

XÂY DỰNG CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHẢ NĂNG THÁO CHO TRÀN PIANO CHẢY TỰ DO

Lê Văn Nghị, Đoàn Thị Minh Yên

Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam

Tóm tắt: Tràn piano (PKW) là tràn kiểu mới được nghiên cứu, phát triển, ứng dụng mạnh mẽ trong 20 năm gần đây. Đến nay đã có nhiều nghiên cứu trong xác định cấu tạo của tràn, xác định các yếu tố hình học chính, yếu tố thủy lực chính ảnh hưởng đến khả năng tháo qua PKW. Tuy nhiên việc thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua PKW vẫn còn rời rạc. Các công thức đã công bố tiếp cận theo các giới hạn của tỷ lệ hình học cấu tạo tràn và loại tràn (A, B, công xôn 1 đầu hoặc 2 đầu) mà không tiếp cận theo các trạng thái chảy qua PKW nên có độ chính xác thấp. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thiết lập công thức xác định khả năng tháo qua tràn piano phân theo các trạng thái chảy từ số liệu thí nghiệm trên mô hình vật lý. Công thức xây dựng có sai số dưới 12,5% so với kết quả thí nghiệm của nhiều tác giả, phù hợp để tính toán trong thực tế.

Từ khóa: Khả năng tháo, Tràn Piano, Mô hình thí nghiệm vật lý

Summary: Piano Key Weir (PKW) is a new spillway type that has been researched, developed and strongly applied in the last 20 years. To date, there have been many studies in the determination of the structure, determining the main geometric elements, the key hydraulic factors affecting to the discharge capacity of PKW. However, the establishment of the formula for determining the discharge capacity is still discrete. The published formulas have accessed to the limits of the geometry and types (type A, type B, console 1 or 2 sides) without accessing to the state of flow through the spillway. So that these formulas have not reached to strictly accuracy. The paper is presented the research results of establishing the formula of determination the discharge capacity by flow states, from experimental data on physical models. The author's formula has a error of less than 12.5% compared to the results of many authors' experiments and is suitable for practical calculations.

Keywords: Discharge capacity, Piano key weir, physical experimental model.

1. MỞ ĐẦU

Tràn piano là hình thức công trình tháo lũ kiểu mới, với đường tràn zic zắc cho năng lực tháo lớn hơn từ 4÷5 lần so với tràn truyền thống khi có cùng chiều rộng tràn, cột nước tràn, mà không làm tăng diện tích mặt bằng công trình. Đây là một giải pháp hiệu quả nhằm tăng khả năng xả cho các công trình tháo có điều kiện mặt bằng hẹp hoặc trong nâng cấp các công trình đã có. Do đó PKW đang ngày càng được

quan tâm, nghiên cứu, áp dụng cho công trình thủy lợi, thủy điện trên thế giới và ở Việt Nam.

Những tràn kiểu phím piano đầu tiên được xây dựng tại Pháp, như tràn đặt trên đỉnh đập Golours (Laugier, 2006), đập St Marc (2008), đập Etroit (2009); đập Gloriettes (2010) và đập Malarce (2011); tràn xả lũ thủy điện Sawara Kuddu, Ấn Độ (2005); tràn xả lũ của đập đá đổ Dartmouth trên sông Mitta Mitta, Australia (2013); tràn bên trên nền địa chất yếu của đập

Ngày nhận bài: 02/5/2019

Ngày thông qua phản biện: 10/6/2019

Ngày duyệt đăng: 12/6/2019

đất sét Ramdane Djamel ở Đông Bắc An-giê-ri (2012)... Ở Việt Nam đã có một số công trình áp dụng kiểu tràn PKW như Thủy điện Đắk Mi 4B, Đắk Mi 2, Đắk Mi 3 (Quảng Nam, 2010); Thủy điện Vĩnh Sơn 3, đập dâng Văn Phong (Bình Định, 2011); Thủy điện Xuân Minh (Thanh Hóa, 2013); Hồ chứa nước Đạ Sị (Lâm Đồng, 2018).

Các công trình trên là kết quả ứng dụng từ các nghiên cứu của nhiều tác giả, nhóm nghiên cứu: HydroCoop, Điện lực Pháp, Đại học Biskra (An-giê-ri), Đại học Roorkee (Ấn Độ) từ những năm 1999÷2002, F. Lempérière và cs (2003÷2011), A.Noui & A.Ouamane (2011), G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013), S. Erpicum và cs (2014). Nghiên cứu về PKW tại Việt Nam có các tác giả như Trương Chí Hiền, Trần Hiếu Thuận (2004), M. Hồ Tá Khanh, Nguyễn Thanh Hải và cs (2010÷2018), Lê Văn Nghị, Đoàn Thị Minh Yên và cs (2012÷2019).

2. CẤU TẠO VÀ ĐẶC ĐIỂM DÒNG CHẢY QUA TRÀN PIANO

2.1. Cấu tạo hình học tràn piano

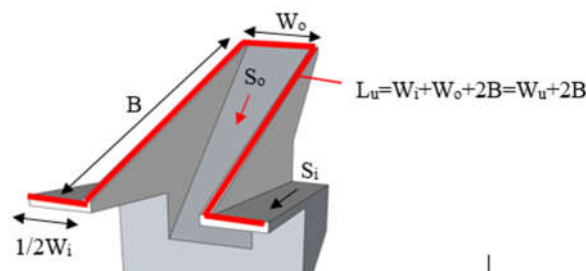
Đến nay tràn piano được phân thành 05 loại [11]. Ở Việt Nam, trong tiêu chuẩn [5] tràn piano được chia thành 02 loại là loại công xôn 1 đầu (PK1-loại B) và công xôn 2 đầu (PK2-loại A) nhằm khái quát hóa hơn về tràn loại A và B.

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 ra 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 $L = n \cdot L_u$; tổng chiều rộng thoát nước theo chiều vuông góc với trục dòng chảy là $W = n \cdot W_u$ 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, Hình 2). Để hài hòa giữa bài toán kinh tế và hiệu quả tháo, trị số N của piano nên trong khoảng từ 4÷6 [3], tương đương $2B = (3÷5)W_u$.



Hình 1: Cấu tạo đơn vị tràn tràn piano

2.2. Cấu tạo dòng chảy qua tràn piano

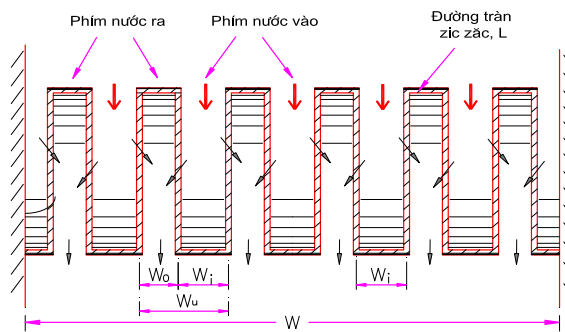
Dòng chảy qua tràn piano gồm 3 phần tương ứng với cấu tạo hình học dạng zíc zắc của ngưỡng, (Hình 3):

- Phần 1: dòng chảy tràn qua tường thượng lưu phím nước ra, chiều dài tràn nước là L_1 ;
- Phần 2: dòng chảy tràn qua tường hạ lưu của phím nước vào, chiều dài tràn nước là L_2 ;
- Phần 3: dòng chảy tràn qua thành bên của các phím, chiều dài tràn nước là L_3 .

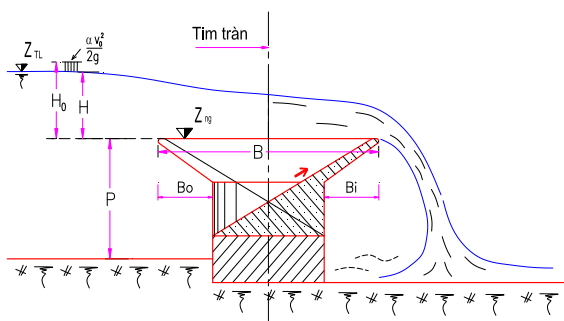
Khi cột nước tràn thấp (H nhỏ), dòng chảy bám theo toàn đường zíc zắc, có thể coi chiều dài tràn nước là tổng đại số của 3 thành phần $L = L_1 + L_2 + L_3$ và $L_1 \approx W_o$; $L_2 \approx W_i$; $L_3 \approx 2B$.

Tuy nhiên khi cột nước tràn cao (H lớn), dòng qua phần 1 lần dần sang phần 3; một phần dòng chảy cuối phần 3 bị hạn chế bởi hiện tượng ứ nước do giao thoa của hai dòng bên cùng đổ xuống phím nước ra, ranh giới ảnh hưởng này được xác định là tỷ lệ cột nước tràn trên chiều rộng phím nước ra $H/W_o = 0,5$ [4], làm giảm khả năng thoát nước qua phần 3. Do đó việc coi chiều dài thoát nước qua tràn là tổng đại số của 3 thành phần hình học L_1 , L_2 , L_3 là không còn

phù hợp.



a. Cấu tạo mặt bằng



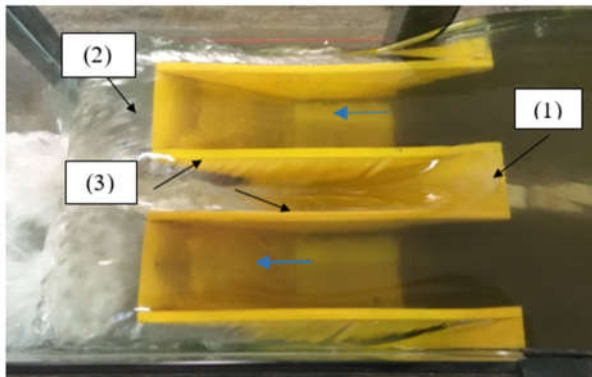
b. Cắt ngang tràn chảy tự do

Hình 2: Cấu tạo tràn piano

3. MỘT SỐ CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUÁ PKW

3.1. Các dạng công thức tính khả năng tháo

Do cấu tạo hình học phức tạp, dòng chảy qua tràn gồm nhiều thành phần nên việc thiết lập công thức tính lưu lượng tháo qua tràn piano cũng đa dạng hơn tràn truyền thống, được tiếp cận theo 2 hướng:



Hình 3: Các thành phần dòng chảy qua PKW

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 zíc zắc L (1) hoặc chiều rộng tràn W (2), (3).

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

$$Q = C_{d2} \cdot W \cdot \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (b)$$

$$Q = C_{d3} \cdot W \cdot H \cdot \sqrt{2gP}; \quad (c)$$

+ 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 :

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

Công thức dạng (4) chỉ phù hợp với KW có cột nước tràn nhỏ, khi cột nước tràn lớn, ranh giới giữa 3 thành phần dòng chảy khó phân biệt rõ ràng như phân tích trên mục 2.2 nên sẽ cho sai số lớn, có rất ít nghiên cứu áp dụng dạng này.

2. Hai là xác định gián tiếp: thông qua hệ số hiệu quả tháo $r = Q_p / Q_o$ so với tràn thực dụng. Hệ số r 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.

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 .

3.2. Công thức tính hệ số khả năng tháo

1/. M.Leite Ribeiro et al.(2011), xác định “chiều dài tràn hiệu quả” r là hàm mũ của các thông số theo công thức (5), [13]:

$$r = e^y - 1 = Q_P / Q_O \quad (e)$$

Trong đó y là hàm của đa thức của 5 biến:

$$\frac{P}{W_i}; \frac{L}{W_i}; \frac{L}{W}; \frac{W_i}{W_o} \text{ và } \frac{H}{P}.$$

2/. G.M.Cicero & J.R.Delisle (2013) nghiên cứu tràn có tỷ lệ chiều dài $N=L/W=6,5$, tỷ lệ chiều rộng phím nước vào và phím nước ra $W_i/W_o=1,0$ tỷ lệ cột nước tràn và chiều cao tràn trong phạm vi $0,1 < H/P < 0,8$. Lưu lượng qua tràn tính theo công thức (2), hệ số khả năng tháo C_d được xác định là hàm bậc bốn của đại lượng H/P [11].

3/. Abdorreza Kabiri-Samani & Javaheri (2012) xác định hệ số tháo C_d của PKW trong công thức (2) là hàm mũ của 6 biến [8]:

$$\frac{L}{W}; \frac{W_i}{W_o}; \frac{B}{P}; \frac{B_o}{B}; \frac{B_i}{B} \text{ và } \frac{H_o}{P}. \text{ với giới hạn } H > 3\text{cm};$$

$$0,1 \leq H_o/P \leq 0,6; 1,0 \leq B/P \leq 2,5; 0,3 \leq W_i/W_o \leq 1,22; 0 \leq B_o/B \leq 0,26; 0 \leq B_i/B \leq 0,2$$

4/. Hồ Tá Khanh, Trương Chí Hiền (2004) qua thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm thủy lực của Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh cho tràn kiểu A với chiều cao hóc phím công trình thực tế $P_P=4,5\text{m}$, $P=5,5\text{m}$, chảy tự do, đưa ra công thức cụ thể theo chiều cao và cột nước tràn [12]:

$$\text{Với } N=4: q=5,6.H^{1,22}.$$

$$N=5: q=6,4.H^{1,28} \quad (H < 2\text{m}) \quad (f)$$

$$\text{và } q=4,15.H\sqrt{P_P} \quad (H > 2\text{m})$$

5/. Tiêu chuẩn Việt nam TCVN 12262:2018 (2018), lưu lượng tháo cho tràn PKW có công xôn lệch về hai phía PK2, và công xôn lệch về 1 phía thượng lưu PK1 được xác định theo công thức (2). Các hệ số khả năng tháo được xác định từ kết quả thực nghiệm trên mô hình vật lý với

trần có các thông số hình học ở nguyên hình: $W_u = 4,8 \div 10,5\text{m}$; $W_i/W_o = 1,2$; $B = 12\text{m}$; $P_T = 3 \div 8\text{m}$ (PK2); $B = 18\text{m}$; $P_T = 4 \div 12\text{m}$ (PK1); công thức tính hệ số tháo C_d thiết lập riêng cho tràn PK1, PK2 theo vùng cột nước tràn với ranh giới $H=3,0\text{m}$ (PK1); $H=2,0\text{m}$ (PK2) và là hàm mũ của 2 biến $\frac{P_T}{H_o}; \frac{W_u}{H_o}$, [5].

6. Nhận xét về các công thức đã có

+ Giá trị hệ số r và hệ số khả năng tháo C_d phụ thuộc vào các thông số $H, P, P_P, W_i, W_o, W, L, B, B_o, B_i$ hay ảnh hưởng chính tới khả năng tháo qua PKW là các đại lượng cơ bản: tỷ lệ giữa chiều cao và chiều rộng đơn vị tràn P/W_u ; tỷ lệ giữa chiều rộng phím nước vào và phím nước ra W_i/W_o ; tỷ lệ giữa chiều dài đường tràn và chiều rộng tràn nước $N=L/W$;

+ Các công thức được lập của các nghiên cứu đều giới hạn trong điều kiện công trình cụ thể (N, P) với $H/P < 0,7$ và là hàm đa biến (4÷6 biến) hoặc hàm đơn giản dạng tuyến tính/dạng mũ của cột nước H ; hàm bậc bốn của H/P .

+ Gần đây nhất, trong Tiêu chuẩn Việt nam (2018) với giới hạn áp dụng theo đại lượng có thứ nguyên (cột nước, chiều cao tràn, chiều rộng phím) đã được quy đổi ra kích thước công trình thực tế sẽ làm tăng sai số áp dụng do chuyển đổi tỷ lệ mô hình. Tuy nhiên nó có ưu điểm là không phức tạp nhưng vẫn biểu diễn được các yếu tố cơ bản của tràn piano, khi áp dụng nhiều trường hợp có sai số khá lớn đến 20%, đặc biệt với miền cột nước thấp.

4. XÂY DỰNG CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG THÁO QUA TRÀN PIANO

4.1. Mô hình nghiên cứu

Mô hình vật lý được thiết kế, xây dựng, thí nghiệm theo Tiêu chuẩn TCVN 8214:2009 về thí nghiệm mô hình thủy lực; trên máng kính rộng 0,5m, dài 22m, cao 1,0m; đầu mỗi tràn piano được chế tạo bằng kính hữu cơ; kênh dẫn thượng hạ lưu dùng vữa xi măng trát phẳng, đánh bóng.

Tràn PKW dùng để thí nghiệm có đơn vị tràn là tràn tiêu chuẩn [3]: Đầu mỗi tràn piano gồm 2 đơn vị tràn (hai cặp phím vào và phím ra); chiều rộng đơn vị tràn 25cm; chiều cao tràn $P = 11 \div 27\text{cm}$; tỷ lệ các kích thước hình học: $P/W_u = 0,5 \div 1,1$; $W_i/W_o = 1,25$; $N = L/W = 5$; $B_i/B_o = 1,0$; $B/B_o = 4,0$; $P_o/P_i = 1,0$. Chi tiết hình dạng mặt cắt tràn đề cập như thể hiện trên Hình 4. Tỷ lệ cột nước tràn thực nghiệm trong khoảng $H/P = 0,17 \div 2,10$.

Nghiên cứu thực nghiệm với hơn 150 trường hợp là tổ hợp của các đại lượng không thứ nguyên: tỷ lệ cột nước tràn $H/P=0,17 \div 2,1$, tỷ lệ cột nước với chiều rộng phím ra $H_0/W_o=0,32 \div 2,5$; tỷ lưu lượng qua tràn $q=0,03 \div 0,32 \text{ m}^3/\text{m.s}$. Chiều sâu cột nước tràn nhỏ nhất thí nghiệm $H_{\min} \geq 3\text{cm}$.

Đo đạc các thông số thực nghiệm: Thông số mực nước xác định bằng kim đo mực nước cố định đọc chính xác tới 0,1mm và máy thủy bình Ni04 sai số không vượt quá 0,5mm. Xác định giá trị lưu tốc trung bình thời gian bằng đầu đo điện tử PEMS, E40 do Hà Lan chế tạo; dải đo từ 0,05m/s đến 5,0m/s, sai số 1%. Lưu lượng tháo vào mô hình được xác định bằng máng lường hình chữ nhật có lắp đập tràn thành mỏng và tính toán bằng công thức Rebock, sai số nhỏ hơn 1%.

4.2. Xây dựng công thức từ kết quả thí nghiệm

4.2.1. Xây dựng công thức thực nghiệm

+ Để xác định khả năng tháo qua tràn piano, bài báo sử dụng công thức tính lưu lượng trực tiếp như của tràn thực dụng, với trạng thái chảy tự do:

$$Q = C_d \cdot W \cdot \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (g)$$

Trong đó hệ số khả năng tháo C_d xác định từ các số liệu thực nghiệm, là hàm của các biến:

$$C_d = f(H_0/P, H_0/W_u, H_0/L_u) \quad (h)$$

+ Từ kết quả nghiên cứu đặc điểm dòng chảy trên tràn piano, chúng tôi đã phân định dòng chảy qua tràn gồm 2 trạng thái là chảy đầy và

chảy không đầy phím ra với giá trị ranh giới là $H_0/W_o=0,5$ [4]. Hai trạng thái này có đặc điểm dòng chảy khác nhau, ảnh hưởng bởi cấu tạo hình học tràn và cột nước đến khả năng tháo là rõ rệt. Do vậy các công thức tính hệ số khả năng tháo cần được viết riêng cho hai trạng thái này.

- Với trạng thái chảy không đầy phím ra ($H_0/W_o \leq 0,5$), C_d có dạng tương tự như hệ số lưu lượng của đập tràn thành mỏng chảy tự do – dạng hàm tuyến tính:

$$C_d = a + b \cdot \frac{H_0}{P} + c \cdot \frac{H_0}{L_u} \quad (i)$$

- Với trạng thái chảy đầy phím ra ($H_0/W_o > 0,5$), C_d là hàm theo các biến H_0/P , H_0/W_u , khảo sát và thử nghiệm cho thấy dạng hàm mũ cho kết quả tốt nhất.

$$C_d = a_0 \left(\frac{H_0}{P} \right)^{a_1} \left(\frac{H_0}{W_u} \right)^{a_2} \quad (j)$$

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 như sau:

+ Khi chảy không đầy phím ra ($H_0/W_o \leq 0,5$):

$$C_d = 1,885 - 1,768 \frac{H_0}{P} - 1,215 \frac{H_0}{L_u} \quad (k)$$

+ Khi chảy đầy phím ra ($H_0/W_o > 0,5$):

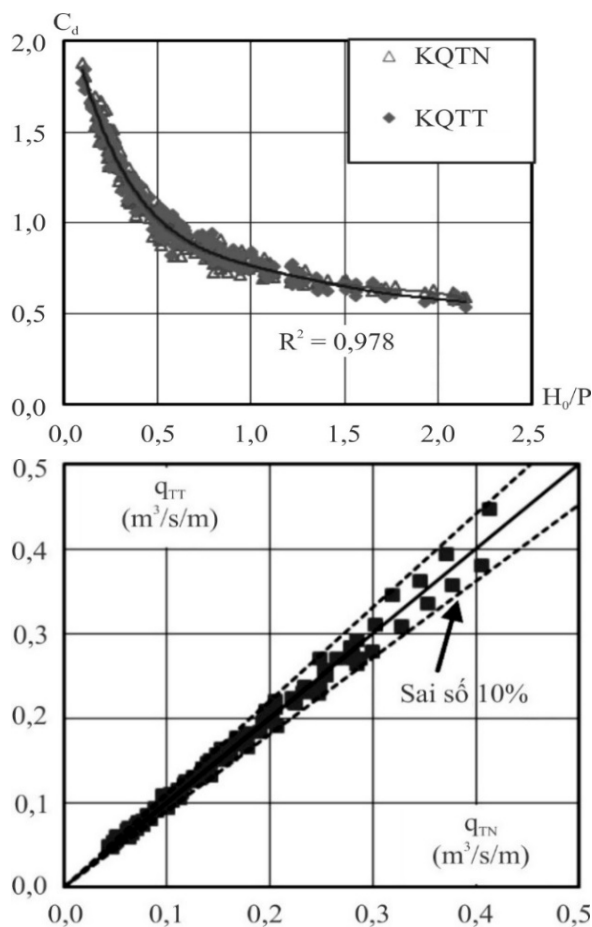
$$C_d = 0,705 \left(\frac{H_0}{P} \right)^{-0,306} \left(\frac{H_0}{W_u} \right)^{-0,150} \quad (l)$$

Kết quả 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, sai số giữa tính toán và thực nghiệm xây dựng công thức lớn nhất là 6,9% nên công thức được chấp nhận.

4.2.2. Đánh giá và bình luận

Sự phù hợp của công thức thiết lập được biểu

thị trên đồ thị Hình 4, trong đó khảo sát kết quả tính theo công thức thiết lập và dữ liệu thí nghiệm của bài báo; dữ liệu thí nghiệm của các tác giả khác.



Hình 4: So sánh kết quả tính theo công thức thiết lập với số liệu của các tác giả khác

So sánh giữa kết quả tính theo công thức thực nghiệm thiết lập và số liệu thực nghiệm của các tác giả khác cho thấy: sai số trung bình lớn nhất là 6,9% và sai số tuyệt đối lớn nhất là 12,6%. Sai số trung bình này là nhỏ so với sai số của những công thức đã công bố.

Ngoài ra, công thức thực nghiệm thiết lập được kiểm chứng với miền biến thiên rộng của các đại lượng hình học và cột nước, đại diện cho PKW có đơn vị tràn tiêu chuẩn [4], 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 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% [4]. Đó là do hiệu quả tháo của các hình thức tràn chỉ khác nhau rõ rệt với cột nhỏ, khi 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 zic zắc L.

5. KẾT LUẬN

- Chọn đối tượng nghiên cứu là tràn piano có đơn vị tràn tiêu chuẩn đại diện cho cấu tạo hài hòa về kinh tế, thủy lực để nghiên cứu thực nghiệm: Tràn có $N=5$; $W_i/W_0=1,3$; $H_0/W_0=0,32 \div 2,5$; Tỷ lệ cột nước và chiều cao tràn $H/P=0,17 \div 2,1$.

- Công thức xác định lưu lượng tháo qua PKW theo dạng công thức của tràn truyền thống, từ phân tích đặc trưng thủy lực theo hai trạng thái chảy đầy và không đầy phím nước ra, xây dựng được công thức tính hệ số khả năng tháo theo (11), (12) tương ứng với 02 trạng thái chảy.

- Công thức thiết lập cho sự phù hợp hơn cả so với các công thức đã có, so sánh với số liệu thực nghiệm của các tác giả khác cho sai số trung bình lớn nhất là 6,9%; sai số tuyệt đối lớn nhất là 12,6%, phù hợp với tràn loại A và loại B hay công xôn 1 đầu và công xôn 2 đầu.

Các ký hiệu thông số tràn piano thể hiện trên Hình 1, Hình 2:

Z_{TL} : Cao trình mực nước thượng lưu (m)

Z_{ng} : Cao trình đỉnh ngưỡng tràn (m)

P: Chiều cao phía thượng lưu tràn, độ chênh giữa ngưỡng tràn với đáy kênh thượng lưu (m);

H: Cột nước tràn, chênh giữa cao trình mực nước thượng lưu với đỉnh ngưỡng tràn;

H_0 : Cột nước tràn có kể tới lưu tốc tới gần (m);

Q (Q_p): lưu lượng tháo qua tràn Piano chảy tự do (m^3/s);

q: lưu lượng đơn vị ($m^3/s.m$);

W_i : Chiều rộng phím nước vào (m);

W_o : Chiều rộng phím nước ra (m);

W_u : Chiều rộng 1 đơn vị tràn, $W_u = W_i + W_o$ (m);

W : Chiều rộng tràn theo phương vuông góc với dòng chảy, bằng tổng chiều rộng các phím nước vào và phím nước ra, $W = \sum W_i + \sum W_o$ (m);

B, B_i, B_o : Chiều dài phím tràn; Chiều dài phần nhô thượng lưu, hạ lưu phím (m);

L : Tổng chiều dài đường tràn zíc zắc của ngưỡng tràn (m);

L_u : Chiều dài đường zíc zắc ngưỡng của một đơn vị tràn (m);

N : Hệ số chiều dài đường tràn, bằng tỷ lệ giữa chiều dài tràn và chiều rộng tràn, $N = L/W$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2011), *Tiêu chuẩn thiết kế tràn phím đàn Piano áp dụng cho công trình đập dâng Văn Phong*;
- [2] 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*.
- [3] Lê Văn Nghị và cs (2018), “*Thủy lực tràn Piano*”, Sách chuyên khảo, Nhà XB Khoa học và Kỹ thuật, Hà nội.
- [4] Đoàn Thị Minh Yến, Lê Văn Nghị (2017), “*Đặc trưng hình dạng và nối tiếp của dòng chảy qua tràn piano*”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi*, Hà Nội;
- [5] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 12262: 2018, *Công trình thủy lợi - Tràn xả lũ, tính toán thủy lực tràn dạng phím piano*, Hà Nội.
- [6] A.J. Schleiss (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;
- [7] A.Noui & A. Ouamane (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;
- [8] Abdorreza Kabiri-Samani & Amir Javaheri, (2012), IAHR, Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs.
- [9] F.Lempérière & A.Ouamane (2003), “The Piano Keys weir: a new cost – effective solution for spillways”, *Hydropower & Dams*, 7(5):144-149;
- [10] F.Lempérière., J.-P.Vigny & A.Ouamane (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;
- [11] G.M.Cicero & J.R.Delisle (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;
- [12] 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;

- [13] M.Leite Ribeiro, J-L.Boillat, A.J Schleiss, O.Le Doucen & F.Laugier (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;
- [14] O.Machiels, S.Erpicum, P.Archambeau, B. Dewals & M.Pirotton (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;
- [15] Olivier Machiels, Michel Pirotton et al. (2014) “Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs”, Journal of Hydraulic Research.
- [16] S.Erpicum, P.Archambeau, M.Pirotton, and B.J.Dewals, (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.
- [17] Sebastien Erpicum, Blake P.Tullis et al. (2016), IAHR, Scale effects in physical piano key weirs models.