

## اثر تعداد پله‌ها بر استهلاك انرژی در سرریزهای پله‌ای براساس روش جدید طراحی

فرزین سلماسی\*

تاریخ پذیرش: 88/2/20

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

[E-mail:Salmasi@tabrizu.ac.ir](mailto:E-mail:Salmasi@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

سرریزهای پله‌ای از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به جهت ظرفیت بالای آنها در استهلاك انرژی جریان، مورد توجه طراحان می‌باشند. مکانیسم جریان از روی چنین سازه‌هایی پیچیده بوده و تحقیقات زیادی در خصوص شناخت آن در سطح دنیا در حال انجام است. در این تحقیق ابتدا روش جدید طراحی سرریزهای پله‌ای مورد بررسی قرار گرفته و سپس بر اساس آن، تجزیه و تحلیل‌هایی در مورد اثر تعداد پله‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که اثر تعداد پله بر استهلاك انرژی میرهن است. براساس نتایج این تحقیق برای تعیین تعداد بهینه پله‌ها نمودارهایی ارائه گردید. تاثیر افزایش تعداد پله در افزایش استهلاك انرژی تا یک حدی مثبت است و سپس روند کاهشی را نشان می‌دهد. به طوری که به ازای هر دبی و شیب مشخص، می‌توان یک تعداد پله تعیین کرد که میزان استهلاك انرژی جریان در حداکثر مقدار خود باشد (تعداد بهینه پله). همچنین با کاهش دبی طرح، تعداد پله‌های بهینه نیز افزایش نشان می‌دهد. در هر حال کار در این زمینه پویا بوده و می‌توان در انتظار تغییرات در معیارهای طراحی آینده بود و انتظار می‌رود طراحان سرریزهای پله‌ای از نتایج تحقیقات در تعیین عوامل طراحی استفاده نمایند.

واژه های کلیدی: استهلاك انرژی، الگوریتم، تعداد پله‌ها، دبی طرح، شیب سرریز، طراحی سرریز پله‌ای

## Effect of Number of Steps on Energy Dissipation of Stepped Spillways Based on the New Design Approach

F Salmasi

<sup>1</sup>Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
E-mail: [Salmasi@tabrizu.ac.ir](mailto:Salmasi@tabrizu.ac.ir)

### Abstract

Stepped spillways are hydraulic structures that, because of their significant capacity in energy dissipation, have been widely used by designers. Flow mechanism over them is complex and many investigations have been performed to study that mechanism. The effect of some parameters such as the number of steps in energy dissipation has not been fully investigated. In this study the latest design criteria have been reviewed and then an algorithm has been developed to design the stepped spillways which is based on the effect of number of steps. Results show that the number of steps affect the energy dissipation. With increasing the number of steps energy dissipation increases and then decreases. Thus for specific discharge and spillway slope, the number of steps can be optimized for maximum energy dissipation. By reducing design discharge the optimum number of steps increases. Research work on this subject can be continued in the future and various aspects of the design parameters may be investigated.

**Keywords:** Algorithm, Design of stepped spillway, Design discharge, Energy dissipation, Number of steps, Spillway slope

### مقدمه

آبی یا سرریز اوجی (استاندارد) به دلیل حجم گود برداری زیاد در محل استقرار حوضچه های آرامش در پایاب و تشکیل پرش هیدرولیکی مناسب داخل حوضچه آرامش، زیاد بودن عمق بعد از پرش و نیاز به دیواره های مقاوم با ارتفاع زیاد از جمله دلایل فنی انتخاب گزینه استفاده از سرریز پله ای به جای سرریز صاف می باشند. در این گزینه، بخش صاف سرریز با پله هایی جایگزین می شود. پله ها همانند زبری های بزرگ و مقاوم در برابر جریان عمل نموده و لذا استهلاک انرژی جریان را افزایش چشم گیری می دهند. همچنین یکی از دلایل مهم استفاده از سرریز های پله ای کاربرد

هدف اصلی کاربرد سرریز پله ای در ساختمان یک سد مخزنی به جهت تاثیر زیاد آن در میزان استهلاک انرژی جریان است. ارتفاع زیاد سد مخزنی و به تبع آن سرریز آن، باعث می شود تا در موقع وقوع سیل، جریان آب عبوری از روی سرریز با سرعت زیادی به پایین دست سد برسد. در این موقع انرژی جنبشی زیاد آب می تواند موجب فرسایش شدید کف رودخانه، آبشستگی زیر پی و یا خوردگی کف دال بتنی سرریز صاف یا حوضچه آرامش آن و ایجاد پدیده کاویتاسیون گردد. هزینه های زیاد ساخت سرریز های صاف (سرسره

در این نوع رژیم یک بستر کاذب<sup>4</sup> که آستانه انتهایی پله های متوالی را به یکدیگر متصل می سازد، تشکیل می‌گردد. در زیر این بستر کاذب جریان‌های گردابی تشکیل می‌گردد. قسمت اعظم استهلاک انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیربستر کاذب ایجاد می‌گردد. در این نوع رژیم، سه منطقه قابل تمایز وجود دارد:

ناحیه با جریان صاف<sup>5</sup> و بدون هوا، ناحیه در حال گسترش<sup>6</sup> یا جریان شبه یکنواخت<sup>7</sup> و ناحیه کاملاً گسترش یافته<sup>8</sup> یا جریان یکنواخت.

جریان در ابتدا و بالای سرریز صاف و بدون هوا است. با رشد لایه مرزی متلاطم و رسیدن به سطح آب، ورود هوا در پله‌های پایین دست صورت گرفته و میزان تلاطم به حداکثر می رسد. در صورت زیاد بودن طول سرریز، جریان در پنجه سرریز به صورت کف آلود درآمده و سیال به صورت آب سفید<sup>9</sup> ظاهر می‌گردد. توجه شود که جریان یکنواخت به معنای واقعی روی سرریز پله ای تشکیل نمی شود. زیرا که گرداب های چرخنده سه بعدی بوجود آمده زیر کف کاذب فضای مثلثی شکل بین پله ها باعث غیر یکنواختی سرعت جریان می گردد. به همین دلیل برخی محققان از عبارت شبه یکنواخت در صورت طولانی بودن طول سرریز استفاده نموده اند (اوهوتسو و همکاران 2004).

چون هدف از احداث سرریز روی سد انتقال دبی سیلاب به صورت ایمن به پایین دست است، لذا معیار طراحی سرریز پله ای با ایجاد دبی حداکثر سیل، رژیم جریان غیر ریزشی است. بدیهی که در صورت وقوع سیل با دبی کمتر از دبی طراحی، امکان ایجاد رژیم ریزشی روی سرریز وجود دارد. رژیم تبدیلی حالت بینابینی داشته و همراه با پراکنش زیاد قطرات آب در

بتن غلطکی یا RCC در سد سازی بوده است. به همین دلیل است که سرریز دارای پله هم اکنون مورد توجه محققین و طراحان زیادی می باشد. مکانیسم جریان از روی چنین سازه هایی پیچیده بوده و تحقیقات زیادی در خصوص شناخت آن در سطح دنیا در حال انجام است. یافته های جدید و تغییرات در معیارهای طراحی قبلی که گاهی با نقض تئوری های قدیمی تر نیز همراه است، باعث شده که کارشناسان دخیل در امر، با مشکل و سردرگمی مواجه شده و روش های متفاوتی را در طراحی بکار بندند. همچنین با مطالعه تحقیقات اخیر، ملاحظه می شود که برخی مشخصات هندسی سرریز همانند تعداد پله ها در گزارش‌های مذکور مسکوت باقی مانده و یا گزارش کاملی در مورد آن ارائه نگردیده است. در این زمینه می‌توان به تحقیقات اوهوتسو و همکاران (2004) و نیز گونزالز و همکاران (2008) اشاره نمود.

هدف از این تحقیق بررسی روش جدید طراحی سرریزهای پله ای و تاثیر تعداد پله ها بر روی استهلاک انرژی بر اساس این روش در طراحی سرریزهای پله‌ای می باشد.

اکثر پژوهشگران به سه رژیم جریان متفاوت از نظر مکانیسم میزان استهلاک انرژی به نام‌های ریزشی<sup>1</sup>، غیر ریزشی<sup>2</sup> و تبدیلی<sup>3</sup> اشاره نموده‌اند (چانسون 1994a، چمنی و راجاراتنام 1999). نوع ریزشی در دبی‌های جریان کم و ارتفاع پله های بزرگ اتفاق می‌افتد. هر پله مانند یک آبشار یا دراپ عمودی مجزا عمل کرده و جریان تا پایین دست سرریز به حالت جت های برخوردی متوالی با کف پله ها ادامه می یابد. نوع غیر ریزشی در سرریزهای با دبی زیاد تر و ارتفاع پله های کم تر رخ می‌دهد. به علت دبی زیاد جریان، پله ها به طور کامل زیر سطح آب و به حالت مستغرق هستند.

<sup>4</sup>Pseudo- Bottom

<sup>5</sup>Clear water region

<sup>6</sup>Developing region

<sup>7</sup>Quasi-uniform

<sup>8</sup>Fully developed region

<sup>9</sup>White Water

<sup>1</sup>Nappe

<sup>2</sup>Skimming

<sup>3</sup>Transition

وقوع رژیم جریان غیرریزشی، می‌بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. این دبی مشخصه برای شروع رژیم غیر ریزشی  $\{(d_c)_{onset}\}$  به صورت رابطه ۱ ارائه گردید:

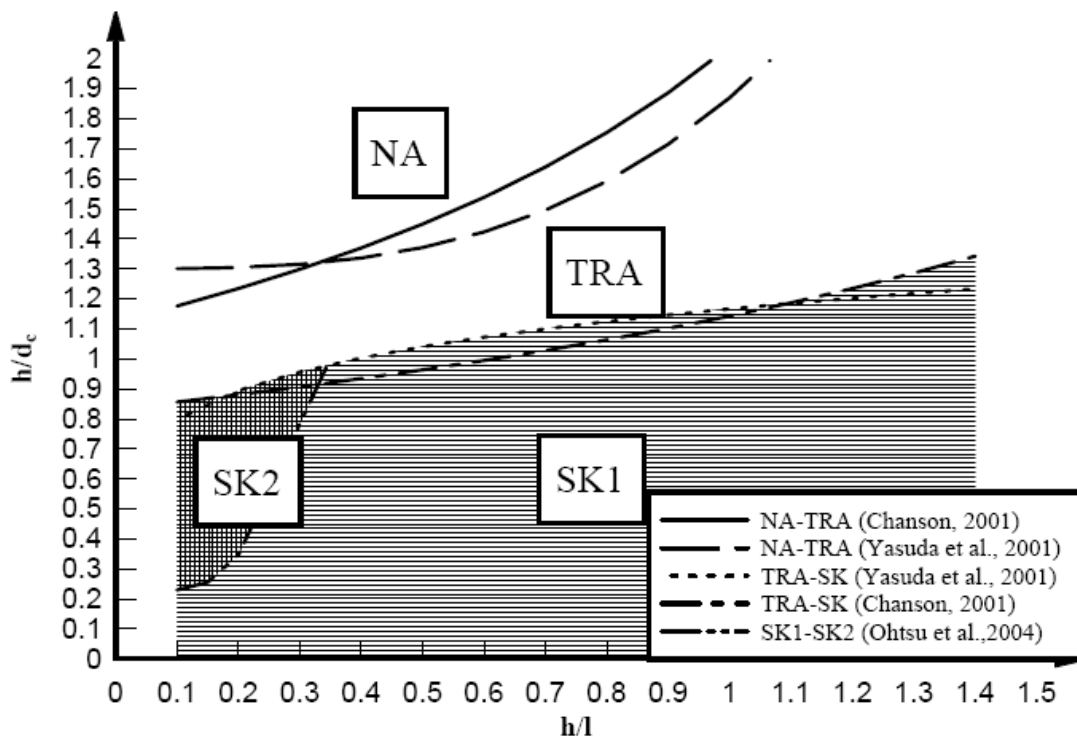
$$\frac{(d_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad [1]$$

در سرریزهای با شیب ملایم تا متوسط گونزالز و چانسون (2006) رژیم غیر ریزشی را به دو زیر قسمت SK1 و SK2 مجزا نمودند. برای شیب های ملایم کمتر از 19 درجه و SK1 برای شیب های متوسط بیشتر از 19 درجه می باشند. در شکل ۱ نحوه تقسیم بندی مذکور ارائه شده است. توضیح اینکه معمولا در سرریزها شیب های بیشتر از 25 درجه به نام شیب تند، شیب 15 تا 25 درجه متوسط و کمتر از 15 درجه ملایم خوانده می شوند.

فضا است. نیروهای دینامیکی زیادی بر سازه سرریز وارد شده و لذا طراحی بر اساس آن توصیه نمی گردد. تحقیقات کمی در مورد این نوع رژیم جریان در دنیا انجام شده است (چانسون و گونزالز 2006).

### مواد و روش ها

اولین معیار برای توصیف شروع رژیم غیرریزشی توسط راجاراتنام (1990) ارائه گردید. وی شروع رژیم جریان غیر ریزشی را به ازای  $d_c/h > 0/8$  ارائه نمود.  $d_c$  عمق بحرانی و  $h$  ارتفاع هر یک از پله ها می باشند. این معیار بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌ها در محدوده شیب‌های 0/9 تا 0/4 ارائه گردید.  $l$  طول افقی هر پله است. رابطه بعدی توسط چانسون (1994b) ارائه شد. این رابطه بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌ها برای شیب‌های  $h/l = 0/2$  تا  $1/25$  (11 تا 51 درجه) بود. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که برای



شکل ۱- تعیین رژیم جریان روی سرریز پله ای. توضیح: NA-TRA مرز رژیم ریزشی به سمت رژیم تبدیلی، TRA-SK تبدیلی به غیر ریزشی (گونزالز و چانسون 2006)

در رابطه مذکور  $S_f$  شیب اصطکاکی است. توجه شود که در روابط بالا منظور از عمق جریان ( $d$ ) همان عمق آب خالص و بدون هوا است. قبلا چانسون (1994a) با آنالیز آزمایشات انجام شده روی سرریزهای پله ای با شیب تند 50 تا 55 درجه نشان داد که ضریب اصطکاک بین 0/17 تا 5 متغیر است و متوسط آن عدد یک اعلام گردید. اخیرا چانسون و گونزالز (2006) نشان دادند که ضریب اصطکاک بین 0/1 تا 0/25 متغیر بوده و متوسط آن 0/2 است. علت این اختلاف طی 12 سال در تعیین ضریب اصطکاک مربوط به تکنیک اندازه گیری غلظت حباب های هوای ورودی به داخل جریان است. زیرا همانطوری که اشاره شد، جریان فوق العاده هوادهی شده روی سرریز برقرار است و استهلاک انرژی غالب بر اثر جریان آب خالص اتفاق می افتد و لذا باید عمق مربوط به بخش هوا را از عمق کل کسر نمود. یادآوری می نماید که چگالی هوا هشت صد بار از چگالی آب کمتر است و تاثیر تنش برشی آن به مراتب کمتر خواهد بود. بنابراین داریم:

$$d = \int_{y=0}^{y_{90}} (1-C) dy = (1-C_{mean}) y_{90} \quad [7]$$

که در آن  $C$  غلظت حباب های هوا و  $y_{90}$  مربوط به عمقی است که 90 درصد آن را هوا تشکیل داده است. ملاحظه می شود که غلظت حباب هوا در یک مقطع مشخص متغیر بوده و در  $dy$  های مختلف مقادیر  $C$  های متفاوتی وجود دارد. نتایج آزمایشات گونزالز و همکاران (2008) نشان می دهند که می توان رابطه با تابع تانژانت هیپربولیک را برای توزیع غلظت حباب هوا به کار برد:

$$C = 1 - \tanh^2 \left( K' - \frac{y/y_{90}}{2D_0} + \frac{(y/y_{90} - 1/3)^3}{3D_0} \right) \quad [8]$$

در رابطه بالا  $K'$  و  $D_0$  از روابط زیر بدست می آیند:

اوهوتسو و همکاران (2004) حد وقوع رژیم غیر ریزشی را با تابع 2 مشخص نمودند:

$$\left( \frac{h}{d_c} \right)_s = \frac{7}{6} (\tan a)^{1/6} \quad \text{for } 5.7^\circ < a \leq 55^\circ \quad [2]$$

برای سرریز پله ای با شیب ثابت برابر  $S_0 = \sin a$ ، دارای تعداد پله های زیاد با ارتفاع ثابت ( $h$ ) و طول افقی پله ها ( $l$ )، می توان فرض کرد که جریان پس از عبور از چند پله اولیه به صورت کاملا گسترش یافته یا یکنواخت خواهد بود. توجه شود که  $\sin a = h / \sqrt{l^2 + h^2}$  در چنین جریانی با سرعت متوسط ثابت ( $V$ ) و عمق نرمال ( $d$ ) و فرض عرض واحد برای سرریز می توان نوشت (راجاراتنام، 1990):

$$t = d \cdot g \cdot \sin a \quad [3]$$

که در آن  $g$  وزن مخصوص آب و  $\tau$  تنش برشی متوسط رینولدز بین جریان غیر ریزشی و جریان چرخشی زیر آن می باشد. اگر داشته باشیم:

$$t = \frac{f}{4} \left( \frac{r \cdot V^2}{2} \right) \quad [4]$$

که در آن  $f$  فاکتور اصطکاک داریسی - ویسباخ و  $\rho$  جرم مخصوص سیال است. با ترکیب معادلات 3 و 4 خواهیم داشت:

$$f = \frac{8 g \cdot d \cdot \sin a}{V^2} = \frac{8 g \cdot d^3 \sin a}{q^2} \quad [5]$$

که در آن  $g$  شتاب ثقل و  $q$  دبی در واحد عرض سرریز است. برای جریان های غیر یکنواخت متغیر تدریجی، فاکتور اصطکاک توسط معادله انرژی به صورت زیر بیان می شود:

$$f = \frac{8g \cdot d^3}{q^2} \cdot S_f \quad [6]$$

$$A = 0.452$$

$$f_{\max} = 2.32 * 10^{-5} a^2 - 2.75 * 10^{-3} a + 2.31 * 10^{-1}$$

$$\text{for } 19^\circ \leq a \leq 55^\circ$$

محل ورود هوا (شروع هوا دهی) از تاج سرریز و عمق آب در آن نقطه توسط روابط زیر بدست می آیند (چانسون 1995):

$$\frac{L_1}{h \cdot \cos a} = 9.719 \sin a^{0.0796} *$$

$$\left( \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin a} (h \cos a)^3} \right)^{0.713} \quad [11]$$

$$\frac{d_1}{h \cdot \cos a} = \frac{0.4034}{(\sin a)^{0.04}} *$$

$$\left( \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin a} (h \cos a)^3} \right)^{0.592}$$

طراح باید کنترل نماید تا این که طول سرریز بزرگتر از  $L_1$  باشد. در این صورت جریان شبه یکنواخت روی سرریز به وقوع خواهد پیوست. اوهوتسو و همکاران (2004) رابطه زیر را برای وقوع جریان شبه یکنواخت پیشنهاد نمودند:

$$\frac{H_e}{d_c} = \left( -1.21 * 10^{-5} a^3 + 1.60 * 10^{-3} a^2 - 7.13 * 10^{-2} a + 1.30 \right)^{-1} *$$

$$\left( 5.7 + 6.7 \exp \left( -6.5 \frac{h}{d_c} \right) \right) \quad [12]$$

$$\text{for } 5.7^\circ \leq a \leq 55^\circ$$

$$\frac{H_{dam}}{d_c} \geq \frac{H_e}{d_c} \text{ یعنی باید داشته باشیم:}$$

انرژی باقیمانده در روی سرریز با جریان شبه یکنواخت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$K' = 0.327 + \frac{1}{2 D_o} - \frac{8}{81 D_o}$$

$$C_{mean} = 0.762 (1.043 - \exp(-3.61 D_o))$$

$$C_{mean} = \frac{1}{y_{90}} \int_{y=0}^{y_{90}} C \cdot dy$$

در ضمن  $D_o$  پارامتری است که به غلظت متوسط حساب هوا ( $C_{mean}$ ) بستگی دارد. البته طراحان سرریز توزیع غلظت حساب هوا را در دست ندارند و لذا محققین سعی نموده اند تا روابط رگرسیونی ساده را برای طراحان ارائه نمایند. از جمله این روابط مربوط به اوهوتسو و همکاران (2004) و به شرح زیر است:

$$C_{mean} = D - 0.3 \exp \left( -5 \left( \frac{h}{d_c} \right)^2 - 4 \left( \frac{h}{d_c} \right) \right) \quad [9]$$

$$D = 0.3 \text{ for } 5.7^\circ < a < 19^\circ$$

$$D = -0.00024 a^2 + 0.0214 a - 0.0357$$

$$\text{for } 19^\circ \leq a \leq 55^\circ$$

فاکتور اصطکاک توسط رابطه زیر توسط اوهوتسو و همکاران (2004) ارائه شده است:

$$f = f_{\max} - A \left( 0.5 - \frac{h}{d_c} \right)^2$$

$$\text{for } 0.1 \leq \frac{h}{d_c} \leq 0.5 \quad [10]$$

$$f = f_{\max} \text{ for } 0.5 \leq \frac{h}{d_c} \leq \left( \frac{h}{d_c} \right)_s$$

$$A = -1.7 * 10^{-3} a^2 + 6.4 * 10^{-2} a - 1.5 * 10^{-1}$$

$$f_{\max} = -4.2 * 10^{-4} a^2 + 1.6 * 10^{-2} a + 3.2 * 10^{-2}$$

$$\text{for } 5.7^\circ \leq a \leq 19^\circ$$

در زیر روش طراحی سرریز پله ای گام به گام توضیح داده می شود:

1- ارتفاع ( $H_{dam}$ ) و شیب سرریز ( $a$ ) از روی نقشه های توپوگرافی و جانمایی بدنه سد و سرریز آن بدست می آیند. دبی طرح ( $Q$ ) بر اساس سیل با دوره برگشت معین تخمین زده می شود. یک عرض فرضی اولیه برای سرریز ( $W$ ) انتخاب می گردد.

2- عمق بحرانی از رابطه  $d_c = \sqrt[3]{q^2/g}$  محاسبه می گردد.

3- پارامتر بی بعد  $H_{dam}/d_c$  تعیین می شود.

4- ارتفاع پله ها برای به وقوع پیوستن رژیم غیر ریزشی انتخاب می گردد به نحوی که  $0.25 \leq h/d_c \leq (h/d_c)_s$  که در آن  $(h/d_c)_s$  از رابطه 2 بدست می آید. در ضمن بنا به نظر چانسون و گونزالز (2006) در اکثر سرریزهای پله ای در ساختمان سد های گابیونی و بتن غلطکی، ارتفاع پله ها در محدوده اجرایی 0/2 تا 0/9 متر قرار داشته اند که می تواند به عنوان معیار دیگری در انتخاب ارتفاع مناسب پله مد نظر طراح قرار گیرد.

5- مقدار  $(h/d_c)$  تعیین می گردد.

6- مقدار  $\frac{H_e}{d_c}$  از رابطه 12 محاسبه می شود. اگر

شرط  $\frac{H_{dam}}{d_c} \geq \frac{H_e}{d_c}$  برقرار بود، جریان شبه یکنواخت ایجاد شده و فاکتور اصطکاک از رابطه 10 محاسبه می شود.

7- عمق جریان از رابطه 5 به صورت  $d = d_c \left( \frac{f}{8 \sin a} \right)^{1/3}$  محاسبه می شود. سرعت

جریان به صورت  $V = \frac{q}{d}$  بدست می آید.

8- از رابطه 9 غلظت متوسط حباب هوا محاسبه شده و  $y_{90}$  از رابطه 7 بدست می آید.

9- ارتفاع دیواره های محافظ کناری سرریز از رابطه  $H_w = 1.4 y_{90}$  بدست می آید.

$$E_{res} = d \cdot \cos a + \frac{V^2}{2g} =$$

$$d \cdot \cos a + \frac{d_c^3}{2d^2} \Rightarrow$$

$$\left( \frac{E_{res}}{d_c} \right)_U = \frac{d}{d_c} \cos a + \frac{1}{2} \left( \frac{d_c}{d} \right)^2 =$$

$$\left( \frac{f}{8 \sin a} \right)^{1/3} \cos a + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8 \sin a} \right)^{-2/3}$$
[13]

انرژی باقیمانده در روی سرریز با جریان غیر یکنواخت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{E_{res}}{d_c} = 1.5 + \left( \left( \frac{E_{res}}{d_c} \right)_U - 1.5 \right)^*$$

$$\left( 1 - \left( 1 - \frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right)$$
[14]

$$m = -\frac{a}{25} + 4$$

استهلاک انرژی نسبی به صورت زیر قابل تعیین است:

$$\frac{\Delta E}{E_{max}} = \frac{E_{max} - E_{res}}{E_{max}} = 1 - \frac{E_{res}}{H_{dam} + 1.5 d_c}$$
[15]

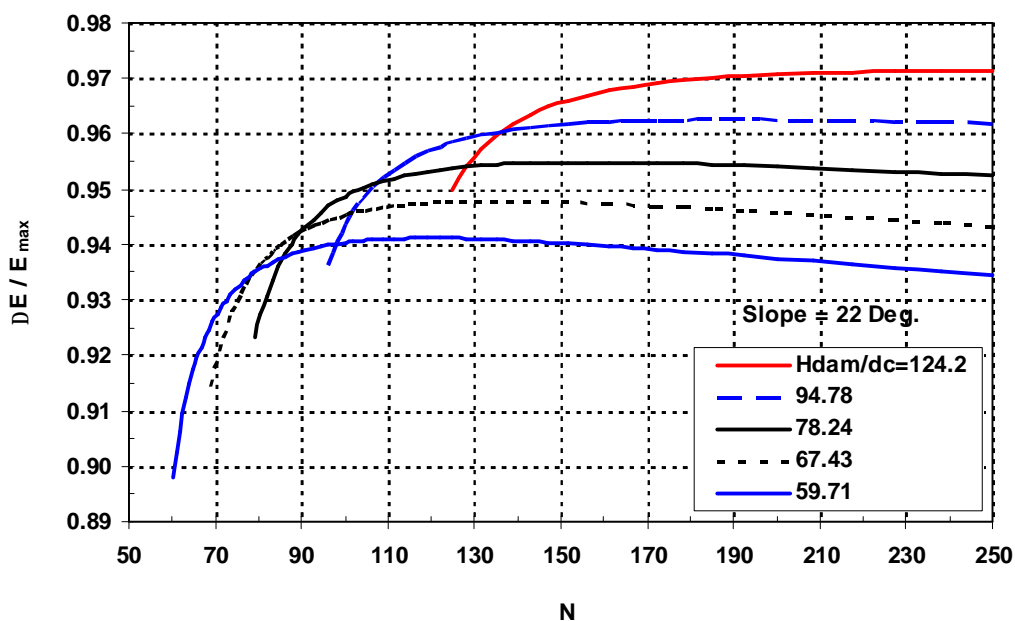
در این پژوهش ابتدا الگوریتمی جهت طراحی هیدرولیکی سرریز پله ای با رژیم شبه یکنواخت و قابل استفاده متصدی یان امر ارائه می گردد. روش ارائه شده بر اساس نتایج آزمایشات انجام یافته در سطح دنیا روی مدل های فیزیکی با مقیاس بزرگ بوده و با اطمینان می توان برای طراحی پروتوتیپ بکار برد (اوهوتسو و همکاران، 2004). سپس بر اساس الگوریتم تهیه شده، بررسی اثر تعداد پله روی استهلاک انرژی انجام خواهد پذیرفت. زیرا همان طوری که قبلا گفته شد، در منابع موجود موضوع انتخاب تعداد پله جهت طراحی مناسب سرریز پله ای مسکوت باقی مانده است.

ایم. سپس بر اساس الگوریتم ارائه شده جهت طراحی سرریز پله ای، شکل ۲ رسم گردیده است. مطابق شکل ۲ به ازای یک نسبت  $H_{dam}/d_c$  ثابت، افزایش تعداد پله موجب افزایش روند استهلاک انرژی نسبی تا یک حدی می شود و سپس موجب کاهش استهلاک انرژی نسبی می گردد. البته شیب قسمت صعودی آن بیشتر از شیب قسمت نزولی آن است. ملاحظه می گردد که می توان به ازای هر نسبت  $H_{dam}/d_c$  مشخص، یک تعداد پله بهینه از لحاظ ایجاد حداکثر استهلاک انرژی را تعیین کرد. همچنین به ازای یک تعداد پله ثابت، با افزایش  $H_{dam}/d_c$  از 59/71 تا 124/2، بر استهلاک انرژی نسبی افزوده می شود. مطابق شکل ۲ با کاهش دبی طرح یا افزایش ارتفاع سرریز، تعداد پله های بهینه نیز افزایش نشان می دهد. این موضوع نشان می دهد که گرچه رژیم جریان غیر ریزشی فرض شده، ولی با کاهش دبی و تمایل جریان به سمت رژیم ریزشی، تعداد پله های بهینه افزایش می یابد. بر عکس در دبی های بالا که رژیم جریان کاملاً غیر ریزشی است و کلیه پله ها زیر سطح آب مستغرق هستند، تعداد پله های بهینه کاهش نشان می دهند.

10- انرژی باقیمانده با رژیم جریان شبه یکنواخت یا غیر یکنواخت با رابطه 13 یا 14 تعیین می شود.  
 11- استهلاک انرژی نسبی با رابطه 15 تعیین می شود.  
 با توجه به الگوریتم ارائه شده جهت طراحی گام به گام سرریز پله ای، در صفحه گسترده اکسل مراحل فوق الذکر فرمول بندی گردید. هدف بررسی تاثیر تعداد پله بر استهلاک انرژی است. هر چه استهلاک انرژی بیشتر گردد، به همان میزان هزینه اجرایی تاسیسات مستهلک کننده انرژی در پایاب سرریز مانند حوضچه آرامش کاهش خواهد یافت.

### نتایج و بحث

در شکل ۲ منحنی تغییرات استهلاک نسبی انرژی جریان در محور عمودی نسبت به تعداد پله سرریز در محور افقی ارائه شده است. از پارامترهای موثر دیگر می توان به ارتفاع کل سرریز، شیب و دبی طرح اشاره نمود. در شکل مورد بحث، شیب سرریز را مقدار ثابت 22 درجه گرفته و دبی در واحد عرض و ارتفاع کل سرریز را متغیر فرض کرده ایم. یعنی نسبت بی بعد  $H_{dam}/d_c$  را از 59/71 تا 124/2 متغیر انتخاب نموده



شکل ۲ - تاثیر تعداد پله بر افزایش استهلاک انرژی



افزایش داد و متناظر با آن، میزان استهلاک انرژی نسبی و سایر پارامترها را محاسبه نمود. ضمناً شیب سرریز 22 درجه فرض شده است که می‌توان هر گونه تغییرات مورد نظر را به توجه به شرایط و داده‌های پروژه در آن داد.

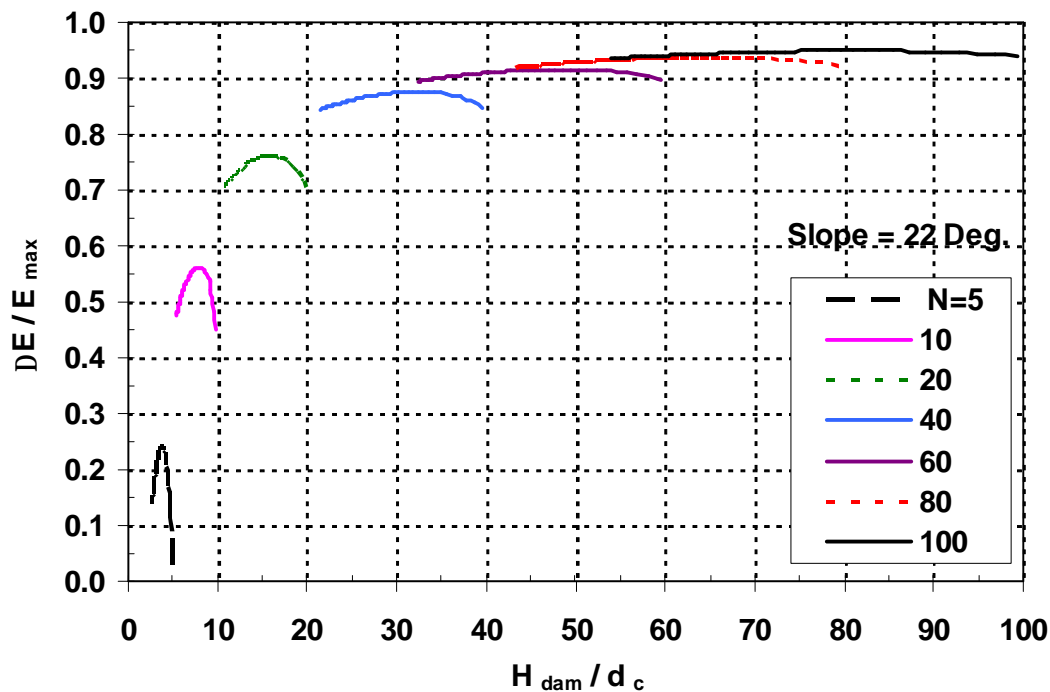
بر اساس شکل 2، تعداد دقیق پله‌های بهینه به ازای دبی‌های متفاوت در جدول 1 ارائه شده است. در جدول مذکور دبی در واحد عرض از 0/8 تا 3/2 متر مربع بر ثانیه متغیر در نظر گرفته شده است و می‌توان آن را به راحتی در صفحه گسترده اکسل تا مقادیر بیشتر دبی

جدول 1- تعداد پله‌های بهینه به ازای دبی‌های متفاوت از روی سرریز و استهلاک انرژی آن

دبی در واحد عرض بر حسب متر مربع بر ثانیه (q)	نسبت ارتفاع سرریز به عمق بحرانی ( $H_{dam} / d_c$ )	تعداد پله‌های بهینه (N)	استهلاک انرژی نسبی ( $\Delta E / E_{max}$ )
0/8	124/2	200	0/971
1/2	94/78	179	0/963
1/6	78/24	139	0/955
2	67/43	122	0/948
2/4	59/71	102	0/941
2/8	53/88	96	0/935
3/2	49/29	86	0/929

منحنی‌ها این روابط برعکس می‌شوند. همچنین وجود نقطه حداکثر استهلاک انرژی بیشتر در تعداد پله‌های کمتر از 40 مشاهده می‌شود و در تعداد پله‌های بیشتر از آن، نقطه حداکثر روی منحنی‌ها کم‌رنگ‌تر می‌گردد. این چنین نمودارها می‌توانند در درک بهتر روابط پیچیده و نیز کمک به طراحان چنین سازه‌هایی، سهم به‌سزایی ایفا نمایند. بدون رسم این نمودارها نمی‌توان چنین استنباط‌هایی را در مورد اثر تعداد پله داشت.

در شکل 3 نمایش دیگری از تاثیر تعداد پله در میزان استهلاک انرژی نسبی ارائه شده است. در محور افقی از پارامتر بی بعد نسبت ارتفاع سرریز به عمق بحرانی استفاده گردیده است. هر منحنی در شکل 3 مربوط به یک تعداد پله است. ملاحظه می‌شود که استهلاک انرژی نسبی در یک مقدار مشخصی از  $H_{dam} / d_c$  به حداکثر مقدار خود می‌رسد. یعنی در بخش صعودی منحنی‌ها استهلاک انرژی رابطه مستقیم با ارتفاع سرریز و رابطه معکوس با دبی جریان دارد و در در بخش نزولی



شکل 3 - اثر پارامتر بی بعد  $H_{dam}/d_c$  بر استهلاك انرژی به ازای تعداد پله های مختلف

هندسی متفاوت در طراحی سرریز پله ای، به یک تعداد پله بهینه از نظر استهلاك انرژی حداکثر دست یافت که در مطالعات گذشته به چنین موضوعی اشاره نگردیده است.

در جدول 2 به عنوان نمونه 10 سرریز پله ای با شرایط هیدرولیکی متفاوت طراحی شده است. پارامتر های دخیل در طراحی و سایر پارامتر های بی بعد مورد نیاز جمعاً در 21 ستون تدارک دیده شده اند. همچنین مطابق شکل های 2 و 3 می توان به ازای شرایط هیدرولیکی و

جدول 2- محاسبات در صفحه گسترده اکسل برای طراحی سرریز پله ای و تعیین استهلاك انرژی آن

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Q (CMS)	$H_{dam}$ (m)	a	W (m)	q (m <sup>2</sup> /s)	$d_c$ (m)	h (m)	$h/d_c$	$(h/d_c)_s$	$H_e/d_c$	$H_{dam}/d_c$
800	50	25	250	3/20	1/01	0/20	0/20	1/03	23/02	49/29
800	45	25	200	4/00	1/18	0/50	0/42	1/03	18/64	38/23
500	40	23	150	3/33	1/04	0/40	0/38	1/01	17/40	38/37
500	35	23	100	5/00	1/37	0/60	0/44	1/01	16/94	25/62
400	40	21	200	2/00	0/74	0/50	0/67	0/99	14/60	53/94
400	30	21	150	2/67	0/90	0/60	0/67	0/99	14/61	33/40
300	35	20	150	2/00	0/74	0/30	0/40	0/99	14/82	47/20
300	30	20	100	3/00	0/97	0/50	0/51	0/99	14/23	30/87
200	15	19	150	1/33	0/57	0/40	0/71	0/98	13/11	26/51
200	10	19	70	2/86	0/94	0/60	0/64	0/98	13/20	10/63

ادامه جدول 2

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$f_{max}$	F	d (m)	V (m/s)	$C_{mean}$	$Y_{90}$ (m)	$H_w$ (m)	N	$E_{res} / d_c$	$\Delta E / E_{max}$
0/177	0/135	0/35	9/22	0/26	0/47	0/66	250/0	4/584	0/910
0/177	0/174	0/44	9/13	0/35	0/68	0/95	90/0	3/948	0/901
0/180	0/174	0/40	8/38	0/32	0/58	0/82	100/0	3/782	0/905
0/180	0/178	0/53	9/51	0/33	0/79	1/10	58/3	3/728	0/863
0/183	0/170	0/29	6/92	0/32	0/43	0/60	80/0	3/655	0/934
0/183	0/171	0/35	7/60	0/32	0/52	0/73	50/0	3/643	0/896
0/185	0/181	0/30	6/67	0/29	0/42	0/59	116/7	3/435	0/929
0/185	0/185	0/40	7/58	0/30	0/57	0/79	60/0	3/394	0/895
0/187	0/168	0/23	5/88	0/30	0/32	0/45	37/5	3/490	0/875
0/187	0/179	0/38	7/42	0/30	0/55	0/77	16/7	3/372	0/722

## نتیجه گیری

شود که نشان دهنده تاثیر مفید افزایش ارتفاع سد و کاهش دبی بر استهلاك انرژی است. با کاهش دبی طرح یا افزایش ارتفاع سرریز، تعداد پله های بهینه نیز افزایش نشان می دهد. این موضوع نشان می دهد که گرچه رژیم جریان غیر ریزشی فرض شده، ولی با کاهش دبی و تمایل جریان به سمت رژیم ریزشی، تعداد پله های بهینه افزایش می یابد. بر عکس در دبی های بالا که رژیم جریان کاملاً غیر ریزشی است و کلیه پله ها زیر سطح آب مستغرق هستند، تعداد پله های بهینه کاهش نشان می دهند.

به ازای یک نسبت ثابت از  $H_{dam} / d_c$ ، افزایش تعداد پله در سرریز پله ای موجب افزایش استهلاك انرژی نسبی تا حد مشخصی می شود و سپس موجب کاهش استهلاك انرژی نسبی می گردد که شیب قسمت صعودی آن بیشتر از شیب قسمت نزولی آن است. لذا می توان گفت که به ازای هر نسبت مشخص  $H_{dam} / d_c$ ، یک تعداد پله بهینه به لحاظ ایجاد حداکثر استهلاك انرژی وجود دارد. همچنین به ازای یک تعداد پله ثابت، با افزایش  $H_{dam} / d_c$ ، بر استهلاك انرژی نسبی افزوده می

## منابع مورد استفاده

- Chamani MR and Rajaratnam N, 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 125 (4): 361-368.
- Chanson H, 1994a. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research IAHR 32(2): 213-218.
- Chanson H, 1994b. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. Journal of Hydraulic Research IAHR 32(3): 445-460.
- Chanson H, 1995. Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon, Oxford, UK, pp: 292

- Chanson H and Gonzalez Carlos A, 2006. Physical modeling and scale effects of air-water flows on stepped spillways. *Journal of Zhejiang University Science* 6A (3):243-250.
- Gonzalez Carlos A and Chanson H, 2006. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators for embankment dams. *Dam Engineering* XVVII (4): 223-244.
- Gonzalez Carlos A, Takahashi M and Chanson H, 2008. An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 46(2): 24-35.
- Ohtsu I, Yasuda Y and Takahashi M, 2004. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130(9): 860-869.
- Rajaratnam N, 1990. Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 116(5): 587-591.