

ĐÁNH GIÁ CƠ CHẾ HÌNH THÀNH XOÁY MẶT TỰ DO VÀ CUỐN KHÍ TẠI CỬA LẤY NƯỚC THỦY ĐIỆN BẰNG TIÊU CHÍ (Δ , Fr_h): TRƯỜNG HỢP GIBE III VÀ NẬM MA 2

Nguyễn Thị Nhó¹

Tóm tắt: Nghiên cứu này xây dựng bản đồ vận hành hai chiều $\Delta(Q-Z)$ và $Fr_h(Q-Z)$ nhằm mô tả quá trình khởi phát và phát triển của xoáy mặt tự do (VT_1-VT_6) tại cửa lấy nước của trạm thủy điện theo hai tiêu chí: “không cuốn khí -Zero-air” và “cuốn khí cho phép -Air-allowance”, $\beta = 1 \times 10^{-5}$). Bằng việc kết hợp phân tích định lượng và dữ liệu thực tế từ hai trạm Gibe III (Ethiopia) và Nậm Ma 2 (Lào), nghiên cứu đã xác lập ranh giới vận hành an toàn theo các mức độ xoáy. Với trạm Gibe III, ngưỡng an toàn $\Delta \approx 0$ xuất hiện thấp hơn thiết kế khoảng 3 m, cảnh báo sớm hơn tín hiệu Fr_h ; với Nậm Ma 2, Fr_h duy trì thấp nên chấp nhận “mức cuốn khí cho phép” ở mức VT_3 giúp mở rộng vùng làm việc. Đây sẽ là cơ sở đánh giá lại thiết kế, xác định ngưỡng an toàn, và đề xuất cơ sở dữ liệu tham chiếu cho vận hành của trạm thủy điện.

Từ khóa: Xoáy mặt tự do, cửa lấy nước, độ ngập tới hạn, Gibe III và Nậm Ma 2.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cửa lấy nước (CLN) của các trạm thủy điện (TTĐ) kiểu lòng sông thường xuyên phải làm việc trong điều kiện mực nước thay đổi nhiều. Đặc biệt là vào mùa kiệt, khi mực nước hạ thấp, dễ phát sinh xoáy mặt tự do. Nếu mô-men xoáy đủ lớn, xoáy này có thể phát triển thành xoáy lõi khí, kéo không khí từ mặt thoáng vào đường ống áp lực. Quá trình này làm giảm hiệu suất, rung ồn, dao động áp lực, nguy cơ xâm thực và hư hại thiết bị (Walke, 2016).

Về mặt lý thuyết, dòng xoáy tại cửa lấy nước thường được mô tả như một dòng xoáy trục đứng, trong đó cân bằng động lượng theo phương bán kính được biểu diễn bởi phương trình (1) (Gordon, 1970; Ettema, et al., 2015).

$$\frac{v_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1)$$

Với v_θ là vận tốc tiếp tuyến (m/s), r là bán kính tính từ trục xoáy (m), ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m^3) và p là áp suất (Pa). Quan hệ (1) cho thấy sự suy giảm áp suất tại tâm xoáy do cân bằng giữa lực ly tâm và gradient áp suất, là cơ sở vật lý của sự hình thành lõi khí khi áp suất giảm xuống dưới áp suất khí quyển.

Cấu trúc xoáy thường được mô tả bằng mô hình xoáy như phương trình (2), bao gồm xoáy cưỡng bức gần trục và xoáy tự do ở vùng phía ngoài. Trong đó r_c là bán kính lõi xoáy (m), Ω là tốc độ góc của vùng xoáy cưỡng bức (rad/s) và Γ là cường độ xoáy (m^2/s). Mô hình này phản ánh đặc trưng phân bố vận tốc của dòng xoáy, đồng thời làm rõ vai trò chi phối của kích

thước cửa D và độ ngập h đối với cấu trúc xoáy và khả năng hình thành lõi khí (Ettema, et al., 2015).

$$v_\theta(r) = \begin{cases} \Omega r, & r \leq r_c \\ \frac{\Gamma}{2\pi r}, & r > r_c \end{cases} \quad (2)$$

Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu chuyên sâu về xoáy mặt tự do tại CLN thủy điện, tập trung vào việc xác định độ ngập tới hạn, hệ số cuốn khí và các tiêu chí phân loại mức độ xoáy (Knauss, 2007; Möller, 2013). Các nghiên cứu này đã làm rõ mối quan hệ giữa số Froude theo độ ngập h (Fr_h), theo chiều cao cửa lấy nước D (Fr_D) và độ sâu tương đối (h/D), từ đó đề xuất các mô hình thực nghiệm và lý thuyết phục vụ thiết kế CLN. Đặc biệt, (Möller, 2013) đã mở rộng phạm vi đánh giá bằng tiêu chí “air-allowance” - cho phép một mức cuốn khí nhỏ nhưng vẫn đảm bảo an toàn thủy lực.

Theo (Gordon, 1970), độ ngập tới hạn $(h/D)_{cr}$ được xác định là điều kiện biên thấp nhất mà tại đó xoáy mặt tự do bắt đầu cuốn khí có thể quan sát hoặc đo được, và được tính như phương trình (3).

$$\left(\frac{h}{D}\right)_{cr} = \frac{\xi V}{\sqrt{gD}} + 0.5 = \xi Fr_D + 0.5 \quad (3)$$

Trong đó, V là vận tốc trung bình tại mặt cắt khảo sát (m/s); g là gia tốc trọng trường (m/s^2), Fr_D và Fr_h là số Froude đặc trưng theo đường kính D và độ ngập h , và được xác định theo phương trình (4), h là khoảng cách thẳng đứng từ mặt thoáng đến tâm CLN hoặc tâm mặt cắt tính toán (m), D là chiều cao hoặc đường kính tại vị trí xét (m). Các ký hiệu được minh họa trong Hình 1.

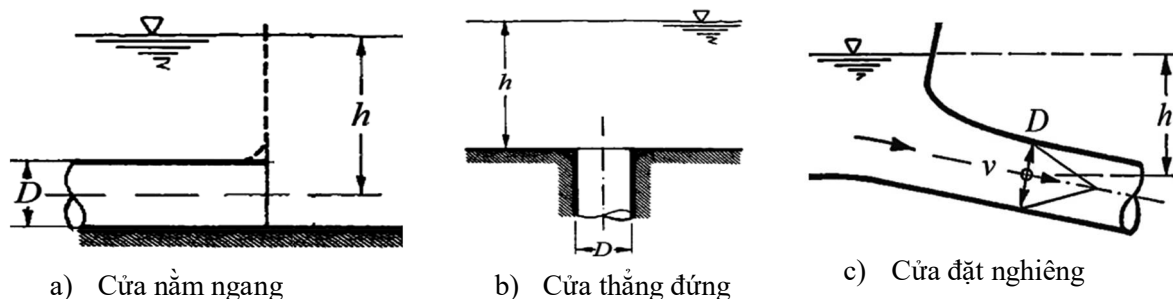
¹Trường Đại học Thủy lợi

$$Fr_D = \frac{v}{\sqrt{gD}}; \quad Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

Công thức (3) áp dụng với $\xi=1.702$ (dòng đối xứng), $\xi=2.269$ (dòng không đối xứng). Sau đó, Knauss (2007) đưa ra công thức (5) chỉ áp dụng cho cửa tròn, dòng đối xứng, và $Fr_D > 0.5$. Đây là hướng dẫn thiết kế sơ bộ, đặc biệt phù hợp cho các CLN quy mô nhỏ hoặc có trường dòng đều.

$$\left(\frac{h}{D}\right)_{cr} = \frac{2V}{\sqrt{gD}} + 0.5 = 2Fr_D + 0.5 \quad (5)$$

Các nghiên cứu khác của (Kent Walker, 2016; M. Padmanabhan, 1984) cũng cho các kết quả gần tương tự của Gordon. Tuy nhiên, các nghiên cứu sau đó của Suerich (2014) cho thấy xoáy yếu có thể vẫn tồn tại ngay cả khi đạt đến $(h/D)_{cr}$ phản ánh rằng chỉ tiêu này chưa đủ để mô tả toàn diện hiện tượng.



Hình 1. Định nghĩa độ ngập h của cửa lấy nước theo Knauss (Knauss, 2007)

Công thức (7) áp dụng trong miền $0.26 \leq Fr_D \leq 1.2$. Khi đối chiếu với các mô hình của Knauss (1987) và Gordon (1970), Möller nhận thấy rằng theo mô hình “air-allowance”, xuất hiện các tín hiệu rõ ràng thể hiện sự chuyển pha thủy động học trong quá trình hình thành lõi khí và được xem là mốc để phân cấp mức độ xoáy VT₁–VT₆.

Phương pháp nghiên cứu dựa trên mô hình vật lý là đáng tin cậy, tuy nhiên, phương pháp này bị hạn chế bởi chi phí và thời gian lớn khi cần khảo sát nhiều phương án hình học và chế độ vận hành khác nhau. Phương pháp mô phỏng số CFD dòng hai pha kết hợp các phương pháp bắt mặt thoáng (VOF/CLSVOF) và mô hình rối (LES/DES) mang lại hiệu quả cao (Ettema, et al., 2015). Tại Việt Nam, các nghiên cứu theo hướng này còn rất hạn chế, đặc biệt đối với các TTĐ đang vận hành, cho thấy nhu cầu cấp thiết về các khung đánh giá và công cụ phân tích phù hợp với điều kiện thực tế.

Theo TCVN 9151-2012, việc không chế hiện tượng xoáy mặt thoáng và xoáy có lõi khí tại CLN được tiếp cận chủ yếu theo hướng thiết kế tĩnh, thông qua các yêu cầu về hình dạng cửa, bố trí kết cấu và đặc biệt là độ ngập tối thiểu (TCVN 9151:2012). Các

Möller (2013) và Ettema et al. (2015) mở rộng khái niệm độ ngập tới hạn bằng cách bổ sung thêm tiêu chí “Air-allowance” - cho phép một mức cuốn khí nhỏ nhưng vẫn đảm bảo an toàn thủy lực, giúp vận hành linh hoạt hơn. Tỷ lệ cuốn khí β được định nghĩa như sau:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (6)$$

Trong đó Q_a và Q_w lần lượt là lưu lượng không khí và nước (m^3/s). Với mức độ cuốn khí tối thiểu đo được là $\beta = 1 \times 10^{-5}$, Möller đã xác định độ ngập tới hạn như phương trình (7):

$$\left(\frac{h}{D}\right)_{cr} = -2.5Fr_D^{-0.45} + 5.3 \quad (7)$$

quy định trong tiêu chuẩn này tập trung phục vụ giai đoạn thiết kế công trình, và chưa đề cập chi tiết đến việc đánh giá mức độ an toàn trong quá trình vận hành, khi lưu lượng khai thác và mực nước thượng lưu biến đổi theo thời gian – một đặc trưng phổ biến của các công trình thủy điện hiện nay.

Nghiên cứu này sẽ hệ thống hóa và bổ sung tiêu chí đánh giá xoáy mặt tự do theo bộ tiêu chí kép $\Delta = h/D - (h/D)_{cr}$ và Fr_h . Trên cơ sở đó, bài báo sẽ thiết lập bản đồ vận hành theo các quan hệ về lưu lượng Q và mực nước thượng lưu Z theo hai kịch bản: “Không cuốn khí – Zero air” và “Cuốn khí cho phép – Air allowance ($\beta = 1 \times 10^{-5}$)”. Nghiên cứu áp dụng với hai công trình thực tế là Gibe III (Ethiopia) và Nậm Ma 2 (Lào). Đây sẽ là cơ sở đánh giá lại thiết kế, xác định ngưỡng an toàn, và đề xuất cơ sở dữ liệu tham chiếu cho vận hành của TTĐ.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ DÒNG XOÁY MẶT TỰ DO

2.1. Cơ chế hình thành xoáy

Hiện tượng xoáy mặt tự do tại CLN hình thành do tổng hợp tác động của mô men xoắn, chênh lệch áp suất xuyên tâm và trọng lực. Sự bất đối xứng hình học hoặc vận tốc dòng vào (như cửa lệch tâm, tường

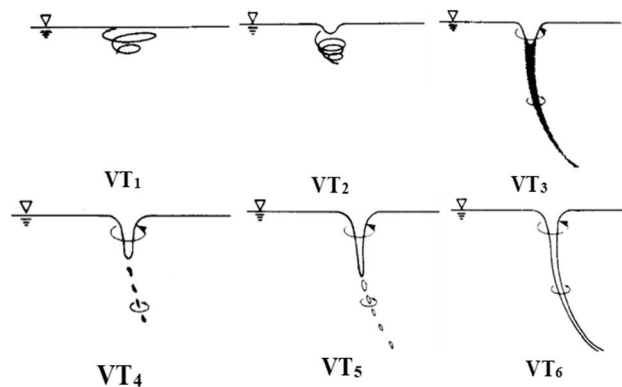
ngiêng, dòng xiên hoặc vật cản như lưới chắn rác) làm phá vỡ cân bằng dòng, khiến một phần động năng chuyển hóa thành mô men quay quanh trục thẳng đứng. Theo Ettema et al. (2015), khi tiết diện dòng bị thu hẹp, nguyên lý bảo toàn mô men xoắn khiến vận tốc góc tăng, làm xoáy được khuếch đại và kéo dài trục từ mặt thoáng xuống CLN. Sự gia tăng gradient vận tốc ở vùng biên tiếp tục làm mất ổn định lớp cắt, và khi áp suất tâm xoáy giảm đến áp suất hơi bão hòa, lõi khí hình thành – đánh dấu giai đoạn chuyển từ xoáy hình học sang xoáy lõi khí.

Các mức độ xoáy được Ettema (2015) và Möller (2013) hệ thống hóa thành “thang Hecker” gồm sáu cấp (VT₁–VT₆) như Hình 2.

- VT₁–VT₂ -**Không cuộn khí:** Dòng chảy ổn định, đối xứng; mặt thoáng phẳng hoặc lõm nhẹ; không có cuộn khí.

- VT₃–VT₄ – **Giai đoạn khởi phát cuộn khí:** Áp suất trung tâm giảm, xuất hiện các bọt khí cục bộ nhưng chưa hình thành lõi khí liên tục.

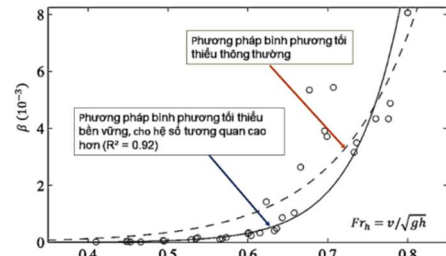
VT₅ – **Xoáy lõi khí ngắt quãng:** Lõi khí hình thành ngắt quãng, có chu kỳ cuộn khí ngắn, gây tổn thất năng lượng và dao động áp suất rõ rệt.



Hình 2. Phân loại các loại xoáy Möller (2013)

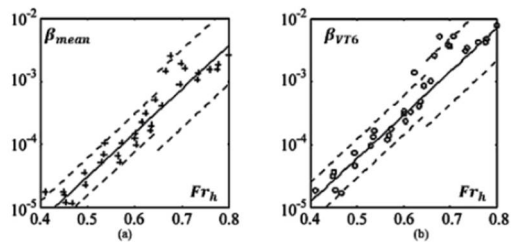
- VT₆ – **Xoáy lõi khí phát triển hoàn toàn:** Lõi khí hình thành liên tục từ mặt thoáng đến miệng hút. Các cấp xoáy (VT) được đặc trưng không chỉ bởi hình ảnh mà còn được định lượng bằng ba đại lượng thủy động học cơ bản: tỷ lệ cuộn khí β , số Froude ngập Fr_h và tỷ lệ độ ngập h/D .

Phân tích Hình 3 của Möller (2013) về mối quan hệ β – Fr_h cho thấy khi $Fr_h < 0.35$, giá trị $\beta \approx 0$, phản ánh trạng thái không cuộn khí, tương ứng với cấp VT₁–VT₂. Khi Fr_h tăng đến 0.40–0.45, β tăng nhẹ trong khoảng 10^{-5} – 10^{-4} , biểu hiện giai đoạn khởi phát cuộn khí (VT₃–VT₄). Khi Fr_h vượt 0.6 trở lên, β đạt đến 10^{-3} – 10^{-2} , cho thấy hiện tượng cuộn khí mạnh và liên tục, đặc trưng cho xoáy lõi khí hoàn chỉnh (VT₆).



Hình 3. Tương quan $\beta(Fr_h)$ Möller (2013)

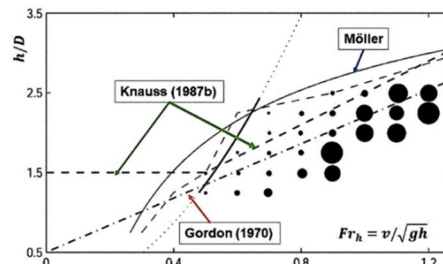
Kết quả Hình 4 tiếp tục làm rõ xu hướng này khi xem xét giá trị trung bình β_{mean} và β_{VT6} . Khi $Fr_h < 0.45$, β_{mean} tăng chậm, nhưng gia tăng nhanh theo hàm mũ khi $Fr_h > 0.5$. Trong các pha có lõi khí ổn định (VT₆), giá trị β_{VT6} đạt 10^{-3} – 10^{-2} và được xác nhận trong dải tin cậy 95%. Dựa trên các dữ liệu này, Möller (2013) và Ettema (2015) đề xuất ranh giới định lượng giữa các cấp xoáy: $Fr_h \approx 0.39$ – 0.43 là ngưỡng bắt đầu xuất hiện cuộn khí đo được (VT₄), $Fr_h \approx 0.45$ – 0.6 tương ứng với cuộn khí gián đoạn (VT₅), và $Fr_h > 0.6$ là vùng cuộn khí liên tục (VT₆).



Hình 4. Quan hệ $\beta(Fr_h)$ kèm dải dự báo 95% (Ettema, et al., 2015)

(a) Tốc độ cuộn khí trung bình β_{mean}
(b) Tốc độ cuộn khí trung bình trong pha VT₆

Hình 5 cho thấy mối quan hệ giữa độ ngập tới hạn tương đối $(h/D)_{cr}$ và số Fr_h tại ngưỡng $\beta = 1 \times 10^{-5}$. Kết quả chỉ ra rằng $Fr_h \approx 0.43$ (giá trị trung bình toàn thời gian) và $Fr_h \approx 0.39$ (trong các pha VT₆) chính là hai ngưỡng khởi phát cuộn khí. Những ngưỡng này được Ettema (2015) công nhận là chuẩn phân loại quốc tế cho quá trình chuyển tiếp từ xoáy không khí sang xoáy lõi khí, đồng thời là cơ sở định lượng xác định độ ngập tới hạn.



Hình 5. Quan hệ độ $(h/D)_{cr}$ và số Fr_h tại ngưỡng $\beta = 1 \times 10^{-5}$ (Möller, 2013)

Từ các kết quả trên, bài báo đã tổng hợp bộ tiêu chí định lượng phân cấp xoáy (VT₁–VT₆) như trong Bảng 1.

Bảng 1. Các tiêu chí đánh giá mức độ xoáy

Mức xoáy	Thông số định lượng
VT ₁ –VT ₂	$Fr_h \leq 0.35 - 0.36$ $\beta \leq 10^{-5}$ (hoặc 0)
VT ₃ – VT ₄	$Fr_h \approx 0.36 - 0.43$ $\beta \approx 0 - 10^{-5}$ (VT₃) và $\beta \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ (VT₄)
VT ₅	$Fr_h \approx 0.45 - 0.6$ $\beta \approx 10^{-4} - 10^{-3}$
VT ₆	$Fr_h \geq 0.6$ $\beta \approx 1.1 \times 10^{-3} - 1.6 \times 10^{-2}$

2.2. Lựa chọn tiêu chí đánh giá mức độ xoáy trong nghiên cứu

Việc lựa chọn tiêu chí đánh giá mức độ xoáy tại CLN cần đáp ứng hai yêu cầu:

(i) Phản ánh chính xác đặc trưng thủy động học của dòng xoáy, và

(ii) Thuận tiện cho công tác thiết kế, tính toán và vận hành thực tế.

Tỷ lệ cuốn khí β được xem là chỉ tiêu có ý nghĩa vật lý rõ ràng để định lượng các cấp độ xoáy (VT₁–VT₆). Chỉ số này biểu diễn trực tiếp tỷ lệ lưu lượng khí so với nước cuốn vào cửa hút ($\beta = Q_a/Q_w$), phản ánh cường độ tương tác khí và nước trong vùng lõi xoáy. Tuy nhiên, việc xác định β đòi hỏi dữ liệu thực nghiệm hoặc mô phỏng với mô hình khử khí chính xác, trong khi các công thức lý thuyết lại phụ thuộc nhiều vào giả thiết hình học và điều kiện biên. Ngoài ra, do β thường có giá trị rất nhỏ (10^{-5} – 10^{-3}), sự khác biệt giữa các cấp độ xoáy khó biểu hiện rõ trên đồ thị hay bản đồ vận hành, làm giảm tính trực quan và khó ứng dụng trong vận hành thực tế của các nhà máy thủy điện.

Trong khi đó, các chỉ tiêu độ ngập tới hạn $(h/D)_{cr}$ và số Froude ngập (Fr_h) có thể xác định nhanh từ thông số hình học và gắn trực tiếp với hai thông số

điều khiển chính của vận hành là lưu lượng Q và mực nước $Z(h)$, cho phép xây dựng bản đồ vận hành hai chiều (Q – Z) phản ánh trực quan các vùng ổn định – cảnh báo – nguy hiểm. Cách tiếp cận này giúp đơn giản hóa việc dự báo xoáy, giảm phụ thuộc vào mô phỏng mà vẫn đảm bảo độ tin cậy khi kết hợp với tiêu chí β đối chứng. Do vậy, nghiên cứu này lựa chọn bộ tiêu chí kép (Δ, Fr_h) cho phép phản ánh đồng thời hình thái và động lực của xoáy, gồm:

Tiêu chí không cuốn khí – Zero air: được biểu diễn qua chỉ số Δ , so sánh giữa mực ngập vận hành và ngưỡng tới hạn theo phương trình (8).

Tiêu chí cuốn khí cho phép – Air allowance: theo chỉ số Fr_h khi ($\beta = 1 \times 10^{-5}$), theo khuyến nghị Bảng 1.

$$\Delta = \left(\frac{h}{D}\right) - \left(\frac{h}{D}\right)_{cr} \quad (8)$$

Theo định nghĩa, ranh giới $\Delta = 0$ tương ứng với trạng thái mà lõi khí vừa chớm tiếp xúc miệng cửa lấy nước, phân chia giữa vận hành an toàn và khởi phát xoáy. Theo Knauss (2007) và cập nhật của Ettema (2015), các mức độ xoáy (VT₁–VT₆) được gán nhãn tương ứng với các khoảng giá trị Δ như sau:

- Giá trị $\Delta > 0$: Dòng chảy dư ngập, ổn định, không xuất hiện lõi khí; tương đương mức VT₁–VT₂ (vận hành an toàn).

- Khi $\Delta \approx 0$: Mặt thoáng bắt đầu lồi, xuất hiện bọt khí cục bộ, tương đương mức VT₃ (giai đoạn cảnh báo).

- Khi $-0.25 \leq \Delta < 0$: Dòng chảy thiếu ngập, lõi khí gián đoạn hoặc không ổn định, tương đương mức VT₄–VT₅ (cần theo dõi / giảm tải).

- Khi $\Delta < -0.25$: Lõi khí hình thành liên tục và ổn định, tương đương VT₆.

Các ngưỡng này được thể hiện trên bản đồ nhiệt Δ và Fr_h như trong Bảng 2:

Bảng 2. Bản đồ nhiệt xác định các mức độ xoáy VT theo các tiêu chí Δ và Fr_h

Tiêu chí không cuốn khí	Tiêu chí cho phép cuốn khí nhẹ ($\beta=10^{-5}$)	Bảng màu	Mức VT	Đặc điểm vận hành
$\Delta \geq +0.10$	$Fr_h \leq 0.35$	Xanh	VT ₁ – VT ₂	Vận hành an toàn
$-0.1 \leq \Delta \leq +0.10$	$0.36 \leq Fr_h < 0.43$	Vàng	VT ₃	Giai đoạn cảnh báo
$-0.25 \leq \Delta < -0.1$	$0.43 \leq Fr_h < 0.6$	Hồng	VT ₄ – VT ₅	Cần theo dõi/giảm tải
$\Delta < -0.25$	$Fr_h \geq 0.60$	Đỏ	VT ₆	Không cho phép vận hành

3. ÁP DỤNG

3.1. Các thông số đầu vào

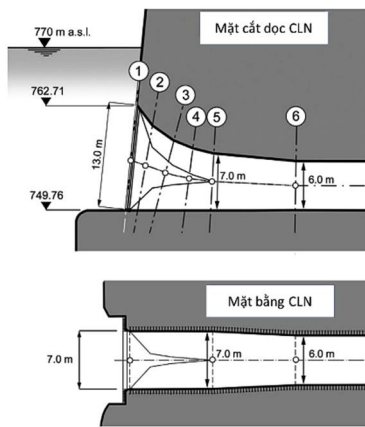
Để kiểm chứng và minh họa tính ứng dụng của các tiêu chí đánh giá xoáy mặt tự do, nghiên cứu áp dụng cho hai TTĐ có đặc trưng hình học và điều

kiện thủy lực khác nhau. Các thông số hình học và vận hành của hai công trình được tổng hợp trong Hình 6 và Hình 7.

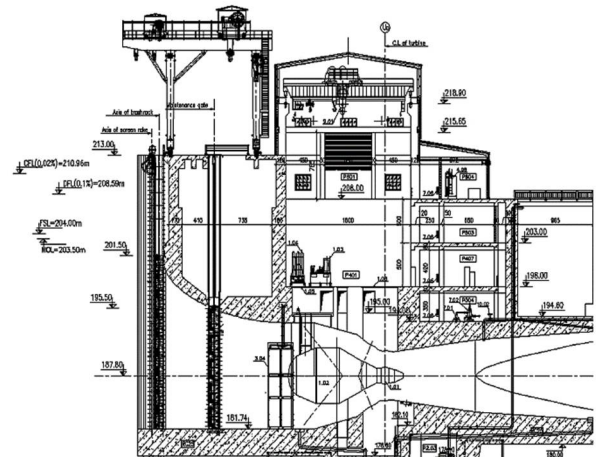
- TTĐ Gibe III (Ethiopia) là công trình bậc thang quy mô lớn trên sông Omo, vận hành trong điều kiện

dao động mực nước thượng lưu lớn ($\Delta Z > 10$ m).
TTĐ Nậm Ma 2 (Lào) là nhà máy kiểu lòng sông

có quy mô trung bình, với dao động mực nước thượng lưu rất nhỏ ($\Delta Z = 0.5$ m).



Hình 6. Mô hình cửa lấy nước của Gibe III Da (Ethiopia) (Möller, 2013)



Hình 7. Mô hình cửa lấy nước của Nậm Ma 2 (Lào), (Viện Kỹ thuật công trình, 2025)

3.2. Kết quả và thảo luận

Kết quả theo tiêu chí Δ (Bảng 3) và tiêu chí Fr_h (Bảng 4) cho trạm Gibe III cho thấy:

- Trong dải vận hành thông thường của Gibe III ($Z = 773-770$) m; $Q = 300-260$ m³/s, hai chỉ số đều nằm trong miền an toàn, với $Fr_h = 0.2-0.27$

và $\Delta = 0.22-0.66$, tương ứng trạng thái VT₁-VT₂ (không cuốn khí).

- Tại điểm thiết kế ($Z = 770$ m; $Q = 283$ m³/s), $Fr_h = 0.28$ và $\Delta = +0.22$, khẳng định cửa hút ngập sâu hơn ngưỡng tới hạn và vận hành an toàn.

Bảng 3. Bảng tính vận hành cho TTĐ Gibe III
Dam theo tiêu chí Δ (h/D)

Z (m) /Q(m ³ /s)	400	380	350	320	300	283	260	230	200
775	-0.03	0.05	0.20	0.37	0.49	0.61	0.78	1.05	1.36
774.5	-0.07	0.02	0.16	0.33	0.46	0.57	0.74	1.01	1.33
774	-0.11	-0.02	0.13	0.29	0.42	0.53	0.71	0.97	1.29
773.5	-0.15	-0.06	0.09	0.25	0.38	0.49	0.67	0.93	1.25
773	-0.19	-0.10	0.05	0.22	0.34	0.46	0.63	0.89	1.21
772.5	-0.23	-0.14	0.01	0.18	0.30	0.42	0.59	0.85	1.17
772	-0.27	-0.18	-0.03	0.14	0.26	0.38	0.55	0.82	1.13
771.5	-0.30	-0.21	-0.07	0.10	0.22	0.34	0.51	0.78	1.10
771	-0.34	-0.25	-0.11	0.06	0.19	0.30	0.48	0.74	1.06
770.5	-0.38	-0.29	-0.14	0.02	0.15	0.26	0.44	0.70	1.02
770	-0.42	-0.33	-0.18	-0.02	0.11	0.22	0.40	0.66	0.98
769.5	-0.46	-0.37	-0.22	-0.05	0.07	0.19	0.36	0.62	0.94
769	-0.50	-0.41	-0.26	-0.09	0.03	0.15	0.32	0.58	0.90
768.5	-0.53	-0.45	-0.30	-0.13	-0.01	0.11	0.28	0.55	0.86
768	-0.57	-0.48	-0.34	-0.17	-0.04	0.07	0.24	0.51	0.83
767.5	-0.61	-0.52	-0.37	-0.21	-0.08	0.03	0.21	0.47	0.79
767	-0.65	-0.56	-0.41	-0.25	-0.12	-0.01	0.17	0.43	0.75
766.5	-0.69	-0.60	-0.45	-0.28	-0.16	-0.04	0.13	0.39	0.71
766	-0.73	-0.64	-0.49	-0.32	-0.20	-0.08	0.09	0.35	0.67
765.5	-0.77	-0.68	-0.53	-0.36	-0.24	-0.12	0.05	0.32	0.63
765	-0.80	-0.71	-0.57	-0.40	-0.28	-0.16	0.01	0.28	0.60
764.5	-0.84	-0.75	-0.61	-0.44	-0.31	-0.20	-0.02	0.24	0.56
764	-0.88	-0.79	-0.64	-0.48	-0.35	-0.24	-0.06	0.20	0.52
763.5	-0.92	-0.83	-0.68	-0.52	-0.39	-0.28	-0.10	0.16	0.48
763	-0.96	-0.87	-0.72	-0.55	-0.43	-0.31	-0.14	0.12	0.44

Bảng 4. Bảng tính vận hành cho TTĐ Gibe III
Dam theo số Froude theo độ ngập (Fr_h)

Z (m) /Q(m ³ /s)	400	380	350	320	300	283	260	230	200
775	0.32	0.31	0.28	0.26	0.24	0.23	0.21	0.19	0.16
774.5	0.33	0.31	0.29	0.26	0.25	0.23	0.21	0.19	0.16
774	0.33	0.32	0.29	0.27	0.25	0.24	0.22	0.19	0.17
773.5	0.34	0.32	0.30	0.27	0.25	0.24	0.22	0.19	0.17
773	0.34	0.33	0.30	0.27	0.26	0.24	0.22	0.20	0.17
772.5	0.35	0.33	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.20	0.17
772	0.35	0.34	0.31	0.28	0.27	0.25	0.23	0.20	0.18
771.5	0.36	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.18
771	0.37	0.35	0.32	0.29	0.27	0.26	0.24	0.21	0.18
770.5	0.37	0.35	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	0.21	0.19
770	0.38	0.36	0.33	0.30	0.28	0.27	0.25	0.22	0.19
769.5	0.39	0.37	0.34	0.31	0.29	0.27	0.25	0.22	0.19
769	0.39	0.37	0.34	0.31	0.29	0.28	0.26	0.23	0.20
768.5	0.40	0.38	0.35	0.32	0.30	0.28	0.26	0.23	0.20
768	0.41	0.39	0.36	0.33	0.31	0.29	0.27	0.24	0.20
767.5	0.42	0.40	0.37	0.33	0.31	0.30	0.27	0.24	0.21
767	0.43	0.41	0.37	0.34	0.32	0.30	0.28	0.25	0.21
766.5	0.44	0.42	0.38	0.35	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22
766	0.45	0.43	0.39	0.36	0.34	0.32	0.29	0.26	0.22
765.5	0.46	0.44	0.40	0.37	0.35	0.33	0.30	0.27	0.23
765	0.47	0.45	0.41	0.38	0.36	0.34	0.31	0.27	0.24
764.5	0.49	0.46	0.43	0.39	0.37	0.35	0.32	0.28	0.24
764	0.50	0.48	0.44	0.40	0.38	0.36	0.33	0.29	0.25
763.5	0.52	0.49	0.46	0.42	0.39	0.37	0.34	0.30	0.26
763	0.54	0.51	0.47	0.43	0.40	0.38	0.35	0.31	0.27

Khi Z tiếp tục giảm, sự khác biệt về độ nhạy và tính ứng dụng giữa hai tiêu chí (Δ , Fr_h) được thấy rõ. Ngưỡng tới hạn theo tiêu chí Δ được xác định quanh $Z \approx 767.0 \pm 0.5$ m; $Q = 283$ m³/s ($\Delta \approx 0$), thấp hơn mực nước thiết kế khoảng 3 m (770m). Trong

khi đó, theo tiêu chí “cho phép mực xoáy nhẹ ($\beta = 10^{-5}$)”, chỉ khi mực nước tiếp tục giảm xuống $Z \approx 764-763$ m, Fr_h mới tăng đến 0.35-0.36, tương ứng vùng vàng (khởi phát cuốn khí).

Nếu mực nước giảm xuống ngưỡng 765.5m

($\Delta = -0.12$), bắt đầu chuyển sang vùng màu vàng (VT4), và tiếp tục nếu giảm xuống 763.5m, Δ đạt ngưỡng cảnh báo (-0.28), chuyển sang trạng thái màu đỏ, báo hiệu sự hình thành lõi khí liên tục (VT6) và không được phép vận hành.

Như vậy, cùng một điều kiện vận hành, Fr_h cho tín hiệu cảnh báo muộn hơn Δ khoảng 2–3 m. Điều này là vì Δ nhạy với sự thay đổi của tỉ số ngập (h/D), nên phát hiện sớm hiện tượng mất ngập tới hạn; trong khi Fr_h được xây dựng trên cơ sở “cuốn khí cho phép ($\beta \approx 10^{-5}$)” nên đánh giá “mềm” hơn và thực dụng hơn cho vận hành thực tế. Điều này mang ý nghĩa thực tiễn rõ ràng: nếu công trình được trang bị hệ thống khử khí hoặc thiết bị chống xoáy, có thể duy trì phát điện an toàn ở mực nước thấp hơn, gia tăng dung tích hữu ích của hồ chứa mà vẫn đảm bảo an toàn thủy lực cho tổ máy.

So sánh với kết quả thực nghiệm của Möller (2013) tại $Z = 770$ m và $Q = 283$ m³/s cho thấy tại mặt cắt cửa vào (1-1), vận tốc trung bình của dòng chảy đạt 3.1 m/s, mức độ cuốn khí trung bình $\beta_{mean} = 0.07 \times 10^{-5}$ và $\beta_{VT6} = 0,14 \times 10^{-5}$.

Bảng 5. Bảng tính vận hành cho TTĐ Nậm Ma 2
theo tiêu chí $\Delta(h/D)$

Z (m) /Q(m ³ /s)	320	300	280	250	230	200	180	160	140
210	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.31	0.33	0.34
209.7	0.21	0.22	0.23	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.32
209.4	0.19	0.20	0.22	0.24	0.25	0.27	0.28	0.30	0.31
209.1	0.18	0.19	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28	0.29
208.8	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.24	0.25	0.27	0.28
208.5	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.22	0.24	0.25	0.26
208.2	0.13	0.14	0.16	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.25
207.9	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.21	0.22	0.23
207.6	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.18	0.19	0.21	0.22
207.3	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18	0.19	0.20
207	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.16	0.17	0.19
206.7	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17
206.4	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.16
206.1	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14
205.8	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13
205.5	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10	0.11
205.2	-0.02	-0.01	0.00	0.02	0.04	0.06	0.07	0.08	0.10
204.9	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.08
204.6	-0.05	-0.04	-0.03	-0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07
204.3	-0.07	-0.05	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.05
204	-0.08	-0.07	-0.06	-0.04	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.04
203.7	-0.10	-0.08	-0.07	-0.05	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	0.00
203.5	-0.11	-0.09	-0.08	-0.06	-0.05	-0.03	-0.02	0.00	0.00

Với TTĐ Nậm Ma 2, Bảng 5 và Bảng 6 cho nhiều ý nghĩa khi sử dụng kịch bản “cuốn khí cho phép ($\beta \approx 10^{-5}$)” trong các trạm mà dao động mực nước hồ rất nhỏ. Khi $Z > 206$ m, ngay cả khi lưu lượng lớn nhất, các giá trị Δ và Fr_h đều nằm trong vùng xanh an toàn (VT₁–VT₂).

Tuy nhiên và rất đáng lưu ý, trong dải vận hành bình thường của TTĐ Nậm Ma 2 ($Z = 204$ –203.5 m; $Q = 140$ –230 m³/s), Δ dao động trong khoảng -0.05 đến +0.04, tương ứng vùng xanh–vàng, tức là

Khi đối chiếu với bản đồ nhiệt ($Fr_h - \Delta$) tương ứng $Fr_h = 0.27$ và $\Delta = +0.22$, hoàn toàn phù hợp với vùng vận hành an toàn.

Ngoài ra, phân tích ảnh hưởng của vận tốc V cho thấy tại mặt cắt cửa vào 24.2m, khi chiều cao cửa chỉ còn 7 m, vận tốc đạt 7.3 m/s với $Fr_h \approx 0.57 > 0.45$, tức đã vượt ngưỡng tới hạn của cuộn khí mạnh (VT5). Cũng theo Möller, tại vị trí này, giá trị $\beta \approx 1.9 \times 10^{-4}$ (tương đương $Q_a \approx 0.054$ m³/s) cho thấy lượng khí xâm nhập đáng kể; trong khi tại mặt cuối cách cửa vào 45m, vận tốc đạt 10 m/s, β tăng vọt lên 4.4×10^{-3} hoàn toàn không chấp nhận được đối với CLN. Sự gia tăng vận tốc từ 3.1 → 7.3 → 10.0 m/s làm Fr_h tăng nhanh, lượng khí cuốn tăng theo hàm mũ, minh chứng rằng chỉ cần tăng nhẹ vận tốc hoặc giảm độ ngập đã làm cuộn khí tăng bậc độ lớn. Do đó, từ mặt cắt 5 trở đi, dòng chảy đã vượt khỏi vùng an toàn. Điều này cũng gợi ý rằng, việc đánh giá các mức độ xoáy cần tiến hành cho nhiều mặt cắt thủy lực khác nhau của CLN.

Bảng 6. Bảng tính vận hành cho TTĐ Nậm Ma 2
theo số Froude theo độ ngập (Fr_h)

Z (m) /Q(m ³ /s)	320	300	280	250	230	200	180	160	140
210	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04
209.7	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04
209.4	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
209.1	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
208.8	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
208.5	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
208.2	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
207.9	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
207.6	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
207.3	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05
207	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
206.7	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
206.4	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
206.1	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
205.8	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
205.5	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05
205.2	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05
204.9	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05
204.6	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05
204.3	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05
204	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05
203.7	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05
203.5	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05

giai đoạn cảnh báo (VT₃). Trong khi đó, $Fr_h \approx 0.05$ –0.09, vẫn nằm hoàn toàn trong vùng xanh (VT₁–VT₂), cho thấy dòng chảy không xuất hiện lõi khí.

Tại MNDBT (204 m), giá trị $\Delta \approx -0.02$ phản ánh trạng thái cận tới hạn (VT₃), khi mặt thoáng bắt đầu xuất hiện xoáy nhẹ. Tại điểm thiết kế, $Z = \text{MNC} = 203.5$ m và $Q = 230$ m³/s, giá trị Δ giảm còn -0.05, tương ứng xoáy yếu (VT₃). Mặc dù hiện tượng này chưa hình thành lõi khí, song việc đặt

ngưỡng thiết kế tại ranh giới VT₃ tiềm ẩn rủi ro vận hành khi các yếu tố thực tế (dao động mực nước, lệch dòng, tổn thất cục bộ, hoặc sai số thi công) làm điều kiện thủy lực xấu đi. Khi đó, CLN có thể vượt sang trạng thái VT₄–VT₅, nơi xoáy ổn định và cuộn khí xuất hiện rõ rệt.

Từ góc nhìn thiết kế và vận hành thực tế, nếu CLN được thiết kế tại ngưỡng VT₃ (tức $\Delta \approx -0.05$), thì về bản chất công trình đã tiệm cận giới hạn ổn định thủy lực, dễ phát sinh xoáy yếu. Mức này có thể tạm chấp nhận về mặt tính toán, nhưng không an toàn trong vận hành dài hạn. Để khắc phục điều này, nghiên cứu này đưa ra các giải pháp sau:

- Giảm D để nâng tỷ số ngập hiệu dụng (h/D), dịch vùng làm việc lên VT₂ ($\Delta \geq 0$): CLN Nậm Ma 2 được thiết kế với kích thước khá lớn ($H \approx 20$ m; $B = 12.5$ m), giúp giảm vận tốc ($v_{max} = 1.4$ m/s) và Fr_h duy trì ở mức rất thấp ($Fr_h \ll 0.3$) (Bảng 6) nên ngay cả khi D giảm, các giá trị V và Fr_h vẫn còn ở ngưỡng rất an toàn.

- Bố trí tường hướng dòng hoặc cánh chia dòng ở vùng cửa vào để làm thẳng trường vận tốc.

- Khi mực nước hạ xuống gần MNC, cần theo dõi chặt chẽ lưu lượng Q và điều chỉnh tải tổ máy theo đường đặc tính Δ – Fr_h .

Như vậy, việc kết hợp tối ưu thiết kế với việc chấp nhận mức xoáy nhẹ nhất định đã cho phép TTĐ có biên độ dao động mực nước thượng lưu cực nhỏ có thể mở rộng phạm vi làm việc, tăng dung tích hồ chứa. Ngược lại, nếu áp dụng tiêu chí nghiêm ngặt “zero-air”, thì mực nước an toàn thấp nhất trùng với MNDBT, làm công trình mất hoàn toàn khả năng điều tiết và hoạt động như một trạm không điều tiết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- TCVN 9151:2012. (2012). *Công trình thủy lợi - Quy trình tính toán thủy lực công dưới sâu*. Hà Nội: Bộ Khoa học và Công nghệ.
- Viện kỹ thuật công trình. (2025). *Thuyết minh báo cáo dự án thủy điện Nậm Ma 2*. Hà Nội: Đại học Thủy lợi.
- Ettema, R., Zhu, D. Z., Gaskin, S. J., Mulligan, S., Lyons, T. C., Boes, R. M., Lee, J. H. (2015). *Vortex-Flow intakes*. Madrid, SPAIN: IAHR - International Association for Hydro-Environment Engineering and Research.
- Gordon, L. (1970). *Vortices at intakes*. Water Powe, 22(4).
- Kent Walker. (2016). *Intake Vortex Formation and Suppression at Hydropower Facilities*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Science and Technology Program.
- Knauss, J. (2007). *Swirling flow problems at intakes*. Munich, Germany: Hydraulic Design Considerations.
- M. Padmanabhan. (1984). *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(12).
- Möller, G. (2013). *Vortex-Induced Air Entrainment Rate at Intakes*. Technischen Hochschule Zürich: Zürich.
- Suerich, G. F., Gaskin, S., & Villeneuve, M. (2014). *Free surface intake vortices: theoretical model and measurements*. 52.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và kiểm chứng được bộ tiêu chí kép (Δ, Fr_h) theo (Q, Z), không chỉ hỗ trợ đánh giá ngưỡng hình thành và các mức độ xoáy mặt tự do trước CLN của các trạm thủy điện, mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc điều chỉnh thiết kế, vận hành và mô phỏng CFD sau này. Kết quả cho thấy cần phân biệt định hướng thiết kế và vận hành tùy theo đặc trưng dao động mực nước thượng lưu.

Với các công trình có biên độ dao động mực nước lớn, tiêu chuẩn “không cuộn khí” là phù hợp để đảm bảo an toàn thủy lực tuyệt đối trong toàn dải vận hành. Ngược lại, với các công trình có dao động mực nước nhỏ hoặc ổn định, khuyến nghị sử dụng tiêu chí Fr_h với điều kiện “cuốn khí cho phép” ($\beta = 1 \times 10^{-5}$), đồng thời thiết kế CLN với vận tốc vào nhỏ và duy trì Fr_h thấp, nhằm hạn chế hoặc gần như triệt tiêu xoáy trong toàn vùng vận hành.

Nghiên cứu đã đề xuất một số giải pháp có thể áp dụng trực tiếp cho TTĐ Nậm Ma 2 trong giai đoạn hoàn thiện thiết kế, nhằm nâng cao an toàn thủy lực và kiểm soát xoáy tại CLN. Các hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tiếp tục kiểm chứng và mở rộng các kết quả lý thuyết, tập trung vào phân bố áp suất, trường vận tốc và phân bố khí trong giai đoạn xoáy mạnh (VT₅–VT₆) thông qua mô phỏng CFD ba chiều kết hợp đo đạc thực nghiệm, hướng tới định lượng lưu lượng khí cuốn và hoàn thiện mô hình dự báo vận hành cho các trạm thủy điện.

Lời cảm ơn: Tác giả xin chân thành cảm ơn các kỹ sư và cán bộ của Viện Kỹ thuật công trình – Trường Đại học Thủy lợi đã tận tình hỗ trợ trong quá trình thu thập số liệu, phân tích thủy lực và cung cấp thông tin thiết kế cho các trạm thủy điện nghiên cứu.

Walke, K. (2016). *Intake Vortex Formation and Suppression at Hydropower Facilities*. U.S. Department of the Interior: U.S. Department of the Interior.

Abstract:

**ASSESSMENT OF FREE-SURFACE VORTEX FORMATION
AND AIR ENTRAINMENT AT HYDROPOWER INTAKES USING
THE (Δ , Fr_h) CRITERIA: THE CASES OF GIBE III AND NẬM MA 2**

This study develops two-dimensional operational maps, $\Delta(Q-Z)$ and $Fr_h(Q-Z)$, to characterize the initiation and evolution of free-surface vortices (VT_1-VT_6) at hydropower intakes under two evaluation criteria: zero air entrainment and allowable air entrainment ($\beta = 10^{-5}$). By integrating quantitative analysis with field data from the Gibe III (Ethiopia) and Nậm Ma 2 (Laos) hydropower plants, the study establishes safe operational boundaries corresponding to different vortex levels. For Gibe III, the safety threshold ($\Delta \approx 0$) occurs approximately 3 m below the design water level, providing an earlier warning than the Fr_h indicator. In contrast, for Nậm Ma 2, Fr_h remains low; thus, adopting an “allowable air-entrainment” condition at VT_3 helps extend the operational range. These findings provide a scientific basis for reassessing intake designs, defining hydraulic safety thresholds, and developing a reference database to support efficient and safe hydropower plant operation.

Keywords: Free-surface vortex, hydraulic intake, critical submergence, air entrainment, Gibe III, Nậm Ma 2.

Ngày nhận bài: 03/11/2025

Ngày chấp nhận đăng: 20/12/2025