | 0,096 | 0,145 | 0,36 | 0,86 | 0,08 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,105 | 1,116 | 0,146 | -1,0 |
| N150 | 0,096 | 0,145 | 0,36 | 0,86 | 0,08 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 1,109 | 1,115 | 0,146 | -0,6 |
| N129 | 0,105 | 0,120 | 0,95 | 0,95 | 0,08 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,792 | 0,814 | 0,123 | -2,8 |
| N117 | 0,106 | 0,120 | 0,96 | 0,95 | 0,08 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,789 | 0,813 | 0,124 | -2,9 |
| N16 | 0,107 | 0,141 | 0,62 | 0,97 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,906 | 0,926 | 0,144 | -2,2 |
| N15 | 0,107 | 0,142 | 0,62 | 0,97 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,913 | 0,925 | 0,144 | -1,3 |
| N101 | 0,108 | 0,145 | 0,62 | 0,97 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,926 | 0,924 | 0,145 | 0,2 |
| N21 | 0,108 | 0,142 | 0,63 | 0,98 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,900 | 0,921 | 0,146 | -2,4 |
| N137 | 0,109 | 0,147 | 0,63 | 0,98 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,926 | 0,921 | 0,146 | 0,6 |
| N19 | 0,109 | 0,143 | 0,63 | 0,98 | 0,09 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,895 | 0,919 | 0,146 | -2,7 |
| N118 | 0,118 | 0,136 | 1,07 | 1,06 | 0,09 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,756 | 0,773 | 0,139 | -2,2 |
| N130 | 0,118 | 0,137 | 1,07 | 1,07 | 0,09 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,757 | 0,772 | 0,139 | -2,0 |
| N44 | 0,124 | 0,140 | 1,12 | 1,11 | 0,10 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,728 | 0,757 | 0,146 | -4,0 |
| N46 | 0,124 | 0,141 | 1,12 | 1,12 | 0,10 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,725 | 0,755 | 0,147 | -4,1 |
| N45 | 0,124 | 0,140 | 1,13 | 1,12 | 0,10 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,721 | 0,755 | 0,147 | -4,8 |
| N105 | 0,132 | 0,180 | 0,76 | 1,19 | 0,11 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,846 | 0,842 | 0,179 | 0,4 |
| N138 | 0,132 | 0,178 | 0,76 | 1,19 | 0,11 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,839 | 0,842 | 0,179 | -0,4 |
| N145 | 0,139 | 0,206 | 0,52 | 1,25 | 0,11 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,897 | 0,941 | 0,216 | -4,9 |
| N69 | 0,139 | 0,210 | 0,52 | 1,26 | 0,11 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,910 | 0,940 | 0,217 | -3,3 |
| N131 | 0,140 | 0,166 | 1,27 | 1,26 | 0,11 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,713 | 0,714 | 0,166 | -0,2 |
| N119 | 0,141 | 0,167 | 1,28 | 1,27 | 0,11 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,711 | 0,713 | 0,167 | -0,3 |
| N11 | 0,146 | 0,195 | 0,84 | 1,31 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,792 | 0,805 | 0,198 | -1,6 |
| N8 | 0,146 | 0,196 | 0,85 | 1,32 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,791 | 0,804 | 0,199 | -1,6 |
| N10 | 0,147 | 0,195 | 0,85 | 1,32 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,785 | 0,803 | 0,200 | -2,2 |
| N9 | 0,147 | 0,197 | 0,85 | 1,33 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,787 | 0,801 | 0,201 | -1,8 |
| N12 | 0,149 | 0,197 | 0,86 | 1,34 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,778 | 0,798 | 0,202 | -2,5 |
| N13 | 0,150 | 0,199 | 0,87 | 1,36 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,771 | 0,793 | 0,205 | -2,9 |
| N14 | 0,151 | 0,197 | 0,87 | 1,36 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,756 | 0,792 | 0,206 | -4,8 |
| N102 | 0,153 | 0,208 | 0,88 | 1,38 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,785 | 0,788 | 0,209 | -0,3 |
| N139 | 0,153 | 0,206 | 0,88 | 1,38 | 0,12 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,778 | 0,788 | 0,209 | -1,2 |
| N132 | 0,165 | 0,202 | 1,50 | 1,49 | 0,13 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,678 | 0,663 | 0,197 | 2,3 |
| N120 | 0,167 | 0,202 | 1,51 | 1,50 | 0,13 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,670 | 0,660 | 0,200 | 1,5 |
| N38 | 0,168 | 0,199 | 1,52 | 1,51 | 0,13 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,654 | 0,658 | 0,200 | -0,6 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{in} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-------------|---|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| N146 | 0,168 | 0,246 | 0,63 | 1,52 | 0,13 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,804 | 0,862 | 0,264 | -7,2 |
| N30 | 0,168 | 0,200 | 1,52 | 1,52 | 0,13 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,654 | 0,657 | 0,201 | -0,5 |
| N151 | 0,169 | 0,249 | 0,63 | 1,52 | 0,14 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,810 | 0,860 | 0,265 | -6,3 |
| N32 | 0,170 | 0,200 | 1,53 | 1,53 | 0,14 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,646 | 0,655 | 0,203 | -1,4 |
| N104 | 0,171 | 0,234 | 0,99 | 1,54 | 0,14 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,745 | 0,748 | 0,235 | -0,5 |
| N97 | 0,184 | 0,220 | 1,67 | 1,66 | 0,15 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,630 | 0,631 | 0,221 | -0,2 |
| N147 | 0,191 | 0,283 | 0,71 | 1,72 | 0,15 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,768 | 0,815 | 0,300 | -6,0 |
| N140 | 0,193 | 0,256 | 1,11 | 1,74 | 0,15 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,682 | 0,709 | 0,266 | -3,9 |
| N103 | 0,195 | 0,266 | 1,13 | 1,75 | 0,16 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,699 | 0,705 | 0,269 | -1,0 |
| N133 | 0,195 | 0,247 | 1,77 | 1,76 | 0,16 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,645 | 0,614 | 0,235 | 4,8 |
| N121 | 0,196 | 0,249 | 1,77 | 1,76 | 0,16 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,649 | 0,614 | 0,235 | 5,4 |
| N96 | 0,196 | 0,265 | 1,13 | 1,77 | 0,16 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,688 | 0,703 | 0,271 | -2,2 |
| N109 | 0,210 | 0,285 | 1,22 | 1,89 | 0,17 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,669 | 0,681 | 0,291 | -1,8 |
| N148 | 0,213 | 0,314 | 0,79 | 1,92 | 0,17 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,722 | 0,775 | 0,337 | -7,3 |
| N152 | 0,215 | 0,320 | 0,80 | 1,94 | 0,17 | 1,07 | 1,25 | 5,00 | 0,722 | 0,771 | 0,341 | -6,7 |
| N122 | 0,218 | 0,285 | 1,98 | 1,97 | 0,17 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,630 | 0,584 | 0,264 | 7,4 |
| N90 | 0,221 | 0,290 | 1,28 | 1,99 | 0,18 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,632 | 0,666 | 0,306 | -5,5 |
| N141 | 0,221 | 0,292 | 1,28 | 1,99 | 0,18 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,634 | 0,666 | 0,306 | -5,1 |
| N108 | 0,222 | 0,303 | 1,28 | 2,00 | 0,18 | 0,69 | 1,25 | 5,00 | 0,654 | 0,665 | 0,308 | -1,6 |
| N134 | 0,222 | 0,284 | 2,01 | 2,00 | 0,18 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,611 | 0,579 | 0,269 | 5,3 |
| N40 | 0,223 | 0,270 | 2,02 | 2,01 | 0,18 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,577 | 0,578 | 0,270 | -0,2 |
| N123 | 0,230 | 0,300 | 2,09 | 2,08 | 0,18 | 0,44 | 1,25 | 5,00 | 0,613 | 0,570 | 0,279 | 7,1 |
| II | TẬP DỮ LIỆU KIỂM ĐỊNH (LA, N.T.Hai; Noui W_i/W_o=1; O.Machiels P/W_u=0,33;0,5;1) | | | | | | | | | | | |
| II.1 | ĐỀ TÀI CẤP BỘ | | | | | | | | | | | |
| D99 | 0,032 | 0,034 | 0,24 | 0,23 | 0,03 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 1,355 | 1,425 | 0,035 | -5,2 |
| D133 | 0,032 | 0,034 | 0,27 | 0,23 | 0,03 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 1,326 | 1,364 | 0,035 | -2,8 |
| D167 | 0,033 | 0,030 | 0,37 | 0,24 | 0,03 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 1,148 | 1,188 | 0,031 | -3,5 |
| D65 | 0,048 | 0,060 | 0,30 | 0,35 | 0,05 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 1,301 | 1,305 | 0,060 | -0,3 |
| D100 | 0,049 | 0,055 | 0,37 | 0,36 | 0,05 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 1,151 | 1,170 | 0,056 | -1,6 |
| D134 | 0,050 | 0,056 | 0,43 | 0,36 | 0,05 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 1,121 | 1,070 | 0,053 | 4,6 |
| D168 | 0,051 | 0,048 | 0,58 | 0,37 | 0,05 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,938 | 0,798 | 0,041 | 15,0 |
| D66 | 0,065 | 0,078 | 0,40 | 0,47 | 0,06 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 1,060 | 1,093 | 0,081 | -3,2 |
| D101 | 0,067 | 0,078 | 0,51 | 0,49 | 0,07 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 1,013 | 0,903 | 0,070 | 10,9 |
| D56 | 0,035 | 0,042 | 0,19 | 0,26 | 0,03 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 1,443 | 1,508 | 0,044 | -4,5 |
| D91 | 0,036 | 0,043 | 0,24 | 0,26 | 0,03 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 1,395 | 1,421 | 0,043 | -1,8 |
| D125 | 0,037 | 0,043 | 0,27 | 0,27 | 0,03 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 1,368 | 1,361 | 0,042 | 0,5 |
| D159 | 0,037 | 0,037 | 0,37 | 0,27 | 0,03 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 1,156 | 1,186 | 0,038 | -2,6 |
| D57 | 0,055 | 0,069 | 0,30 | 0,40 | 0,05 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 1,224 | 1,300 | 0,074 | -6,2 |
| D92 | 0,056 | 0,070 | 0,37 | 0,41 | 0,05 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 1,179 | 1,161 | 0,069 | 1,5 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| D126 | 0,058 | 0,070 | 0,43 | 0,42 | 0,05 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 1,143 | 1,062 | 0,065 | 7,1 |
| D151 | 0,039 | 0,042 | 0,38 | 0,35 | 0,04 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 1,254 | 1,163 | 0,039 | 7,2 |
| D135 | 0,069 | 0,079 | 0,59 | 0,50 | 0,07 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 0,985 | 1,035 | 0,083 | -5,1 |
| D169 | 0,070 | 0,069 | 0,79 | 0,51 | 0,07 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,842 | 0,942 | 0,077 | -11,9 |
| D67 | 0,083 | 0,100 | 0,51 | 0,60 | 0,08 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 0,950 | 1,051 | 0,111 | -10,7 |
| D102 | 0,086 | 0,101 | 0,65 | 0,62 | 0,09 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 0,909 | 0,972 | 0,108 | -6,9 |
| D136 | 0,088 | 0,101 | 0,75 | 0,64 | 0,09 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 0,876 | 0,928 | 0,107 | -5,9 |
| D170 | 0,089 | 0,089 | 1,01 | 0,65 | 0,09 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,756 | 0,845 | 0,099 | -11,7 |
| D68 | 0,101 | 0,123 | 0,62 | 0,73 | 0,10 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 0,872 | 0,961 | 0,136 | -10,2 |
| D103 | 0,104 | 0,123 | 0,79 | 0,76 | 0,10 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 0,829 | 0,890 | 0,132 | -7,3 |
| D137 | 0,106 | 0,123 | 0,91 | 0,77 | 0,11 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 0,801 | 0,849 | 0,131 | -6,0 |
| D171 | 0,108 | 0,109 | 1,22 | 0,78 | 0,11 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,698 | 0,774 | 0,121 | -10,9 |
| D69 | 0,137 | 0,172 | 0,85 | 1,00 | 0,14 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 0,768 | 0,835 | 0,187 | -8,6 |
| D104 | 0,142 | 0,174 | 1,08 | 1,03 | 0,14 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 0,733 | 0,771 | 0,183 | -5,3 |
| D172 | 0,146 | 0,153 | 1,66 | 1,06 | 0,14 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,621 | 0,674 | 0,166 | -8,6 |
| D138 | 0,146 | 0,175 | 1,24 | 1,06 | 0,14 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 0,710 | 0,736 | 0,182 | -3,6 |
| D70 | 0,172 | 0,218 | 1,07 | 1,25 | 0,17 | 0,53 | 1,20 | 3,33 | 0,687 | 0,752 | 0,238 | -9,4 |
| D105 | 0,179 | 0,222 | 1,35 | 1,30 | 0,18 | 0,44 | 1,20 | 3,33 | 0,661 | 0,695 | 0,233 | -5,2 |
| D139 | 0,183 | 0,224 | 1,56 | 1,33 | 0,18 | 0,39 | 1,20 | 3,33 | 0,643 | 0,663 | 0,230 | -3,1 |
| D173 | 0,185 | 0,203 | 2,10 | 1,34 | 0,18 | 0,29 | 1,20 | 3,33 | 0,576 | 0,605 | 0,213 | -5,0 |
| D58 | 0,075 | 0,096 | 0,40 | 0,54 | 0,07 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 1,070 | 1,147 | 0,103 | -7,2 |
| D93 | 0,077 | 0,098 | 0,51 | 0,56 | 0,07 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 1,027 | 1,060 | 0,101 | -3,2 |
| D127 | 0,079 | 0,098 | 0,59 | 0,57 | 0,07 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 0,997 | 1,013 | 0,099 | -1,7 |
| D161 | 0,080 | 0,083 | 0,79 | 0,58 | 0,07 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 0,837 | 0,925 | 0,092 | -10,5 |
| D59 | 0,095 | 0,125 | 0,52 | 0,69 | 0,09 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 0,968 | 1,027 | 0,133 | -6,1 |
| D94 | 0,098 | 0,126 | 0,65 | 0,72 | 0,09 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 0,922 | 0,950 | 0,130 | -3,0 |
| D128 | 0,101 | 0,126 | 0,75 | 0,73 | 0,09 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 0,893 | 0,907 | 0,128 | -1,6 |
| D162 | 0,101 | 0,107 | 1,01 | 0,73 | 0,09 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 0,754 | 0,829 | 0,118 | -10,0 |
| D60 | 0,116 | 0,155 | 0,63 | 0,84 | 0,10 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 0,889 | 0,938 | 0,164 | -5,5 |
| D95 | 0,120 | 0,155 | 0,80 | 0,87 | 0,11 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 0,842 | 0,868 | 0,160 | -3,1 |
| D163 | 0,122 | 0,132 | 1,22 | 0,89 | 0,11 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 0,696 | 0,760 | 0,144 | -9,2 |
| D129 | 0,123 | 0,155 | 0,92 | 0,89 | 0,11 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 0,812 | 0,828 | 0,158 | -2,0 |
| D61 | 0,157 | 0,212 | 0,85 | 1,14 | 0,14 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 0,774 | 0,817 | 0,224 | -5,6 |
| D96 | 0,163 | 0,213 | 1,08 | 1,18 | 0,15 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 0,735 | 0,756 | 0,219 | -2,8 |
| D164 | 0,166 | 0,187 | 1,66 | 1,21 | 0,15 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 0,622 | 0,661 | 0,198 | -6,1 |
| D130 | 0,168 | 0,213 | 1,25 | 1,22 | 0,15 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 0,702 | 0,719 | 0,219 | -2,4 |
| D62 | 0,198 | 0,271 | 1,07 | 1,44 | 0,18 | 0,61 | 1,20 | 3,65 | 0,696 | 0,735 | 0,286 | -5,5 |
| D97 | 0,204 | 0,269 | 1,35 | 1,48 | 0,18 | 0,50 | 1,20 | 3,65 | 0,660 | 0,681 | 0,278 | -3,2 |
| D131 | 0,209 | 0,269 | 1,56 | 1,52 | 0,19 | 0,44 | 1,20 | 3,65 | 0,639 | 0,651 | 0,274 | -1,9 |
| D165 | 0,210 | 0,244 | 2,09 | 1,53 | 0,19 | 0,33 | 1,20 | 3,65 | 0,574 | 0,594 | 0,253 | -3,5 |
| D152 | 0,060 | 0,066 | 0,60 | 0,55 | 0,06 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 1,009 | 1,017 | 0,066 | -0,8 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| D153 | 0,082 | 0,090 | 0,81 | 0,75 | 0,08 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 0,869 | 0,883 | 0,092 | -1,6 |
| D154 | 0,104 | 0,115 | 1,03 | 0,94 | 0,10 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 0,777 | 0,793 | 0,117 | -2,1 |
| D155 | 0,126 | 0,141 | 1,25 | 1,14 | 0,12 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 0,713 | 0,727 | 0,144 | -1,9 |
| D156 | 0,171 | 0,200 | 1,70 | 1,56 | 0,16 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 0,638 | 0,631 | 0,198 | 1,1 |
| D157 | 0,215 | 0,259 | 2,13 | 1,96 | 0,21 | 0,42 | 1,20 | 4,33 | 0,585 | 0,569 | 0,251 | 2,8 |
| D141 | 0,043 | 0,046 | 0,40 | 0,55 | 0,04 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 1,172 | 1,152 | 0,045 | 1,7 |
| D142 | 0,067 | 0,075 | 0,62 | 0,85 | 0,06 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,977 | 0,939 | 0,072 | 3,9 |
| D109 | 0,090 | 0,114 | 0,62 | 1,14 | 0,09 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,960 | 0,898 | 0,107 | 6,4 |
| D143 | 0,091 | 0,110 | 0,84 | 1,16 | 0,09 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,903 | 0,817 | 0,100 | 9,6 |
| D75 | 0,110 | 0,144 | 0,68 | 1,40 | 0,11 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,892 | 0,849 | 0,137 | 4,9 |
| D110 | 0,114 | 0,147 | 0,79 | 1,45 | 0,11 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,863 | 0,805 | 0,137 | 6,7 |
| D144 | 0,116 | 0,141 | 1,07 | 1,47 | 0,11 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,806 | 0,733 | 0,128 | 9,1 |
| D76 | 0,133 | 0,187 | 0,82 | 1,69 | 0,13 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,876 | 0,780 | 0,167 | 11,0 |
| D111 | 0,137 | 0,191 | 0,95 | 1,75 | 0,13 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,847 | 0,740 | 0,167 | 12,6 |
| D145 | 0,140 | 0,171 | 1,29 | 1,78 | 0,13 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,737 | 0,672 | 0,156 | 8,8 |
| D77 | 0,154 | 0,215 | 0,95 | 1,97 | 0,15 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,800 | 0,727 | 0,196 | 9,1 |
| D112 | 0,160 | 0,219 | 1,11 | 2,03 | 0,15 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,777 | 0,691 | 0,195 | 11,0 |
| D146 | 0,163 | 0,200 | 1,51 | 2,08 | 0,16 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,685 | 0,626 | 0,183 | 8,5 |
| D78 | 0,176 | 0,244 | 1,09 | 2,25 | 0,17 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,744 | 0,684 | 0,225 | 8,0 |
| D113 | 0,182 | 0,249 | 1,26 | 2,32 | 0,18 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,723 | 0,651 | 0,224 | 10,0 |
| D147 | 0,186 | 0,229 | 1,72 | 2,37 | 0,18 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,644 | 0,590 | 0,210 | 8,4 |
| D79 | 0,198 | 0,272 | 1,22 | 2,52 | 0,19 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,697 | 0,649 | 0,253 | 6,8 |
| D114 | 0,203 | 0,276 | 1,41 | 2,59 | 0,20 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,680 | 0,619 | 0,252 | 9,0 |
| D148 | 0,209 | 0,259 | 1,94 | 2,66 | 0,20 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,613 | 0,560 | 0,237 | 8,6 |
| D80 | 0,220 | 0,303 | 1,36 | 2,80 | 0,21 | 0,94 | 1,20 | 6,00 | 0,663 | 0,619 | 0,283 | 6,6 |
| D115 | 0,226 | 0,307 | 1,57 | 2,87 | 0,22 | 0,83 | 1,20 | 6,00 | 0,647 | 0,590 | 0,280 | 8,8 |
| D149 | 0,232 | 0,291 | 2,15 | 2,96 | 0,22 | 0,63 | 1,20 | 6,00 | 0,588 | 0,533 | 0,264 | 9,3 |
| II.2 | A. NOUI VÀ CS | | | | | | | | | | | |
| No2 | 0,035 | 0,044 | 0,23 | 0,41 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,533 | 1,433 | 0,041 | 6,6 |
| No3 | 0,041 | 0,054 | 0,27 | 0,48 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,480 | 1,354 | 0,049 | 8,5 |
| No4 | 0,046 | 0,061 | 0,31 | 0,54 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,391 | 1,288 | 0,056 | 7,4 |
| No5 | 0,053 | 0,068 | 0,35 | 0,63 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,259 | 1,193 | 0,065 | 5,2 |
| No6 | 0,057 | 0,074 | 0,38 | 0,67 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,218 | 1,140 | 0,069 | 6,5 |
| No7 | 0,059 | 0,077 | 0,39 | 0,70 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,203 | 1,116 | 0,071 | 7,2 |
| No8 | 0,071 | 0,089 | 0,47 | 0,83 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,076 | 1,010 | 0,084 | 6,1 |
| No9 | 0,077 | 0,095 | 0,51 | 0,90 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,016 | 0,973 | 0,091 | 4,2 |
| No10 | 0,080 | 0,100 | 0,53 | 0,94 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,007 | 0,956 | 0,095 | 5,0 |
| No11 | 0,085 | 0,106 | 0,57 | 1,00 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,972 | 0,929 | 0,102 | 4,5 |
| No12 | 0,091 | 0,113 | 0,61 | 1,07 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,933 | 0,900 | 0,109 | 3,5 |
| No13 | 0,093 | 0,114 | 0,62 | 1,09 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,913 | 0,891 | 0,112 | 2,4 |
| No14 | 0,098 | 0,121 | 0,65 | 1,15 | 0,10 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,890 | 0,870 | 0,118 | 2,2 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| No15 | 0,102 | 0,126 | 0,68 | 1,20 | 0,10 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,876 | 0,854 | 0,123 | 2,5 |
| No16 | 0,112 | 0,138 | 0,75 | 1,32 | 0,11 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,829 | 0,818 | 0,136 | 1,4 |
| No17 | 0,117 | 0,144 | 0,78 | 1,38 | 0,12 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,809 | 0,801 | 0,143 | 1,0 |
| No18 | 0,123 | 0,151 | 0,82 | 1,45 | 0,13 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,788 | 0,783 | 0,150 | 0,7 |
| No19 | 0,130 | 0,163 | 0,86 | 1,53 | 0,13 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,789 | 0,765 | 0,158 | 3,0 |
| No20 | 0,136 | 0,170 | 0,90 | 1,60 | 0,14 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,770 | 0,750 | 0,166 | 2,7 |
| II.3 | O. MACHIELS VÀ CS | | | | | | | | | | | |
| Ma5 | 0,038 | 0,039 | 0,38 | 0,32 | 0,03 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 1,169 | 1,175 | 0,039 | -0,5 |
| Ma6 | 0,042 | 0,043 | 0,42 | 0,35 | 0,03 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 1,120 | 1,102 | 0,043 | 1,6 |
| Ma7 | 0,053 | 0,054 | 0,53 | 0,44 | 0,04 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 1,005 | 0,909 | 0,049 | 9,6 |
| Ma9 | 0,058 | 0,055 | 0,58 | 0,48 | 0,04 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,900 | 0,821 | 0,050 | 8,7 |
| Ma21 6 | 0,035 | 0,053 | 0,06 | 0,29 | 0,02 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,878 | 1,755 | 0,050 | 6,5 |
| Ma21 7 | 0,045 | 0,076 | 0,08 | 0,38 | 0,03 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,779 | 1,714 | 0,073 | 3,7 |
| Ma21 8 | 0,053 | 0,093 | 0,09 | 0,44 | 0,04 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,709 | 1,685 | 0,091 | 1,4 |
| Ma21 9 | 0,054 | 0,097 | 0,09 | 0,45 | 0,04 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,751 | 1,683 | 0,093 | 3,9 |
| Ma22 0 | 0,061 | 0,111 | 0,10 | 0,51 | 0,04 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,680 | 1,657 | 0,110 | 1,3 |
| Ma44 | 0,031 | 0,040 | 0,21 | 0,26 | 0,02 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,596 | 1,488 | 0,037 | 6,7 |
| Ma45 | 0,037 | 0,049 | 0,25 | 0,31 | 0,02 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,532 | 1,413 | 0,045 | 7,8 |
| Ma46 | 0,042 | 0,056 | 0,28 | 0,35 | 0,03 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,466 | 1,356 | 0,052 | 7,6 |
| Ma49 | 0,055 | 0,075 | 0,36 | 0,46 | 0,04 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,325 | 1,196 | 0,068 | 9,7 |
| Ma51 | 0,063 | 0,084 | 0,42 | 0,52 | 0,04 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,206 | 1,094 | 0,076 | 9,3 |
| Ma79 | 0,038 | 0,054 | 0,19 | 0,32 | 0,03 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,605 | 1,514 | 0,051 | 5,7 |
| Ma80 | 0,043 | 0,060 | 0,21 | 0,35 | 0,03 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,539 | 1,475 | 0,057 | 4,1 |
| Ma81 | 0,050 | 0,074 | 0,25 | 0,42 | 0,03 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,490 | 1,401 | 0,070 | 6,0 |
| Ma82 | 0,055 | 0,083 | 0,28 | 0,46 | 0,04 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,441 | 1,353 | 0,078 | 6,1 |
| Ma84 | 0,061 | 0,091 | 0,30 | 0,50 | 0,04 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,388 | 1,301 | 0,086 | 6,2 |
| Ma15 0 | 0,042 | 0,060 | 0,14 | 0,35 | 0,03 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,549 | 1,601 | 0,062 | -3,3 |
| Ma15 3 | 0,058 | 0,097 | 0,19 | 0,48 | 0,04 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,583 | 1,499 | 0,092 | 5,3 |
| Ma15 4 | 0,062 | 0,105 | 0,21 | 0,51 | 0,04 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,551 | 1,471 | 0,100 | 5,2 |
| Ma53 | 0,077 | 0,106 | 0,51 | 0,64 | 0,05 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,118 | 1,061 | 0,100 | 5,1 |
| Ma54 | 0,086 | 0,118 | 0,58 | 0,72 | 0,06 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,055 | 1,006 | 0,113 | 4,6 |
| Ma55 | 0,092 | 0,126 | 0,61 | 0,77 | 0,06 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 1,020 | 0,977 | 0,121 | 4,3 |
| Ma56 | 0,097 | 0,133 | 0,65 | 0,81 | 0,06 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,998 | 0,955 | 0,127 | 4,3 |
| Ma59 | 0,111 | 0,152 | 0,74 | 0,92 | 0,07 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,929 | 0,898 | 0,147 | 3,3 |
| Ma60 | 0,117 | 0,160 | 0,78 | 0,97 | 0,08 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,904 | 0,876 | 0,155 | 3,1 |
| Ma61 | 0,125 | 0,170 | 0,83 | 1,04 | 0,08 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,869 | 0,851 | 0,166 | 2,1 |
| Ma63 | 0,129 | 0,175 | 0,86 | 1,07 | 0,09 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,854 | 0,838 | 0,172 | 1,9 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{in} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Ma64 | 0,136 | 0,185 | 0,91 | 1,14 | 0,09 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,830 | 0,816 | 0,182 | 1,7 |
| Ma65 | 0,149 | 0,201 | 0,99 | 1,24 | 0,10 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,792 | 0,785 | 0,199 | 0,8 |
| Ma66 | 0,155 | 0,210 | 1,03 | 1,29 | 0,10 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,777 | 0,770 | 0,208 | 0,8 |
| Ma68 | 0,172 | 0,233 | 1,15 | 1,43 | 0,11 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,740 | 0,735 | 0,232 | 0,6 |
| Ma69 | 0,191 | 0,261 | 1,27 | 1,59 | 0,13 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,706 | 0,700 | 0,259 | 0,8 |
| Ma71 | 0,212 | 0,291 | 1,41 | 1,76 | 0,14 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,675 | 0,668 | 0,288 | 1,0 |
| Ma72 | 0,214 | 0,294 | 1,43 | 1,79 | 0,14 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,667 | 0,664 | 0,292 | 0,5 |
| Ma73 | 0,238 | 0,330 | 1,59 | 1,99 | 0,16 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,639 | 0,633 | 0,326 | 1,0 |
| Ma74 | 0,241 | 0,333 | 1,61 | 2,01 | 0,16 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,635 | 0,630 | 0,330 | 0,8 |
| Ma75 | 0,257 | 0,358 | 1,71 | 2,14 | 0,17 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,620 | 0,611 | 0,353 | 1,4 |
| Ma76 | 0,294 | 0,413 | 1,96 | 2,45 | 0,20 | 0,50 | 1,50 | 5,00 | 0,585 | 0,575 | 0,406 | 1,7 |
| Ma85 | 0,065 | 0,099 | 0,33 | 0,54 | 0,04 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,339 | 1,248 | 0,092 | 6,8 |
| Ma87 | 0,074 | 0,114 | 0,37 | 0,62 | 0,05 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,262 | 1,175 | 0,106 | 6,9 |
| Ma90 | 0,082 | 0,127 | 0,41 | 0,68 | 0,05 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,226 | 1,125 | 0,117 | 8,3 |
| Ma91 | 0,094 | 0,148 | 0,47 | 0,78 | 0,06 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,163 | 1,059 | 0,134 | 9,0 |
| Ma92 | 0,103 | 0,161 | 0,52 | 0,86 | 0,07 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,097 | 1,013 | 0,149 | 7,7 |
| Ma94 | 0,111 | 0,173 | 0,55 | 0,92 | 0,07 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 1,058 | 0,980 | 0,160 | 7,3 |
| Ma96 | 0,125 | 0,196 | 0,63 | 1,04 | 0,08 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,997 | 0,927 | 0,182 | 7,1 |
| Ma97 | 0,133 | 0,206 | 0,67 | 1,11 | 0,09 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,961 | 0,902 | 0,194 | 6,1 |
| Ma99 | 0,142 | 0,220 | 0,71 | 1,19 | 0,09 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,926 | 0,875 | 0,208 | 5,5 |
| Ma10 0 | 0,151 | 0,234 | 0,76 | 1,26 | 0,10 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,901 | 0,851 | 0,221 | 5,5 |
| Ma10 2 | 0,158 | 0,246 | 0,79 | 1,32 | 0,11 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,884 | 0,833 | 0,232 | 5,7 |
| Ma10 3 | 0,165 | 0,256 | 0,82 | 1,37 | 0,11 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,865 | 0,818 | 0,242 | 5,4 |
| Ma10 4 | 0,174 | 0,269 | 0,87 | 1,45 | 0,12 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,839 | 0,798 | 0,256 | 4,8 |
| Ma10 6 | 0,193 | 0,299 | 0,96 | 1,61 | 0,13 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,798 | 0,762 | 0,285 | 4,5 |
| Ma10 8 | 0,202 | 0,316 | 1,01 | 1,68 | 0,13 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,789 | 0,746 | 0,299 | 5,4 |
| Ma11 0 | 0,211 | 0,330 | 1,06 | 1,76 | 0,14 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,769 | 0,731 | 0,314 | 5,0 |
| Ma11 1 | 0,218 | 0,338 | 1,09 | 1,82 | 0,15 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,748 | 0,720 | 0,325 | 3,9 |
| Ma11 3 | 0,239 | 0,374 | 1,20 | 2,00 | 0,16 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,720 | 0,690 | 0,358 | 4,2 |
| Ma11 4 | 0,243 | 0,376 | 1,22 | 2,03 | 0,16 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,709 | 0,685 | 0,364 | 3,3 |
| Ma11 6 | 0,265 | 0,413 | 1,33 | 2,21 | 0,18 | 0,67 | 1,50 | 5,00 | 0,684 | 0,659 | 0,398 | 3,7 |
| Ma15 5 | 0,066 | 0,113 | 0,22 | 0,55 | 0,04 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,517 | 1,409 | 0,105 | 7,1 |
| Ma15 8 | 0,077 | 0,136 | 0,26 | 0,64 | 0,05 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,432 | 1,310 | 0,124 | 8,5 |
| Ma15 9 | 0,088 | 0,156 | 0,29 | 0,73 | 0,06 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,353 | 1,235 | 0,142 | 8,8 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{in} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W ₀ | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Ma16 1 | 0,099 | 0,173 | 0,33 | 0,83 | 0,07 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,257 | 1,168 | 0,161 | 7,0 |
| Ma16 3 | 0,117 | 0,205 | 0,39 | 0,97 | 0,08 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,163 | 1,085 | 0,191 | 6,7 |
| Ma16 5 | 0,129 | 0,224 | 0,43 | 1,07 | 0,09 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,095 | 1,036 | 0,212 | 5,3 |
| Ma16 7 | 0,132 | 0,233 | 0,44 | 1,10 | 0,09 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,094 | 1,024 | 0,218 | 6,4 |
| Ma16 9 | 0,141 | 0,249 | 0,47 | 1,17 | 0,09 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,062 | 0,994 | 0,233 | 6,4 |
| Ma17 1 | 0,148 | 0,263 | 0,49 | 1,24 | 0,10 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 1,041 | 0,972 | 0,246 | 6,6 |
| Ma17 2 | 0,158 | 0,277 | 0,53 | 1,32 | 0,11 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,995 | 0,944 | 0,263 | 5,1 |
| Ma17 6 | 0,176 | 0,307 | 0,59 | 1,46 | 0,12 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,942 | 0,899 | 0,293 | 4,5 |
| Ma17 8 | 0,193 | 0,337 | 0,64 | 1,61 | 0,13 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,895 | 0,861 | 0,324 | 3,8 |
| Ma18 0 | 0,213 | 0,367 | 0,71 | 1,77 | 0,14 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,845 | 0,825 | 0,358 | 2,4 |
| Ma18 2 | 0,226 | 0,385 | 0,75 | 1,88 | 0,15 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,809 | 0,802 | 0,381 | 0,8 |
| Ma18 4 | 0,245 | 0,414 | 0,82 | 2,04 | 0,16 | 1,00 | 1,50 | 5,00 | 0,771 | 0,773 | 0,415 | -0,2 |
| Ma10 | 0,070 | 0,073 | 0,70 | 0,58 | 0,05 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,900 | 0,979 | 0,080 | -8,8 |
| Ma12 | 0,083 | 0,087 | 0,83 | 0,69 | 0,06 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,813 | 0,903 | 0,096 | -11,0 |
| Ma14 | 0,093 | 0,097 | 0,93 | 0,78 | 0,06 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,771 | 0,859 | 0,108 | -11,4 |
| Ma16 | 0,099 | 0,103 | 0,99 | 0,82 | 0,07 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,748 | 0,835 | 0,115 | -11,7 |
| Ma17 | 0,111 | 0,116 | 1,11 | 0,92 | 0,07 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,711 | 0,793 | 0,129 | -11,6 |
| Ma20 | 0,124 | 0,130 | 1,24 | 1,03 | 0,08 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,675 | 0,754 | 0,146 | -11,6 |
| Ma22 | 0,140 | 0,149 | 1,40 | 1,17 | 0,09 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,643 | 0,712 | 0,166 | -10,8 |
| Ma24 | 0,155 | 0,167 | 1,55 | 1,29 | 0,10 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,618 | 0,681 | 0,184 | -10,2 |
| Ma26 | 0,163 | 0,179 | 1,63 | 1,36 | 0,11 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,611 | 0,664 | 0,194 | -8,8 |
| Ma27 | 0,179 | 0,200 | 1,79 | 1,49 | 0,12 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,598 | 0,638 | 0,213 | -6,7 |
| Ma29 | 0,182 | 0,202 | 1,82 | 1,52 | 0,12 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,588 | 0,632 | 0,217 | -7,5 |
| Ma31 | 0,203 | 0,231 | 2,03 | 1,69 | 0,14 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,571 | 0,602 | 0,243 | -5,5 |
| Ma32 | 0,220 | 0,256 | 2,20 | 1,84 | 0,15 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,558 | 0,580 | 0,265 | -3,9 |
| Ma34 | 0,229 | 0,272 | 2,29 | 1,91 | 0,15 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,560 | 0,569 | 0,277 | -1,7 |
| Ma35 | 0,245 | 0,293 | 2,45 | 2,04 | 0,16 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,545 | 0,552 | 0,297 | -1,3 |
| Ma37 | 0,268 | 0,329 | 2,68 | 2,24 | 0,18 | 0,33 | 1,50 | 5,00 | 0,534 | 0,530 | 0,326 | 0,8 |
| Ma38 | 0,313 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 |
| Ma22 1 | 0,069 | 0,128 | 0,11 | 0,57 | 0,05 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,605 | 1,706 | 0,136 | -6,3 |
| Ma22 3 | 0,078 | 0,150 | 0,13 | 0,65 | 0,05 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,538 | 1,606 | 0,156 | -4,5 |
| Ma22 5 | 0,092 | 0,174 | 0,15 | 0,77 | 0,06 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,411 | 1,493 | 0,185 | -5,9 |
| Ma22 6 | 0,102 | 0,195 | 0,17 | 0,85 | 0,07 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,341 | 1,422 | 0,207 | -6,0 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Ma22 7 | 0,110 | 0,208 | 0,18 | 0,92 | 0,07 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,281 | 1,375 | 0,223 | -7,3 |
| Ma22 8 | 0,116 | 0,216 | 0,19 | 0,96 | 0,08 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,241 | 1,346 | 0,234 | -8,4 |
| Ma22 9 | 0,123 | 0,227 | 0,20 | 1,02 | 0,08 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,197 | 1,310 | 0,249 | -9,5 |
| Ma23 1 | 0,137 | 0,253 | 0,23 | 1,15 | 0,09 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,121 | 1,244 | 0,281 | -11,0 |
| Ma23 2 | 0,148 | 0,271 | 0,25 | 1,23 | 0,10 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 1,075 | 1,203 | 0,303 | -11,9 |
| Ma23 4 | 0,174 | 0,315 | 0,29 | 1,45 | 0,12 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 0,976 | 1,116 | 0,360 | -14,3 |
| Ma23 5 | 0,187 | 0,340 | 0,31 | 1,55 | 0,12 | 2,00 | 1,50 | 5,00 | 0,953 | 1,082 | 0,386 | -13,5 |
| II.4 | A. KABIRI-SAMANI VÀ CS | | | | | | | | | | | |
| Ka2 | 0,030 | 0,029 | 0,12 | 0,20 | 0,02 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 1,247 | 1,642 | 0,038 | -31,7 |
| Ka3 | 0,045 | 0,042 | 0,18 | 0,30 | 0,04 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,994 | 1,524 | 0,064 | -53,3 |
| Ka4 | 0,056 | 0,051 | 0,22 | 0,37 | 0,05 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,878 | 1,435 | 0,083 | -63,5 |
| Ka5 | 0,065 | 0,061 | 0,26 | 0,43 | 0,05 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,838 | 1,363 | 0,099 | -62,6 |
| Ka6 | 0,075 | 0,070 | 0,30 | 0,50 | 0,06 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,779 | 1,281 | 0,116 | -64,4 |
| Ka13 | 0,029 | 0,035 | 0,12 | 0,32 | 0,03 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 1,579 | 1,649 | 0,036 | -4,4 |
| Ka14 | 0,044 | 0,050 | 0,18 | 0,49 | 0,04 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 1,236 | 1,528 | 0,062 | -23,7 |
| Ka34 | 0,036 | 0,057 | 0,14 | 0,40 | 0,03 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,876 | 1,594 | 0,048 | 15,1 |
| Ka35 | 0,044 | 0,069 | 0,18 | 0,49 | 0,04 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,690 | 1,529 | 0,062 | 9,5 |
| Ka24 | 0,038 | 0,055 | 0,15 | 0,38 | 0,03 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 1,683 | 1,578 | 0,052 | 6,3 |
| Ka43 | 0,033 | 0,052 | 0,13 | 0,44 | 0,03 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,975 | 1,619 | 0,043 | 18,0 |
| Ka44 | 0,034 | 0,056 | 0,14 | 0,46 | 0,03 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,969 | 1,607 | 0,045 | 18,4 |
| Ka7 | 0,085 | 0,085 | 0,34 | 0,56 | 0,07 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,778 | 1,116 | 0,122 | -43,4 |
| Ka8 | 0,101 | 0,103 | 0,40 | 0,67 | 0,08 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,727 | 1,030 | 0,146 | -41,7 |
| Ka9 | 0,118 | 0,125 | 0,47 | 0,79 | 0,10 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,697 | 0,960 | 0,172 | -37,7 |
| Ka10 | 0,135 | 0,150 | 0,54 | 0,90 | 0,11 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,684 | 0,903 | 0,198 | -32,1 |
| Ka11 | 0,140 | 0,154 | 0,56 | 0,94 | 0,12 | 1,25 | 0,33 | 6,00 | 0,659 | 0,886 | 0,207 | -34,5 |
| Ka15 | 0,053 | 0,061 | 0,21 | 0,58 | 0,05 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 1,145 | 1,316 | 0,070 | -14,9 |
| Ka16 | 0,063 | 0,077 | 0,25 | 0,71 | 0,06 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 1,082 | 1,207 | 0,085 | -11,6 |
| Ka17 | 0,072 | 0,087 | 0,29 | 0,80 | 0,06 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 1,015 | 1,139 | 0,098 | -12,2 |
| Ka18 | 0,083 | 0,102 | 0,33 | 0,93 | 0,07 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 0,952 | 1,065 | 0,114 | -11,9 |
| Ka19 | 0,096 | 0,118 | 0,38 | 1,07 | 0,08 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 0,901 | 1,000 | 0,132 | -11,0 |
| Ka20 | 0,116 | 0,147 | 0,46 | 1,29 | 0,10 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 0,838 | 0,916 | 0,161 | -9,4 |
| Ka21 | 0,140 | 0,175 | 0,56 | 1,56 | 0,12 | 1,79 | 0,56 | 8,14 | 0,753 | 0,841 | 0,195 | -11,7 |
| Ka25 | 0,051 | 0,072 | 0,20 | 0,51 | 0,04 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 1,410 | 1,409 | 0,072 | 0,1 |
| Ka26 | 0,064 | 0,088 | 0,26 | 0,64 | 0,05 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 1,233 | 1,270 | 0,091 | -3,0 |
| Ka27 | 0,075 | 0,101 | 0,30 | 0,75 | 0,06 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 1,120 | 1,183 | 0,107 | -5,7 |
| Ka28 | 0,087 | 0,119 | 0,35 | 0,87 | 0,07 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 1,044 | 1,103 | 0,125 | -5,7 |
| Ka29 | 0,097 | 0,132 | 0,39 | 0,97 | 0,08 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 0,988 | 1,049 | 0,141 | -6,2 |
| Ka30 | 0,105 | 0,148 | 0,42 | 1,05 | 0,09 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 0,981 | 1,012 | 0,153 | -3,2 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W ₀ | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Ka31 | 0,140 | 0,192 | 0,56 | 1,40 | 0,12 | 1,25 | 1,00 | 6,00 | 0,830 | 0,888 | 0,206 | -7,0 |
| Ka36 | 0,056 | 0,083 | 0,22 | 0,62 | 0,05 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,407 | 1,346 | 0,079 | 4,3 |
| Ka37 | 0,065 | 0,098 | 0,26 | 0,72 | 0,05 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,331 | 1,260 | 0,092 | 5,4 |
| Ka38 | 0,074 | 0,110 | 0,30 | 0,82 | 0,06 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,239 | 1,187 | 0,106 | 4,2 |
| Ka39 | 0,086 | 0,126 | 0,34 | 0,95 | 0,07 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,134 | 1,110 | 0,123 | 2,1 |
| Ka40 | 0,102 | 0,148 | 0,41 | 1,13 | 0,09 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 1,021 | 1,025 | 0,148 | -0,4 |
| Ka41 | 0,140 | 0,199 | 0,56 | 1,56 | 0,12 | 1,25 | 1,22 | 6,00 | 0,857 | 0,887 | 0,206 | -3,6 |
| Ka45 | 0,044 | 0,064 | 0,18 | 0,59 | 0,04 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,543 | 1,500 | 0,062 | 2,7 |
| Ka46 | 0,061 | 0,090 | 0,24 | 0,82 | 0,05 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,347 | 1,294 | 0,087 | 3,9 |
| Ka47 | 0,069 | 0,100 | 0,28 | 0,92 | 0,06 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,246 | 1,224 | 0,099 | 1,7 |
| Ka48 | 0,072 | 0,104 | 0,29 | 0,96 | 0,06 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,222 | 1,204 | 0,103 | 1,4 |
| Ka49 | 0,079 | 0,119 | 0,32 | 1,05 | 0,07 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,213 | 1,152 | 0,113 | 5,0 |
| Ka50 | 0,099 | 0,147 | 0,40 | 1,32 | 0,08 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 1,060 | 1,039 | 0,144 | 2,0 |
| Ka51 | 0,140 | 0,200 | 0,56 | 1,87 | 0,12 | 1,25 | 1,67 | 6,00 | 0,859 | 0,887 | 0,206 | -3,2 |
| B | TRẦN PIANO LOẠI B | | | | | | | | | | | |
| I | ĐỀ TÀI CẤP BỘ | | | | | | | | | | | |
| DB15 5 | 0,038 | 0,045 | 0,28 | 0,35 | 0,04 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 1,363 | 1,354 | 0,045 | 0,7 |
| DB16 4 | 0,039 | 0,036 | 0,42 | 0,35 | 0,04 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 1,062 | 1,101 | 0,037 | -3,7 |
| DB80 | 0,039 | 0,051 | 0,28 | 0,50 | 0,04 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 1,475 | 1,342 | 0,046 | 9,0 |
| DB98 | 0,041 | 0,061 | 0,13 | 0,37 | 0,03 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,680 | 1,613 | 0,059 | 4,0 |
| DB10 8 | 0,042 | 0,062 | 0,18 | 0,38 | 0,04 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 1,640 | 1,528 | 0,058 | 6,8 |
| DB11 7 | 0,043 | 0,056 | 0,28 | 0,39 | 0,04 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 1,391 | 1,353 | 0,054 | 2,8 |
| DB12 7 | 0,044 | 0,043 | 0,42 | 0,40 | 0,04 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 1,055 | 1,100 | 0,045 | -4,3 |
| DB13 8 | 0,048 | 0,070 | 0,18 | 0,44 | 0,05 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 1,478 | 1,521 | 0,072 | -2,9 |
| DB14 7 | 0,050 | 0,072 | 0,24 | 0,46 | 0,05 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 1,441 | 1,401 | 0,070 | 2,8 |
| DB15 6 | 0,052 | 0,063 | 0,38 | 0,47 | 0,05 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 1,203 | 1,160 | 0,061 | 3,6 |
| DB16 5 | 0,052 | 0,049 | 0,57 | 0,48 | 0,05 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,917 | 0,820 | 0,044 | 10,6 |
| DB99 | 0,055 | 0,088 | 0,18 | 0,50 | 0,05 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,532 | 1,517 | 0,088 | 1,0 |
| DB13 9 | 0,061 | 0,089 | 0,22 | 0,56 | 0,06 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 1,319 | 1,373 | 0,092 | -4,1 |
| DB14 0 | 0,074 | 0,106 | 0,27 | 0,67 | 0,07 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 1,193 | 1,260 | 0,112 | -5,6 |
| DB14 8 | 0,064 | 0,093 | 0,31 | 0,58 | 0,06 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 1,295 | 1,234 | 0,088 | 4,7 |
| DB14 1 | 0,100 | 0,142 | 0,36 | 0,91 | 0,09 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 1,020 | 1,099 | 0,154 | -7,8 |
| DB14 9 | 0,077 | 0,111 | 0,37 | 0,70 | 0,07 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 1,165 | 1,131 | 0,108 | 2,9 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| DB14 2 | 0,125 | 0,174 | 0,45 | 1,14 | 0,12 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 0,886 | 0,991 | 0,195 | -11,9 |
| DB15 7 | 0,066 | 0,081 | 0,48 | 0,60 | 0,06 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 1,069 | 1,071 | 0,081 | -0,2 |
| DB15 0 | 0,104 | 0,146 | 0,50 | 0,95 | 0,10 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 0,981 | 0,987 | 0,147 | -0,5 |
| DB14 3 | 0,151 | 0,215 | 0,55 | 1,37 | 0,14 | 1,14 | 1,20 | 4,43 | 0,827 | 0,910 | 0,237 | -10,1 |
| DB15 8 | 0,081 | 0,098 | 0,58 | 0,73 | 0,08 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 0,970 | 0,981 | 0,099 | -1,2 |
| DB15 1 | 0,131 | 0,179 | 0,63 | 1,19 | 0,12 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 0,852 | 0,889 | 0,187 | -4,4 |
| DB16 6 | 0,067 | 0,065 | 0,72 | 0,60 | 0,06 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,855 | 0,945 | 0,072 | -10,5 |
| DB15 2 | 0,158 | 0,214 | 0,76 | 1,43 | 0,15 | 0,86 | 1,20 | 4,43 | 0,770 | 0,817 | 0,227 | -6,0 |
| DB15 9 | 0,109 | 0,131 | 0,79 | 0,99 | 0,10 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 0,826 | 0,856 | 0,136 | -3,6 |
| DB16 7 | 0,081 | 0,078 | 0,88 | 0,74 | 0,08 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,765 | 0,864 | 0,088 | -13,0 |
| DB16 0 | 0,136 | 0,163 | 0,99 | 1,24 | 0,13 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 0,731 | 0,772 | 0,172 | -5,5 |
| DB16 8 | 0,109 | 0,107 | 1,18 | 0,99 | 0,10 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,667 | 0,754 | 0,121 | -13,1 |
| DB16 1 | 0,164 | 0,196 | 1,19 | 1,49 | 0,15 | 0,57 | 1,20 | 4,43 | 0,667 | 0,709 | 0,209 | -6,2 |
| DB16 9 | 0,138 | 0,138 | 1,50 | 1,25 | 0,13 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,610 | 0,678 | 0,154 | -11,2 |
| DB17 0 | 0,166 | 0,170 | 1,80 | 1,51 | 0,16 | 0,38 | 1,20 | 4,43 | 0,567 | 0,623 | 0,187 | -9,7 |
| DB10 0 | 0,070 | 0,110 | 0,22 | 0,63 | 0,06 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,349 | 1,346 | 0,110 | 0,2 |
| DB10 9 | 0,057 | 0,088 | 0,24 | 0,52 | 0,05 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 1,453 | 1,350 | 0,082 | 7,1 |
| DB10 1 | 0,084 | 0,132 | 0,27 | 0,77 | 0,07 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,218 | 1,235 | 0,134 | -1,4 |
| DB11 0 | 0,072 | 0,110 | 0,31 | 0,66 | 0,06 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 1,279 | 1,213 | 0,104 | 5,1 |
| DB10 2 | 0,097 | 0,151 | 0,31 | 0,88 | 0,08 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,130 | 1,159 | 0,155 | -2,6 |
| DB10 3 | 0,114 | 0,175 | 0,36 | 1,03 | 0,10 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 1,032 | 1,077 | 0,183 | -4,3 |
| DB11 1 | 0,088 | 0,132 | 0,37 | 0,80 | 0,07 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 1,150 | 1,111 | 0,128 | 3,4 |
| DB11 8 | 0,060 | 0,079 | 0,38 | 0,54 | 0,05 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 1,229 | 1,169 | 0,076 | 4,8 |
| DB10 4 | 0,143 | 0,216 | 0,45 | 1,30 | 0,12 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 0,901 | 0,971 | 0,232 | -7,7 |
| DB11 9 | 0,076 | 0,101 | 0,48 | 0,69 | 0,06 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 1,092 | 1,047 | 0,097 | 4,1 |
| DB11 2 | 0,118 | 0,176 | 0,50 | 1,08 | 0,10 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 0,974 | 0,969 | 0,175 | 0,6 |
| DB10 5 | 0,172 | 0,255 | 0,55 | 1,56 | 0,15 | 1,30 | 1,20 | 4,90 | 0,807 | 0,892 | 0,282 | -10,5 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W ₀ | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W ₀ | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| DB12 8 | 0,060 | 0,060 | 0,57 | 0,54 | 0,05 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,929 | 1,031 | 0,067 | -11,0 |
| DB12 0 | 0,092 | 0,122 | 0,59 | 0,84 | 0,08 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 0,983 | 0,959 | 0,119 | 2,5 |
| DB11 3 | 0,149 | 0,217 | 0,63 | 1,35 | 0,13 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 0,854 | 0,872 | 0,222 | -2,2 |
| DB12 1 | 0,104 | 0,138 | 0,66 | 0,95 | 0,09 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 0,924 | 0,907 | 0,135 | 1,9 |
| DB12 9 | 0,076 | 0,078 | 0,73 | 0,69 | 0,06 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,835 | 0,923 | 0,086 | -10,5 |
| DB11 4 | 0,179 | 0,257 | 0,76 | 1,63 | 0,15 | 0,97 | 1,20 | 4,90 | 0,767 | 0,802 | 0,269 | -4,6 |
| DB12 2 | 0,124 | 0,163 | 0,79 | 1,13 | 0,11 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 0,837 | 0,836 | 0,163 | 0,1 |
| DB13 0 | 0,093 | 0,096 | 0,88 | 0,84 | 0,08 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,770 | 0,846 | 0,105 | -9,8 |
| DB12 3 | 0,156 | 0,203 | 0,99 | 1,42 | 0,13 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 0,740 | 0,754 | 0,206 | -1,8 |
| DB13 1 | 0,106 | 0,111 | 1,01 | 0,96 | 0,09 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,724 | 0,795 | 0,121 | -9,8 |
| DB13 2 | 0,125 | 0,131 | 1,19 | 1,13 | 0,11 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,673 | 0,738 | 0,144 | -9,7 |
| DB12 4 | 0,187 | 0,242 | 1,19 | 1,70 | 0,16 | 0,65 | 1,20 | 4,90 | 0,673 | 0,694 | 0,249 | -3,0 |
| DB13 3 | 0,157 | 0,168 | 1,50 | 1,43 | 0,13 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,611 | 0,665 | 0,183 | -8,8 |
| DB13 4 | 0,189 | 0,206 | 1,80 | 1,72 | 0,16 | 0,43 | 1,20 | 4,90 | 0,568 | 0,611 | 0,222 | -7,5 |
| DB64 | 0,093 | 0,144 | 0,33 | 1,19 | 0,09 | 1,62 | 1,20 | 5,86 | 1,137 | 1,082 | 0,137 | 4,9 |
| DB65 | 0,105 | 0,159 | 0,37 | 1,33 | 0,10 | 1,62 | 1,20 | 5,86 | 1,059 | 1,028 | 0,154 | 3,0 |
| DB66 | 0,117 | 0,175 | 0,42 | 1,49 | 0,12 | 1,62 | 1,20 | 5,86 | 0,989 | 0,977 | 0,173 | 1,2 |
| DB89 | 0,040 | 0,041 | 0,43 | 0,51 | 0,04 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 1,139 | 1,136 | 0,040 | 0,2 |
| DB67 | 0,125 | 0,186 | 0,45 | 1,59 | 0,12 | 1,62 | 1,20 | 5,86 | 0,947 | 0,946 | 0,186 | 0,0 |
| DB82 | 0,069 | 0,088 | 0,49 | 0,87 | 0,07 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 1,113 | 1,008 | 0,080 | 9,5 |
| DB68 | 0,140 | 0,206 | 0,50 | 1,78 | 0,14 | 1,62 | 1,20 | 5,86 | 0,887 | 0,899 | 0,209 | -1,4 |
| DB75 | 0,106 | 0,149 | 0,50 | 1,34 | 0,10 | 1,22 | 1,20 | 5,86 | 0,978 | 0,936 | 0,142 | 4,2 |
| DB90 | 0,054 | 0,054 | 0,58 | 0,69 | 0,05 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,971 | 0,989 | 0,056 | -1,9 |
| DB83 | 0,083 | 0,105 | 0,59 | 1,05 | 0,08 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 0,999 | 0,924 | 0,098 | 7,5 |
| DB76 | 0,132 | 0,181 | 0,63 | 1,68 | 0,13 | 1,22 | 1,20 | 5,86 | 0,847 | 0,845 | 0,180 | 0,2 |
| DB91 | 0,069 | 0,069 | 0,74 | 0,88 | 0,07 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,864 | 0,887 | 0,071 | -2,7 |
| DB77 | 0,159 | 0,213 | 0,76 | 2,02 | 0,16 | 1,22 | 1,20 | 5,86 | 0,759 | 0,777 | 0,218 | -2,3 |
| DB84 | 0,111 | 0,137 | 0,79 | 1,41 | 0,11 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 0,836 | 0,809 | 0,132 | 3,3 |
| DB92 | 0,084 | 0,084 | 0,89 | 1,06 | 0,08 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,787 | 0,813 | 0,087 | -3,4 |
| DB85 | 0,139 | 0,168 | 0,99 | 1,77 | 0,14 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 0,736 | 0,731 | 0,167 | 0,7 |
| DB86 | 0,167 | 0,202 | 1,19 | 2,12 | 0,16 | 0,81 | 1,20 | 5,86 | 0,670 | 0,672 | 0,202 | -0,4 |
| DB93 | 0,113 | 0,116 | 1,21 | 1,44 | 0,11 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,689 | 0,708 | 0,119 | -2,8 |
| DB94 | 0,143 | 0,150 | 1,53 | 1,82 | 0,14 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,627 | 0,637 | 0,152 | -1,7 |
| DB95 | 0,171 | 0,183 | 1,83 | 2,18 | 0,17 | 0,54 | 1,20 | 5,86 | 0,582 | 0,586 | 0,000 | -0,7 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|-----------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| DB5 | 0,071 | 0,110 | 0,22 | 1,17 | 0,06 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 1,304 | 1,230 | 0,104 | 5,6 |
| DB6 | 0,079 | 0,118 | 0,24 | 1,29 | 0,07 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 1,203 | 1,175 | 0,115 | 2,4 |
| DB7 | 0,086 | 0,127 | 0,27 | 1,40 | 0,08 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 1,139 | 1,131 | 0,126 | 0,6 |
| DB8 | 0,100 | 0,145 | 0,31 | 1,64 | 0,09 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 1,039 | 1,055 | 0,148 | -1,5 |
| DB9 | 0,115 | 0,165 | 0,36 | 1,88 | 0,10 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 0,953 | 0,989 | 0,171 | -3,8 |
| DB10 | 0,144 | 0,203 | 0,45 | 2,36 | 0,13 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 0,833 | 0,892 | 0,217 | -7,0 |
| DB51 | 0,063 | 0,074 | 0,52 | 1,03 | 0,06 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 1,058 | 0,965 | 0,067 | 8,8 |
| DB11 | 0,174 | 0,242 | 0,54 | 2,85 | 0,16 | 2,40 | 1,20 | 8,20 | 0,752 | 0,819 | 0,263 | -8,9 |
| DB33 | 0,063 | 0,070 | 0,59 | 1,04 | 0,06 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,991 | 0,927 | 0,066 | 6,4 |
| DB52 | 0,079 | 0,091 | 0,65 | 1,30 | 0,07 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,924 | 0,868 | 0,086 | 6,0 |
| DB52 | 0,079 | 0,091 | 0,65 | 1,30 | 0,07 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,924 | 0,868 | 0,086 | 6,0 |
| DB34 | 0,080 | 0,088 | 0,75 | 1,31 | 0,07 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,876 | 0,833 | 0,084 | 4,8 |
| DB27 | 0,127 | 0,164 | 0,78 | 2,07 | 0,11 | 1,20 | 1,20 | 8,20 | 0,823 | 0,766 | 0,153 | 6,9 |
| DB53 | 0,095 | 0,108 | 0,79 | 1,56 | 0,09 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,828 | 0,799 | 0,104 | 3,5 |
| DB45 | 0,126 | 0,155 | 0,85 | 2,07 | 0,11 | 1,10 | 1,20 | 8,20 | 0,779 | 0,747 | 0,148 | 4,2 |
| DB35 | 0,096 | 0,104 | 0,90 | 1,58 | 0,09 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,788 | 0,766 | 0,101 | 2,7 |
| DB28 | 0,158 | 0,201 | 0,98 | 2,59 | 0,14 | 1,20 | 1,20 | 8,20 | 0,723 | 0,692 | 0,193 | 4,3 |
| DB54 | 0,127 | 0,142 | 1,05 | 2,08 | 0,12 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,706 | 0,700 | 0,140 | 0,8 |
| DB46 | 0,158 | 0,190 | 1,07 | 2,58 | 0,14 | 1,10 | 1,20 | 8,20 | 0,686 | 0,675 | 0,187 | 1,6 |
| DB29 | 0,190 | 0,241 | 1,18 | 3,10 | 0,17 | 1,20 | 1,20 | 8,20 | 0,658 | 0,637 | 0,233 | 3,1 |
| DB36 | 0,129 | 0,138 | 1,20 | 2,11 | 0,12 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,677 | 0,672 | 0,137 | 0,9 |
| DB47 | 0,189 | 0,227 | 1,28 | 3,09 | 0,17 | 1,10 | 1,20 | 8,20 | 0,625 | 0,621 | 0,226 | 0,6 |
| DB55 | 0,159 | 0,176 | 1,31 | 2,60 | 0,14 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,629 | 0,633 | 0,177 | -0,6 |
| DB37 | 0,161 | 0,175 | 1,49 | 2,63 | 0,15 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,611 | 0,607 | 0,173 | 0,8 |
| DB56 | 0,191 | 0,214 | 1,57 | 3,12 | 0,17 | 0,90 | 1,20 | 8,20 | 0,580 | 0,582 | 0,214 | -0,4 |
| DB38 | 0,193 | 0,212 | 1,79 | 3,16 | 0,17 | 0,80 | 1,20 | 8,20 | 0,566 | 0,558 | 0,209 | 1,3 |
| II | A. NOUI VÀ CS | | | | | | | | | | | |
| No4-1 | 0,022 | 0,025 | 0,15 | 0,26 | 0,02 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,699 | 1,592 | | 6,3 |
| No4-2 | 0,026 | 0,031 | 0,17 | 0,31 | 0,03 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,646 | 1,544 | | 6,2 |
| No4-3 | 0,028 | 0,034 | 0,19 | 0,33 | 0,03 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,596 | 1,515 | | 5,0 |
| No4-4 | 0,030 | 0,037 | 0,20 | 0,35 | 0,03 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,610 | 1,496 | | 7,1 |
| No4-5 | 0,035 | 0,043 | 0,23 | 0,41 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,470 | 1,430 | | 2,7 |
| No4-6 | 0,038 | 0,048 | 0,25 | 0,45 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,450 | 1,391 | | 4,1 |
| No4-7 | 0,041 | 0,051 | 0,27 | 0,48 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,386 | 1,353 | | 2,4 |
| No6-5 | 0,034 | 0,045 | 0,23 | 0,40 | 0,03 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,616 | 1,438 | | 11,0 |
| No6-6 | 0,037 | 0,049 | 0,24 | 0,43 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,593 | 1,409 | | 11,6 |
| No6-7 | 0,043 | 0,057 | 0,29 | 0,51 | 0,04 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,432 | 1,324 | | 7,6 |
| Now1. 2-3 | 0,042 | 0,057 | 0,28 | 0,55 | 0,04 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 1,512 | 1,343 | | 11,2 |
| Now1. 5-4 | 0,045 | 0,063 | 0,30 | 0,68 | 0,05 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 1,503 | 1,301 | | 13,5 |
| No6-8 | 0,045 | 0,060 | 0,30 | 0,53 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,393 | 1,294 | | 7,1 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Now1. 2-4 | 0,047 | 0,062 | 0,31 | 0,62 | 0,05 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 1,382 | 1,273 | | 7,9 |
| No6-9 | 0,050 | 0,063 | 0,33 | 0,58 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,294 | 1,239 | | 4,2 |
| No4-10 | 0,060 | 0,070 | 0,40 | 0,70 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,082 | 1,089 | | -0,7 |
| No4-11 | 0,063 | 0,075 | 0,42 | 0,75 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,052 | 1,060 | | -0,7 |
| No4-12 | 0,068 | 0,078 | 0,45 | 0,80 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,994 | 1,029 | | -3,5 |
| No4-13 | 0,071 | 0,083 | 0,48 | 0,84 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,981 | 1,005 | | -2,4 |
| No4-14 | 0,077 | 0,086 | 0,51 | 0,91 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,909 | 0,970 | | -6,7 |
| No4-15 | 0,080 | 0,090 | 0,53 | 0,94 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,900 | 0,953 | | -5,9 |
| No4-16 | 0,085 | 0,096 | 0,57 | 1,00 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,872 | 0,928 | | -6,4 |
| No4-17 | 0,090 | 0,100 | 0,60 | 1,06 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,832 | 0,903 | | -8,6 |
| No4-8 | 0,050 | 0,061 | 0,33 | 0,58 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,241 | 1,185 | | 4,5 |
| No4-9 | 0,056 | 0,066 | 0,37 | 0,66 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,120 | 1,121 | | -0,1 |
| No6-10 | 0,053 | 0,067 | 0,35 | 0,62 | 0,05 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,256 | 1,155 | | 8,1 |
| No6-11 | 0,060 | 0,072 | 0,40 | 0,70 | 0,06 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,117 | 1,089 | | 2,5 |
| No6-12 | 0,064 | 0,077 | 0,43 | 0,76 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,072 | 1,054 | | 1,6 |
| No6-13 | 0,066 | 0,081 | 0,44 | 0,77 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 1,080 | 1,043 | | 3,4 |
| No6-14 | 0,074 | 0,087 | 0,49 | 0,87 | 0,07 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,985 | 0,991 | | -0,6 |
| No6-15 | 0,077 | 0,090 | 0,52 | 0,91 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,945 | 0,969 | | -2,6 |
| No6-16 | 0,082 | 0,095 | 0,55 | 0,97 | 0,08 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,910 | 0,942 | | -3,5 |
| No6-17 | 0,085 | 0,098 | 0,57 | 1,00 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,893 | 0,927 | | -3,8 |
| No6-18 | 0,087 | 0,102 | 0,58 | 1,02 | 0,09 | 0,90 | 0,96 | 5,91 | 0,901 | 0,920 | | -2,1 |
| Now1. 2-10 | 0,093 | 0,111 | 0,62 | 1,23 | 0,09 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,883 | 0,890 | | -0,7 |
| Now1. 2-11 | 0,099 | 0,118 | 0,66 | 1,31 | 0,10 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,854 | 0,864 | | -1,2 |
| Now1. 2-12 | 0,105 | 0,126 | 0,70 | 1,39 | 0,11 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,830 | 0,841 | | -1,3 |
| Now1. 2-13 | 0,114 | 0,135 | 0,76 | 1,49 | 0,12 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,798 | 0,813 | | -1,9 |
| Now1. 2-14 | 0,121 | 0,143 | 0,81 | 1,59 | 0,12 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,771 | 0,790 | | -2,6 |
| Now1. 2-15 | 0,127 | 0,149 | 0,84 | 1,67 | 0,13 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,746 | 0,774 | | -3,7 |
| Now1. 2-16 | 0,132 | 0,154 | 0,88 | 1,74 | 0,13 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,726 | 0,759 | | -4,6 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{in} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| Now1. 2-17 | 0,142 | 0,169 | 0,95 | 1,87 | 0,14 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,711 | 0,733 | | -3,2 |
| Now1. 2-6 | 0,060 | 0,075 | 0,40 | 0,79 | 0,06 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 1,148 | 1,086 | | 5,5 |
| Now1. 2-7 | 0,074 | 0,090 | 0,49 | 0,97 | 0,07 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 1,014 | 0,988 | | 2,5 |
| Now1. 2-8 | 0,083 | 0,098 | 0,55 | 1,09 | 0,08 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,927 | 0,937 | | -1,2 |
| Now1. 2-9 | 0,088 | 0,105 | 0,59 | 1,16 | 0,09 | 0,90 | 1,20 | 5,91 | 0,906 | 0,912 | | -0,7 |
| Now1. 5-10 | 0,090 | 0,112 | 0,60 | 1,37 | 0,09 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,938 | 0,903 | | 3,7 |
| Now1. 5-11 | 0,094 | 0,118 | 0,63 | 1,43 | 0,10 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,918 | 0,884 | | 3,7 |
| Now1. 5-12 | 0,102 | 0,126 | 0,68 | 1,54 | 0,10 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,876 | 0,855 | | 2,4 |
| Now1. 5-13 | 0,117 | 0,145 | 0,78 | 1,77 | 0,12 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,816 | 0,802 | | 1,7 |
| Now1. 5-14 | 0,126 | 0,155 | 0,84 | 1,91 | 0,13 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,786 | 0,776 | | 1,3 |
| Now1. 5-15 | 0,135 | 0,169 | 0,90 | 2,05 | 0,14 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,766 | 0,751 | | 2,0 |
| Now1. 5-8 | 0,076 | 0,099 | 0,51 | 1,16 | 0,08 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 1,062 | 0,975 | | 8,2 |
| Now1. 5-9 | 0,083 | 0,106 | 0,56 | 1,26 | 0,08 | 0,90 | 1,53 | 5,91 | 0,993 | 0,936 | | 5,7 |
| III | A. KABIRI-SAMANI VÀ CS | | | | | | | | | | | |
| KaB1 | 0,032 | 0,046 | 0,13 | 0,16 | 0,02 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,803 | 1,630 | 0,042 | 9,6 |
| KaB2 | 0,043 | 0,064 | 0,17 | 0,21 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,638 | 1,547 | 0,060 | 5,5 |
| KaB3 | 0,054 | 0,081 | 0,22 | 0,27 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,434 | 1,452 | 0,082 | -1,3 |
| KaB4 | 0,064 | 0,096 | 0,26 | 0,32 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,327 | 1,373 | 0,100 | -3,5 |
| KaB5 | 0,072 | 0,105 | 0,29 | 0,36 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,220 | 1,312 | 0,113 | -7,6 |
| KaB6 | 0,082 | 0,122 | 0,33 | 0,41 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,182 | 1,238 | 0,128 | -4,7 |
| KaB7 | 0,089 | 0,130 | 0,36 | 0,45 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,103 | 1,177 | 0,139 | -6,7 |
| KaB8 | 0,101 | 0,147 | 0,40 | 0,51 | 0,07 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,034 | 1,082 | 0,154 | -4,6 |
| KaB9 | 0,035 | 0,051 | 0,14 | 0,18 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,737 | 1,606 | 0,047 | 7,5 |
| KaB10 | 0,044 | 0,065 | 0,17 | 0,22 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,622 | 1,539 | 0,062 | 5,1 |
| KaB11 | 0,052 | 0,077 | 0,21 | 0,26 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,477 | 1,476 | 0,077 | 0,1 |
| KaB12 | 0,060 | 0,089 | 0,24 | 0,30 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,380 | 1,412 | 0,091 | -2,4 |
| KaB13 | 0,070 | 0,103 | 0,28 | 0,35 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,248 | 1,328 | 0,109 | -6,4 |
| KaB14 | 0,079 | 0,116 | 0,32 | 0,40 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,172 | 1,256 | 0,124 | -7,2 |
| KaB15 | 0,086 | 0,127 | 0,34 | 0,43 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,128 | 1,200 | 0,135 | -6,4 |
| KaB16 | 0,093 | 0,136 | 0,37 | 0,47 | 0,07 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,083 | 1,145 | 0,144 | -5,8 |
| KaB17 | 0,033 | 0,053 | 0,13 | 0,17 | 0,02 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,944 | 1,619 | 0,044 | 16,7 |
| KaB18 | 0,042 | 0,067 | 0,17 | 0,21 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,786 | 1,555 | 0,058 | 12,9 |
| KaB19 | 0,050 | 0,079 | 0,20 | 0,25 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,615 | 1,492 | 0,073 | 7,6 |
| KaB20 | 0,057 | 0,090 | 0,23 | 0,29 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,477 | 1,429 | 0,087 | 3,3 |

| Ký hiệu | H ₀ (m) | q _{tn} (m ² /s) | H ₀ /P | H ₀ /W _o | H ₀ /Lu | P/W _u | W _i /W _o | N | Cd.tn | Cd.tt | q _{tt} (m ² /s) | sai số (%) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------------------------------------|------------|
| KaB21 | 0,065 | 0,104 | 0,26 | 0,33 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,399 | 1,365 | 0,101 | 2,4 |
| KaB22 | 0,074 | 0,116 | 0,30 | 0,37 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,292 | 1,294 | 0,116 | -0,1 |
| KaB23 | 0,082 | 0,130 | 0,33 | 0,41 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,260 | 1,237 | 0,128 | 1,8 |
| KaB24 | 0,084 | 0,134 | 0,34 | 0,42 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,234 | 1,215 | 0,132 | 1,6 |
| KaB25 | 0,034 | 0,054 | 0,13 | 0,17 | 0,02 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,969 | 1,617 | 0,044 | 17,8 |
| KaB26 | 0,041 | 0,070 | 0,16 | 0,20 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,917 | 1,561 | 0,057 | 18,6 |
| KaB27 | 0,048 | 0,082 | 0,19 | 0,24 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,763 | 1,505 | 0,070 | 14,6 |
| KaB28 | 0,055 | 0,092 | 0,22 | 0,28 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,590 | 1,445 | 0,083 | 9,1 |
| KaB29 | 0,061 | 0,102 | 0,25 | 0,31 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,517 | 1,398 | 0,094 | 7,8 |
| KaB30 | 0,070 | 0,116 | 0,28 | 0,35 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,399 | 1,326 | 0,110 | 5,2 |
| KaB31 | 0,076 | 0,127 | 0,31 | 0,38 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,361 | 1,278 | 0,120 | 6,1 |
| KaB32 | 0,084 | 0,141 | 0,33 | 0,42 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,318 | 1,220 | 0,131 | 7,4 |
| KaB33 | 0,032 | 0,051 | 0,13 | 0,16 | 0,02 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,979 | 1,628 | 0,042 | 17,7 |
| KaB34 | 0,040 | 0,067 | 0,16 | 0,20 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,917 | 1,570 | 0,055 | 18,1 |
| KaB35 | 0,048 | 0,081 | 0,19 | 0,24 | 0,03 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,765 | 1,507 | 0,069 | 14,6 |
| KaB36 | 0,055 | 0,093 | 0,22 | 0,28 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,614 | 1,445 | 0,083 | 10,5 |
| KaB37 | 0,062 | 0,105 | 0,25 | 0,31 | 0,04 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,517 | 1,390 | 0,096 | 8,4 |
| KaB38 | 0,068 | 0,115 | 0,27 | 0,34 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,451 | 1,342 | 0,106 | 7,5 |
| KaB39 | 0,074 | 0,124 | 0,30 | 0,37 | 0,05 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,390 | 1,296 | 0,116 | 6,8 |
| KaB40 | 0,081 | 0,136 | 0,33 | 0,41 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,322 | 1,240 | 0,127 | 6,2 |
| KaB41 | 0,084 | 0,141 | 0,33 | 0,42 | 0,06 | 0,63 | 1,00 | 3,50 | 1,317 | 1,221 | 0,131 | 7,3 |

Ghi chú: - Ký hiệu số liệu thực nghiệm tương ứng với các nghiên cứu:

N: luận án; D: Đề tài cấp Bộ; Ma: O. Machiels và cs;

No: A. Noui và cs; Ka: A. Kabiri-Samani và cs

- X_{tn}: X_{tt} giá trị thí nghiệm; X_{tt}: giá trị tính toán theo công thức xây dựng.

sai số = (q_{TT}-q_{TN})/q_{TN} %.