علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۱، شماره‌ی۳، پاییز ۹۷، ص. ۱۹۹-۱۸۵

بررسی استهلاک انرژی و خصوصیات هیدرولیکی جریان بر روی سرریزهای پلکانی ساده و شیبدار با استفاده از مدل فلوئنت

الهام فاضلی[۱] و محمد مهدی حیدری[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه رازی.
۲*- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه رازی. mm.heidari@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۱۳

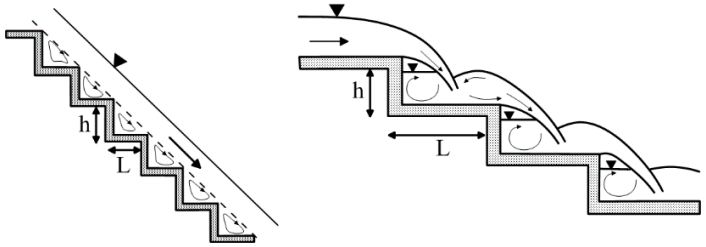
چکیده

سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به دلیل اتلاف زیاد انرژی جریان، نقش مهمی در کاهش ابعاد حوضچه آرامش پایین‌دست سدها و در نتیجه طراحی اقتصادی آن‌ها دارند. مطالعه و بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی این سرریزها مورد توجه طراحان سد در دهه‌های اخیر بوده است. استفاده از مدل‌های فیزیکی و بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان بر روی سرریزهای پلکانی مستلزم صرف زمان و هزینه زیاد می‌باشد و مدل‌های ریاضی می‌توانند کمک شایانی به شناخت الگوی جریان بر روی این سازه‌ها کنند. در این پژوهش ابتدا نتایج خروجی مدل فلوئنت برای شبیه‌سازی تراز سطح آب، پروفیل سرعت و فشار بر روی سرریز پلکانی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. حداکثر خطای مطلق در محاسبه تراز سطح آب سه میلی‌متر و ریشه دوم میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی پروفیل سرعت و فشار به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۷۲ می‌باشد. پس از صحت‌سنجی مدل به بررسی تأثیر دبی و شیب پله‌ها بر خصوصیات هیدرولیکی جریان پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهند، حداکثر فشار که بر روی قسمت افقی پله‌ها اتفاق می‌افتد با افزایش دبی عبوری از سرریز پلکانی افزایش، اما حداقل فشار که در بخش عمودی پله‌ها رخ می‌دهد مقداری کاهش می‌یابد. بنابراین احتمال کاویتاسیون در دبی‌های زیاد و در قسمت عمودی پله‌ها بیشتر است. براساس نتایج این پژوهش، میزان استهلاک انرژی در جریان غیرریزشی با افزایش شیب کف پله‌ها بدلیل افزایش تلاطم و بزرگ شدن گردابه‌ها افزایش می‌یابد اما ازدیاد شیب پله‌ها تأثیر چندانی بر الگوی توزیع فشار انرژی ندارد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی از مدل فلوئنت برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار رابطه‌ای ارائه شد که متوسط خطای آن حدود ۳/۱ درصد می‌باشد.

کلید واژه‌ها: مدل فلوئنت، معادلات ناویر-استوکس، ضریب اصطکاک، جریان دوفاز، کاویتاسیون.

مقدمه

احداث سد در رودخانه باعث افزایش تراز سطح آب و انرژی پتانسیل آب می‌شود و در نتیجه جریان عبوری از روی سرریز سد در موقع سیلاب با سرعت زیادی به پایین‌دست منتقل می‌شود. انرژی جنبشی زیاد آب می‌تواند باعث آبشستگی مصالح کف رودخانه و خوردگی بتن سرریز شود، بنابراین برای مستهلک کردن انرژی جنبشی زیاد در پایاب سدها معمولاً حوضچه آرامش طراحی می‌شود. هرچه انرژی منتقل شده به پایین‌دست بیشتر باشد، حوضچه آرامش ابعاد بزرگتری خواهد داشت و در نتیجه به همان نسبت، هزینه‌های اجرایی و نیز پایداری سد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌هایی هستند که به منظور بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی در سدها به کار گرفته می‌شوند. میزان افت انرژی زیاد سرریزهای پلکانی باعث کاهش عمق حفاری حوضچه آرامش پایین‌دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی شده و هزینه اجرای سد کمتر می‌شود و در بعضی شرایط ممکن است منجر به حذف حوضچه آرامش شود (Chanson, 2001). در سرریز پلکانی بخش صاف سرریزهای اوجی استاندارد با پله‌هایی به ارتفاع و طول معین جایگزین می‌شود. پله‌ها همانند زبری‌های بزرگ و مقاوم در برابر جریان عمل کرده و استهلاک انرژی جریان را افزایش می‌دهد. به طورکلی سه نوع جریان در روی سرریزهای پلکانی مشاهده می‌شود، نوع اول جریان ریزشی است که در آن جریان به‌صورت جت‌های متوالی می‌باشد و هر پله مانند یک آبشار یا دراپ عمودی مجزا عمل می‌کند، این نوع جریان در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ ایجاد می‌شود. نوع دوم جریان غیر ریزشی است که در آن جریان به‌صورت متغیر تدریجی بوده و پله‌ها به طور کامل زیر سطح آب هستند، این نوع جریان در دبی زیاد و ارتفاع پله‌های کم ایجاد می‌شود. نوع سوم جریان انتقالی است که در آن جریان بینابینی و درصد قابل توجهی هوا با آب مخلوط شده و حالت ناپایدار دارد (Chanson, 1994). نمونه‌ای از جریان ریزشی و غیرریزشی مربوط به سرریزهای پلکانی در شکل (۱) آورده شده است.



الف-جریان ریزشی ب-جریان غیرریزشی

شکل ۱- جریان ریزشی و غیرریزشی بر روی سرریزهای پلکانی

سرریزهای پلکانی ممکن است دارای پله‌های افقی، شیبدار و یا لبه‌دار باشند. در حالت شیبدار، پله‌ها با افق زاویه دارند و در سرریزهای لبه‌دار نیز در انتهای قسمت افقی پله یک برآمدگی قرار داده می‌شود (Chinnarasri, and Wongwisess, 2004).

تحقیقات زیادی در خصوص نحوه تعیین نوع رژیم جریان و میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی صورت گرفته است. Sorensen (1985) جزء اولین پژوهشگرانی بود که بر روی سرریز پلکانی تحقیق کرد. ایشان با استفاده از مدل آزمایشگاهی به مقایسه میزان افت انرژی، پروفیل سرعت و عمق آب روی سرریز پلکانی و اوجی پرداخت و به این نتیجه رسید که سرریز پلکانی با ایجاد افت انرژی باعث کوچک شدن سازه مستهلک کننده انرژی در پایین‌دست می‌شود. Rajaratnam (1990) با فرض ایجاد جریان یکنواخت بر روی سرریز پلکانی به صورت تئوری رابطه‌ای برای تخمین افت انرژی ارائه داد و همچنین مرز بین جریان ریزشی و غیر ریزشی را yc/h=0.8 دانست که در آن yc عمق بحرانی جریان و h ارتفاع پله‌ها می‌باشد. Chanson (1994) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای شیب‌های ۱۱ تا ۵۱ درجه وجه پایین‌دست سرریز پلکانی، رابطه‌ای برای تعیین نوع جریان ارائه داد. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که برای وقوع رژیم جریان غیرریزشی، باید دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. Chamani و Rajaratnam (1999) آزمایش‌هایی بر روی سرریز پلکانی با شیب وجه پایین‌دست ۵۹ درجه انجام داد. با اندازه‌گیری غلظت حباب‌های هوای وارد شده به داخل جریان، عمق آب خالص (بدون هوا) محاسبه و سپس با کاربرد آن، مقدار افت انرژی تعیین شد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میزان افت انرژی نسبی در رژیم جریان غیرریزشی بین ۴۸ تا ۶۳ درصد تغییر می‌کند. Chanson (2002) نتایج تحقیقات خود و سایر محققین در زمینه شوت‌ها و سرریزهای پلکانی را گردآوری و در یک کتاب منتشر کرد که به بررسی هیدرولیک رژیم‌های مختلف جریان روی سرریز پلکانی، استهلاک انرژی، امواج ایجاد شده روی شوت‌ها، تهویه و هوادهی سرریزهای پلکانی و مسائل طراحی آن‌ها پرداخته می‌شود. Chen et al. (2002) با استفاده از روش حجم سیال و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ جریان بر روی سرریز پلکانی را شبیه سازی نمودند. در پژوهش آن‌ها فشار و سرعت روی پله‌ها اندازه‌گیری و با مدل عددی مقایسه شد. شیبدار کردن پله‌ها و لبه‌دار کردن پله‌ها باعث افزایش افت انرژی می‌شود که در این زمینه تحقیقات اندکی صورت گرفته است. Chinnarasri و Wongwisess (2004) تأثیر لبه‌دار کردن پله‌ها بر رژیم جریان و مقدار افت انرژی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حدود ۱۰ درصد باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. Chinnarasri و Wongwisess (2006) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به بررسی استهلاک انرژی سرریزهای پلکانی شیبدار و لبه‌دار پرداختند و براساس تعداد و ارتفاع پله، دبی جریان، شیب پله و ارتفاع لبه پله برای محدوده خاصی از متغیرها روابطی برای افت انرژی ارائه دادند. Cheng et al. (2006) با استفاده از روش اختلاطی و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ جریان روی سرریزهای پلکانی را مدل‌سازی نمودند. با توجه به پژوهش آن‌ها، مشخص گردید که روش اختلاطی برتری‌های زیادی در شبیه‌سازی عددی فشار منفی و جریان‌های گردابی بر روی پله‌های سرریزهای پلکانی دارد. Varjavand et al. (2008) با استفاده از مدل فلوئنت و روش حجم سیال و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد جریان روی سرریز پلکانی را شبیه سازی و اثر تعداد پله‌ها را در اتلاف انرژی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش تعداد پله‌ها به میزان قابل توجهی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. Naderi Rad et al. (2009) با استفاده از مدل فلوئنت و روش حجم سیال به بررسی استهلاک انرژی در انواع سرریزهای پلکانی ساده، شیبدار و لبه‌دار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد پله‌ها و ارتفاع آن‌ها و همچنین کاهش شیب وجه پایین‌دست سرریز پلکانی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. افزایش ارتفاع لبه پله‌ها در سرریزهای پلکانی لبه‌دار و افزایش شیب کف پله‌ها در سرریزهای پلکانی شیبدار باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به اختلاط زیاد آب و هوا در سرریز پلکانی، روش اختلاط برای شبیه‌سازی جریان مناسب‌تر است. Salmasi (2009) اثر تعداد پله‌ها بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی را مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد تأثیر افزایش تعداد پله‌ها در افزایش استهلاک انرژی تا یک حدی مثبت است و سپس روند کاهشی دارد، به‌طوری که به ازای هر دبی و شیب مشخص می‌توان تعداد بهینه پله را تعیین کرد. Javan et al. (2013) به منظور مقایسه روش‌های اختلاطی و حجم سیال با استفاده از نرم افزار فلوئنت

جریان روی سرریز پلکانی را شبیه سازی نمودند و نتایج مربوط به تراز سطح آب، مولفه‌های سرعت و غلظت هوای محبوس در آب و چگونگی ورود هوا به داخل آب را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این پژوهش مقدار ضریب حجم سیال (α) برابر ۰/۴ انتخاب و مشخص شد که روش اختلاطی نسبت به روش حجم سیال نتایج را بهتر نشان می‌دهد و زمان همگرایی آن ۴تا ۵ برابر کم‌تر از روش حجم سیال است. Kherbache et al. (2013) نتایج خروجی مدل عددی فلوئنت را با استفاده از پروفیل سطح آب مشاهده‌ای مربوط به داده‌های آزمایشگاهی Chen et al. (2002) ارزیابی کردند و آن را برای شبیه‌سازی جریان روی سرریز پلکانی مناسب دانستند سپس به بررسی تأثیر دبی بر سرعت جریان، میزان آشفتگی و توزیع فشار پرداختند و به این نتیجه رسیدند با افزایش دبی میزان آشفتگی، حداکثر فشار و سرعت روی پله‌ها افزایش می‌یابد.

در صورت افزایش افت انرژی توسط سرریز، هزینه احداث حوضچه آرامش پایین‌دست کاهش می‌یابد. عوامل متعددی بر میزان افت انرژی جریان توسط سرریز تأثیر می‌گذارد، یکی از عواملی که کمتر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته شیب پله‌ها در سرریز پلکانی می‌باشد. تأثیر شیب پله‌ها بر میزان افت انرژی و هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی از اهداف این پژوهش می‌باشد. روابط متعددی برای میزان افت انرژی سرریز پلکانی توسط محققین ارائه شده است، بررسی دقت این روابط و تعیین دامنه کاربرد هر یک ازآن‌ها از اهداف دیگر این تحقیق است. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی Chen et al. (2002) یک سرریز پلکانی توسط مدل فلوئنت شبیه‌سازی و دقت آن در محاسبه پروفیل سرعت و فشار روی پله‌ها بررسی شده است. سپس به بررسی تاثیر شیب کف پله‌ها بر افت انرژی و هیدرولیک جریان پرداخته و روابط ارائه شده برای افت انرژی توسط محققین صحت‌سنجی می‌شود.

مواد و روش‌ها

هیدرولیک سرریزهای پلکانی

نوع رژیم جریان عبوری از سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی موثر است. روابط متعددی برای تعیین نوع جریان توسط محققین ارائه شده است. Chanson (1994) نشان داد که برای وقوع جریان غیرریزشی باید عمق بحرانی (y_c) یا دبی جریان از یک مقدار معین بیشتر باشد. عمق بحرانی لازم برای شروع جریان غیرریزشی ($(y_c)_{onset}$) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\left(y_c\right)_{onset}=1.057h-0.465\frac{h^2}{L} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، h ارتفاع پله و L طول افقی هر پله می‌باشد. Chamani و Rajaratnam (1999) نشان دادند درصورتی که نسبت ارتفاع به طول پله‌ها بیشتر از مقدار بحرانی محاسبه شده از رابطه (۲) باشد، رژیم جریان غیرریزشی می‌باشد:

$$\left(\frac{h}{L}\right)_c=\sqrt{0.89\left[\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-1}-\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.34}+1.5\right]}-1 \qquad (۲)$$

بالا آمدن سطح آب به‌دلیل احداث سد باعث افزایش انرژی جریان می‌شود. مقداری از انرژی به‌دلیل اصطکاک و ایجاد گردابه‌ها در روی سرریز پلکانی از بین می‌رود و مقداری از انرژی نیز به پنجه سرریز منتقل می‌شود. تعیین مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز به‌منظور طراحی سازه مستهلک کننده انرژی مثل حوضچه آرامش ضرروری است. مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز پلکانی (E_2) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Boes and Hager, 2003):

$$E_2=h_w+\alpha\frac{q_w^2}{2gh_w^2} \qquad (۳)$$

که در آن α ضریب تصحیح انرژی جنبشی، q_w دبی جریان در واحد عرض و h_w عمق آب معادل است. آب و هوا بر روی سرریز پلکانی با هم مخلوط می‌شود. با افزایش غلظت هوا عمق جریان (مخلوط آب و هوا) نیز افزایش می‌یابد. برای محاسبه انرژی آب در پایین‌دست سرریز باید از عمق آب معادل مطابق رابطه (۴) استفاده نمود (Boes and Hager, 2003):

$$h_w=\int_0^{h_{90}}\left[1-C(y)\right]dy \qquad (۴)$$

که در آن $C(y)$ غلظت نسبی هوا در فاصله y از کف سازه و h_{90} عمقی از جریان که غلظت نسبی هوا برابر ۰/۹ است. مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز پلکانی را همچنین می‌توان از رابطه (۵) محاسبه کرد:

$$E_2=E_1-E_L \qquad (۵)$$

که در آن E_1 انرژی جریان در بالادست سد و E_L میزان استهلاک انرژی توسط پله‌های سرریز است. میزان استهلاک انرژی به نوع رژیم جریان (ریزشی، غیر ریزشی و انتقالی)، دبی در واحد عرض یا عمق بحرانی جریان، تعداد پله‌ها (N) انرژی جریان در بالادست سرریز (E_1) طول و ارتفاع پله‌ها و شیب کف پله‌ها (θ) بستگی دارد. میزان استهلاک انرژی توسط سرریز پلکانی برای هر نوع رژیم جریان مطابق رابطه (۶) به‌صورت بدون بعد ارائه می‌شود:

$$\frac{E_L}{E_1}=f\left(\frac{y_c}{Nh},\frac{h}{L},\theta\right) \qquad (۶)$$

برای محاسبه میزان استهلاک نسبی انرژی، (E_L/E_1) روابطی براساس داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. Chanson (1994) برای محاسبه افت نسبی انرژی در جریان غیرریزشی رابطه (۷) را ارائه داد:

$$\frac{E_L}{E_1}=1-\frac{\left(\frac{f_b}{8\sin\phi}\right)^{\frac{1}{3}}\cos\phi+0.5\left(\frac{f_b}{8\sin\phi}\right)^{-\frac{2}{3}}}{1.5+\frac{H_{dam}}{y_c}} \qquad (۷)$$

که در آن، H_{dam} ارتفاع سرریز پلکانی، ϕ زاویه شیب پایین‌دست سرریز و f_b ضریب اصطکاک جریان که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{\sqrt{f}}=2.43-0.2676\ln\left(\frac{K}{D}\right) \qquad (۸)$$

در رابطه فوق، K ارتفاع زبری برابر $hcos\phi$ و D عمق هیدرولیکی است. Boes و Hager (2003) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه (۹) را برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی ارائه دادند:

(۹-الف)

$$\frac{E_L}{E_1}=1-\exp\left[\left(-0.0451\left(\frac{K}{D}\right)^{0.1}(\sin\phi)^{-0.8}\right)\frac{H_{dam}}{y_c}\right]$$

$$\text{برای} \quad \frac{H_{dam}}{y_c}<15-20$$

(۹-ب)

$$\frac{E_L}{E_1}=1-\frac{F}{\frac{H_{dam}}{y_c}+F}\ , \quad \text{برای} \quad \frac{H_{dam}}{y_c}\geq 15-20$$

که در آن:

$$F=\left(\frac{f_b}{8\sin\phi}\right)^{\frac{1}{3}}\cos\phi+\frac{\alpha}{2}\left(\frac{f_b}{8\sin\phi}\right)^{-\frac{2}{3}} \qquad (۱۰)$$

Chinnarasri و Wongwisess (2006) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و در نظر گرفتن $H_{dam}=Nh$ برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی در سرریز پلکانی ساده رابطه (۱۱) و برای سرریزهای پلکانی شیبدار رابطه (۱۲) را ارائه دادند:

$$\frac{E_L}{E_1}=1.1\exp\left(-9.98\frac{y_c}{Nh}\right) \qquad (۱۱)$$

$$\frac{E_L}{E_1}=\eta\left(\frac{y_c}{h}\right)^{\zeta} \qquad (۱۲)$$

که در آن متغیرهای η و ζ بستگی به طول پله (L) ارتفاع پله (h) و اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای هر پله (m) دارند و از روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شوند:

$$\eta=-0.034\ln\left(\frac{h^2}{mL}\right)+0.767 \qquad (۱۳)$$

$$\zeta=-0.034\ln\left(\frac{L}{m}\right)-0.216 \qquad (۱۴)$$

معرفی مدل فلوئنت

در این تحقیق برای حل عددی معادله‌ها از نرم افزار Fluent نسخه ۶،۳،۲۶ استفاده شده است. حل معادلات ناویر استوکس در این مدل به‌طور کامل و به روش حجم محدود با شماهای مختلف انجام می‌گیرد. برای تعیین لزجت گردابه‌ای در جریان آشفته از مدل‌های یک معادله‌ای، دو معادله‌ای ($k-\varepsilon$ و $k-\omega$) و پنج معادله‌ای استفاده می‌شود. مدل‌سازی سطح آزاد در فلوئنت با استفاده از روش اختلاطی، جزء حجم سیال و اولری امکان‌پذیر است. فلوئنت قابلیت حل مسائل دو بعدی و سه بعدی را دارد و استفاده از مدل‌های پیشرفته آشفتگی و روش‌های مدل‌سازی متنوع، تقریباً امکان مدل‌سازی هر گونه جریان و پدیده‌ای مانند جریان‌های تحت فشار، جریان‌های با سطح آزاد و لایه لایه، جریان‌های حاوی ذرات رسوبی و حباب و جریان‌های چند فازی را فراهم کرده است. علاوه بر قابلیت‌های پیش فرض ارائه شده، خود کاربر نیز می‌تواند با نوشتن زیر برنامه، انواع ترم‌های چشمه در معادلات حاکم، شرایط مرزی مربوط به مسأله مورد نظر و نیروهای مختلف را وارد مسأله کند.

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای صحت سنجی مدل فلوئنت

برای صحت سنجی مدل عددی از آزمایش‌های انجام شده توسط Chen et al. (2002) استفاده شده است. عرض کانال آزمایشگاهی ۳۰ سانتی‌متر و سرریز پلکانی ازجنس فیبر شیشه فشرده با پروفیل WES برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه طراحی و ساخته شده است. فاصله تاج سرریز از پنجه ۷۸/۹ سانتی‌متر و عمق آب طراحی آن ۹/۷ سانتی‌متر بود. پروفیل استاندارد تاج سرریز با معادله $y=3.632x^{1.85}$ توسط سه منحنی با شعاع‌های متفاوت به بخش

بالادست سرریز متصل شده است. شیب وجه پایین‌دست متصل به سرریز اوجی یک قائم به ۰/۷۵ افقی است که توسط یک قوس به شعاع ۲۸ سانتی‌متر به پنجه متصل شده است. سرریز دارای ۱۳ پله بوده که ارتفاع ۵ پله اول متغیر و به ترتیب ۲، ۲/۴، ۳، ۴ و ۵ سانتی متر و از پله شش ابعاد پله‌ها یکنواخت و دارای طول ۴/۵ و ارتفاع ۶ سانتی‌متر می‌باشد.

شبکه‌بندی، شرایط مرزی و انفصال معادلات

محدوده شبیه‌سازی جریان و هندسه سرریز پلکانی براساس ابعاد مدل فیزیکی با نرم افزار AutoCad2007 ترسیم و برای شبکه‌بندی به نرم افزار پیش‌پردازنده گمبیت نسخه ۲,۴,۶ منتقل شد. بعد از اجرای اولیه مدل، تعداد مش بر روی تاج سرریز و پله‌ها تا رسیدن به مش بهینه افزایش داده شد. شرایط مرزی و اولیه برای اجرای جریان غیرماندگار توسط فلوئنت از اساسی‌ترین مراحل شبیه‌سازی است. در این تحقیق مطابق شکل (۲)؛ برای کف فلوم، سرریز و پله‌ها شرط مرزی دیواره، در قسمت خروجی شرط مرزی فشار نسبی صفر، در بخش فوقانی شرط مرزی هوای ورودی که به‌صورت فشار نسبی صفر و در قسمت ورودی شرط مرزی سرعت آب انتخاب شد. برای شرط مرزی سرعت ورودی لازم است یک عمق تقریبی در مدل عددی وارد نمود. بدین منظور از رابطه عمق بحرانی براساس دبی عبوری از سرریز، حداقل انرژی مخصوص محاسبه و ارتفاع آب بالادست با اضافه کردن ارتفاع سرریز به انرژی مخصوص تعیین شد. هم‌چنین محدوده شرط مرزی هوای ورودی، نصف ارتفاع آب بالادست در نظر گرفته شد که بدین ترتیب یک-سوم محدوده را هوا و دو-سوم آن را آب در بر می‌گیرد. لازم به ذکر است با توجه به آنکه جنس سرریز از فیبر شیشه می‌باشد، برای مرز دیواره زبری ۰/۰۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

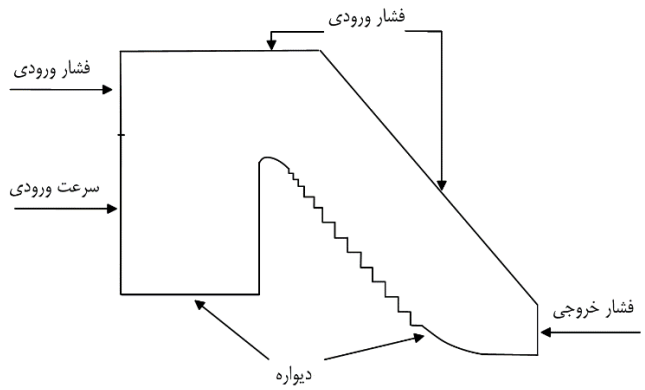
به منظور تعیین روش و شمای عددی مناسب برای جداسازی معادلات حاکم، از مدل آشفتگی k-ε Standard، k-ε RNG و k-ε Realizable، برای الگوریتم حل میدان سرعت و فشار از روش PISO، SIMPLE و SIMPLEC و هم‌چنین برای جداسازی معادله فشار از شماهای Body Force Weighted و PRSTO استفاده گردید و نتایج پروفیل سرعت و فشار با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. مشخصات مدل‌های مختلف و ریشه دوم میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی برای پروفیل سرعت و فشار هر مدل در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مدل B2 کمترین مقدار خطا را دارد و بعنوان مدل مناسب برای پژوهش حاضر انتخاب شد. در این مدل، از شمای (B.F.W) Body Force Weighted برای جداسازی معادله فشار و از روش SIMPLE برای حل میدان سرعت و فشار و از روش k-ε RNG برای حل معادلات آشفتگی استفاده شده است.

لازم به ذکر است در تمام مدل‌ها انفصال جملات جابه‌جایی معادله‌های اندازه حرکت و معادله آشفتگی از شمای Second Order Upwind، مدل‌سازی سطح آزاد از روش اختلاط و شمای QUICK بوده است. همچنین گام‌های زمانی برای حل مسأله ۰/۰۰۱ ثانیه و ملاک همگرایی برای هر متغیر براساس مقدار باقی مانده خطای نسبی برابر 10^{-5} انتخاب شد.

نتایج و بحث

۱-مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی

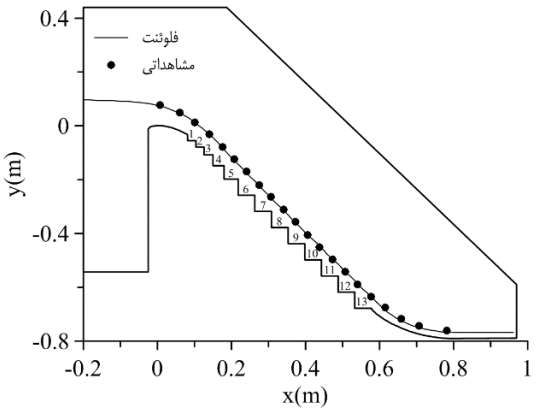
برای تعیین دقت مدل فلوئنت در شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد، پروفیل‌های فشار و سرعت از نتایج آزمایشگاهی Chen et al. (2002) استفاده گردید. پروفیل سطح آزاد محاسباتی و مشاهداتی در شکل (۳) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پروفیل سطح آزاد محاسبه شده با داده‌های آزمایشگاهی تقریباً یکسان است. ماکزیمم خطای مطلق محاسبه عمق آب با داده‌های آزمایشگاهی حدود سه میلی‌متر و در بالادست سرریز می‌باشد.



شکل ۲- شرایط مرزی مورد استفاده برای مدل آزمایشگاهی (Chen et al., 2002)

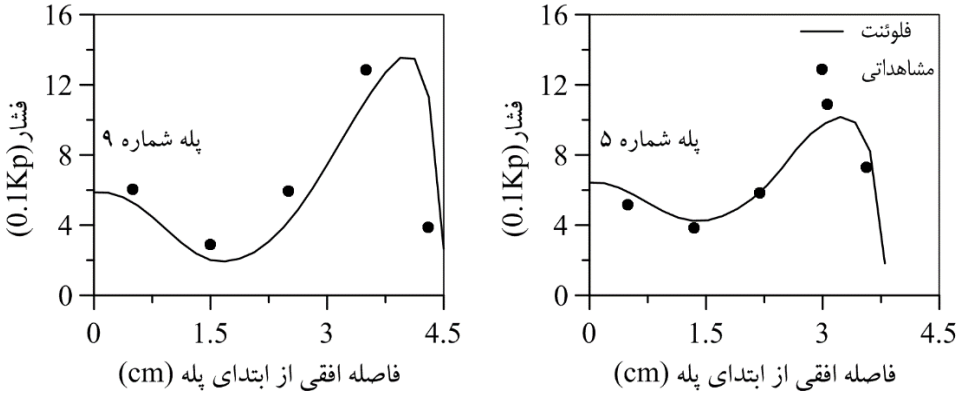
جدول ۱- مشخصات مدل‌های مختلفی نتایج اختلاف حل عددی با مقادیر آزمایشگاهی

ردیف	شماره مدل	مدل آشفتگی	الگوریتم حل سرعت- فشار	جداسازی فشار	RMSE
۱	A1	k-ε Standard	PISO	B.F.W	۰/۳۹۲
۲	A2	k-ε RNG	PISO	B.F.W	۰/۳۹۳
۳	A3	k-ε Realizable	PISO	B.F.W	۰/۳۸۱
۴	B1	k-ε Standard	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۹۲
۵	B2	k-ε RNG	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۷۳
۶	B3	k-ε Realizable	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۸۲
۷	C1	k-ε Standard	SIMPLEC	B.F.W	۰/۴۱۳
۸	C2	k-ε RNG	SIMPLEC	B.F.W	۰/۴۱۵
۹	C3	k-ε Realizable	SIMPLEC	B.F.W	۰/۳۹۵
۱۰	D1	k-ε Standard	PISO	PRSTO	۰/۴
۱۱	D2	k-ε RNG	PISO	PRSTO	۰/۳۹۲
۱۲	D3	k-ε Realizable	PISO	PRSTO	۰/۳۸۵
۱۳	E1	k-ε Standard	SIMPLE	PRSTO	۰/۳۸۱
۱۴	E2	k-ε RNG	SIMPLE	PRSTO	۰/۳۷۵
۱۵	E3	k-ε Realizable	SIMPLE	PRSTO	۰/۳۷۶
۱۶	F1	k-ε Standard	SIMPLEC	PRSTO	۰/۳۷۹
۱۷	F2	k-ε RNG	SIMPLEC	PRSTO	۰/۳۸۱
۱۸	F3	k-ε Realizable	SIMPLEC	PRSTO	۰/۳۸۵

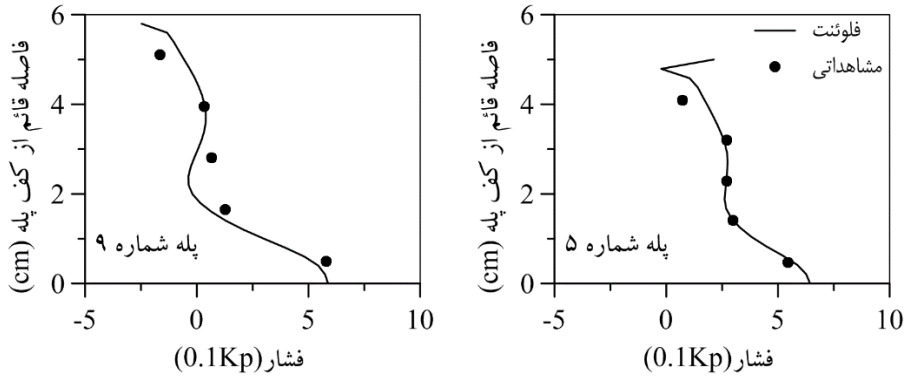


شکل ۳- پروفیل سطح آزاد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل عددی

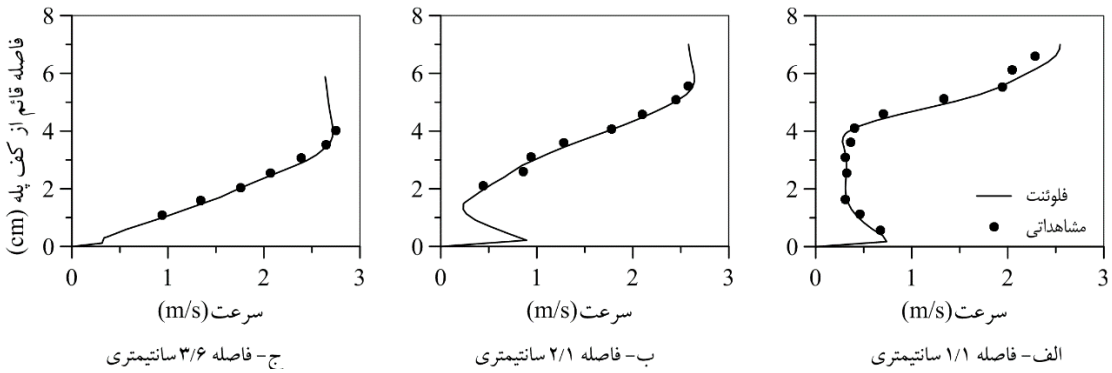
با استفاده از مدل فلوئنت توزیع فشار در جهات افقی و عمودی روی پله‌های ۵ و ۹ محاسبه و با داده‌های مشاهده‌ای در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. ریشه دوم میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی توزیع افقی و عمودی فشار برای هر دو پله به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۷۸ است. همانطور که ملاحظه می‌شود، انطباق پروفیل فشار محاسباتی با مشاهداتی روی پله ۵ بهتر از پله ۹ است. براساس نتایج پژوهش Javan et al. (2013) مکان شروع هوادهی لبه انتهای پله ۵ بوده است. با توجه به اینکه روی پله ۵ هنوز ورود هوا انجام نشده است بنابراین شبیه‌سازی فشار روی پله ۵ توسط مدل فلوئنت بهتر انجام شده است. باتوجه به اینکه طول پله ۵ و ۹ به‌ترتیب ۳/۸ و ۴/۵ سانتی‌متر است، ملاحظه می‌شود ابتدا فشار بر روی سطح افقی پله‌ها کاهش می‌یابد و در حدود ۱/۵ سانتی‌متر از ابتدای پله به حداقل مقدار می‌رسد، بعد از آن فشار روی پله افزایش یافته و در فاصله ۰/۸ سانتی‌متری از لبه پله به مقدار حداکثر می‌رسد. این مقدار حداکثر فشار به‌دلیل برخورد جریان با پله می‌باشد. بعد از آن، مجدداً فشار کاهش می‌یابد. همچنین باتوجه به اینکه ارتفاع پله ۵ و ۹ به ترتیب ۵ و ۶ سانتیمتر است، کمترین فشار در قسمت فوقانی پله‌ها و حداکثر فشار بر روی کف پله‌ها اتفاق می‌افتد. در قسمت‌های فوقانی پله مقدار فشار منفی ۰/۱- تا ۰/۳- کیلوپاسکال است، بنابراین در این قسمت‌ها احتمال وقوع کاویتاسیون و خرابی بتن سرریز وجود دارد. لازم به ذکر است حداقل شاخص کاویتاسیون در این حالت ۴/۲ می‌باشد.



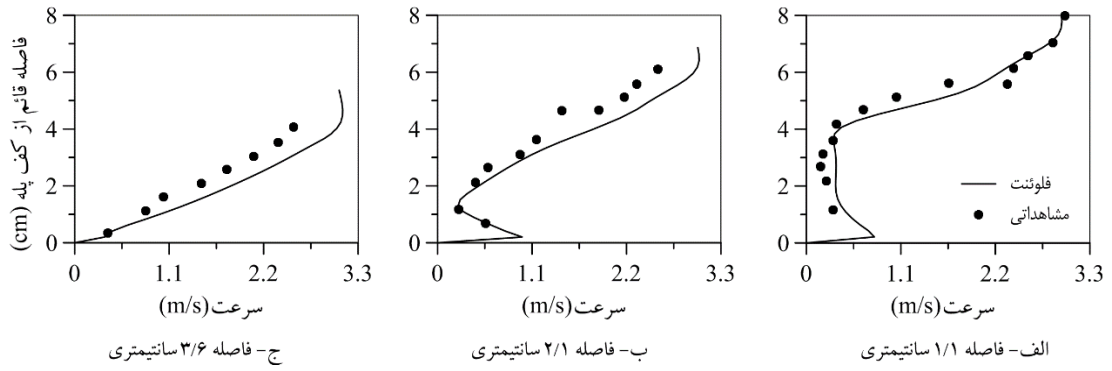
شکل ٤- پروفیل افقی فشار مشاهداتی و محاسباتی روی پله ٥ و ٩



شکل ٥- پروفیل عمودی فشار مشاهداتی و محاسباتی روی پله ٥ و ٩



شکل ٦- پروفیل سرعت مشاهداتی و محاسباتی در مقاطع مختلف پله ٧



شکل ٧- پروفیل سرعت مشاهداتی و محاسباتی در مقاطع مختلف پله ٩

پروفیل سرعت انـدازه‌گیـری و شـبیه‌سـازی شـده در مقـاطع مختلف پله‌های ۷ و ۹ به‌ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شـده است. لازم به ذکر اسـت، داده‌هـای مشـاهداتی از رقـومی کـردن نمودارهای Chen et al. (2002) توسط Javan et al. (2013) تهیه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شـود، در بیشـتر مقـاطع نرم افزار فلوئنت به خوبی پروفیل سرعت را شبیه‌سازی کرده است. به منظور محاسبه دقت نتـایج مـدل عـددی، ریشـه دوم میـانگین مربعات خطا برای پروفیـل سـرعت روی پلـه ۷ و ۹ محاسـبه و در جدول (۲) آورده شده است. مدل فلوئنت پروفیل سرعت روی پله ۷ را با دقت بهتری نسبت به پله ۹ شبیه‌سازی کرده اسـت. همـانطور که بیان شد، مکان شروع هوادهی لبه انتهای پله ۵ بوده اسـت. بـا فاصله گرفتن از این پله در جهت پایین‌دست غلظت هوا و اخـتلاط آب و هوا بیشتر شده و باعث کاهش دقت مدل عددی شده است.

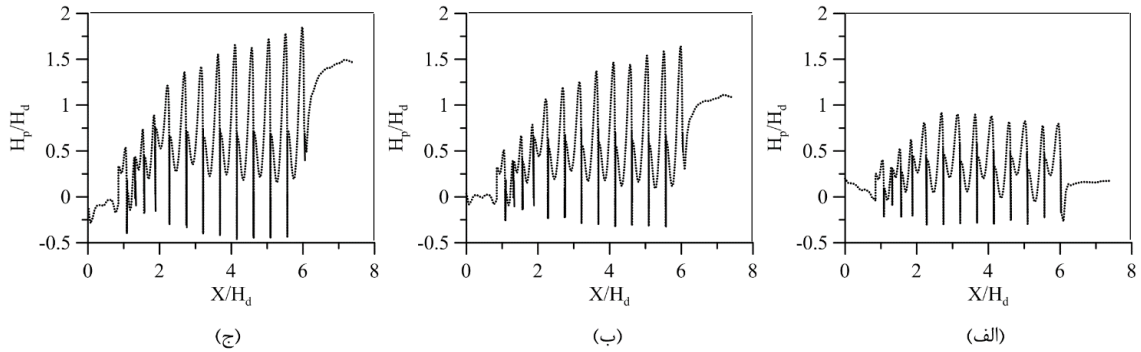
خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی ساده و شیبدار

بعد از تعیین روش و شمای عـددی مناسـب بـرای جداسـازی معادلات حاکم و صحت‌سنجی مدل عددی، بـا تغییـر شـیب کـف پله‌ها از حالت افقی به زوایای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه و برای دبی‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ لیتر بر ثانیه مدل مجدداً اجرا شـد و تـأثیر دبی و شیب پله‌ها بر خصوصیات جریان مورد بررسی قـرار گرفـت. کمترین دبی که جریان غیرریزشی در این مدل آزمایشگاهی اتفـاق می‌افتد دبی چهار لیتر بر ثانیه و دبی طراحی نیز ۲۰ لیتـر بـر ثانیـه می‌باشد. با در نظر گرفتن پنج دبی بین دبی حداقل و دبی طراحی، دبی‌های شبیه‌سازی انتخاب شد. هم‌چنین به منظور بررسـی تـاثیر دبی بیش از طراحی بر توزیع سرعت و فشار، دبی ۲۴ لیتر بر ثانیـه نیز درنظر گرفته شد. تاثیر سه مقدار دبی متفاوت بـر توزیـع فشـار روی سرریز پلکانی در شکل (۸) آورده شـده اسـت کـه در آن H_d عمق آب طراحی و H_p بار آبی که برابر P/γ است و X فاصله افقی از تاج سرریز می‌باشد.

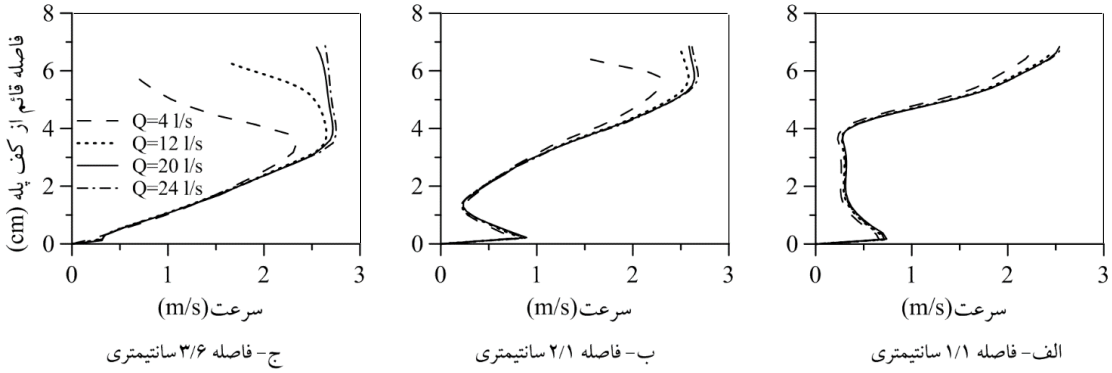
همانطور که ملاحظه می‌شود با کاهش دبی، حداکثر فشار کـه بر روی قسمت افقی پله‌ها اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد. اما حداقل فشار که بر روی قسمت عمودی پله‌ها رخ می‌دهد، مقداری افزایش می‌یابد. بنابراین احتمال کاویتاسیون در دبی‌های زیاد و در قسـمت عمودی پله‌ها بیشتر است. در این تحقیق به بررسی تـاثیر تغییـرات دبی نسبت به دبی طراحی بر پروفیل سرعت نیز پرداخته شده است. تاثیر تغییرات دبی نسبت به دبی طراحی بر پروفیل سرعت روی پله هفتم در شکل (۹) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در ابتدای پله تغییرات دبی نسبت به دبی طراحی تاثیری بـر توزیـع سرعت ندارد اما در انتهای پله، تا یک عمقی تغییرات دبی تـاثیری بر توزیع سرعت نداشته و سپس با کاهش دبی، سرعت جریان نیـز کاهش می‌یابد. در سرریزهای پلکانی بدلیل وجود پله‌ها، یک کـف کاذب وجـود دارد کـه گردابـه‌هـای چرخشـی در زیـر آن تشـکیل می‌شود. در جریان غیرریزشی تغییرات دبی تاثیر ناچیزی بر پروفیل سرعت در ناحیه زیر کف کاذب دارد. با توجه بـه آنکـه ارتفـاع پلـه هفتم، شش سانتی‌متر است در مقطع قائمی که ۱/۱ سانتی‌متری از ابتدای پله فاصله دارد، نقاط زیادی زیر کف کاذب است. بنابراین در این مقطع قائم، تغییرات دبی تأثیری بـر توزیـع سـرعت آن نـدارد. تأثیر تغییرات دبی بر عمق و نوع جریان در شکل (۱۰) آورده شـده است.

جدول ۲- ریشه دوم میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت

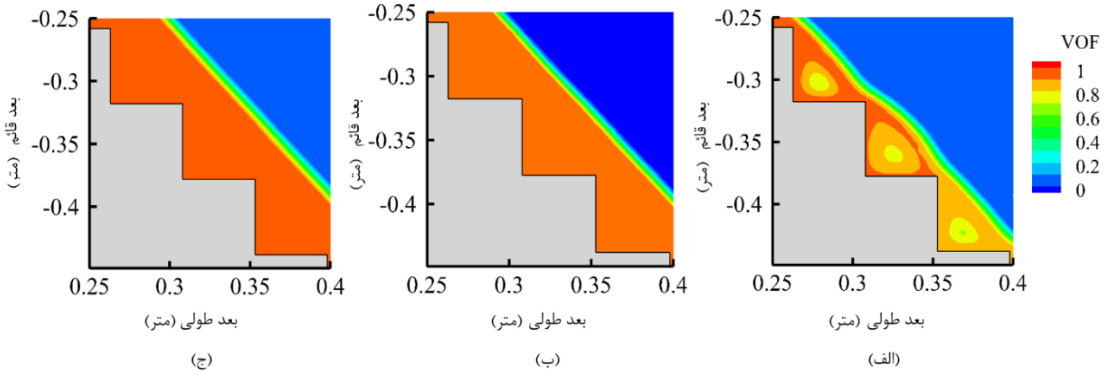
شماره پله	شماره مقطع	RMSE
۷	۱	۰/۰۱۵
۷	۲	۰/۰۱۱
۷	۳	۰/۰۱۷
۹	۱	۰/۰۵۲
۹	۲	۰/۰۳
۹	۳	۰/۲۹



شکل ۸- فشار روی سرریز پلکانی برای الف-دبی ٤ لیتر بر ثانیه، ب-۲۰ لیتر بر ثانیه و ج-دبی ۲٤ لیتر بر ثانیه



شکل ۹- تاثیر تغییرات دبی نسبت به دبی طراحی بر پروفیل سرعت پله ۵ در مقاطع مختلف پله ۷

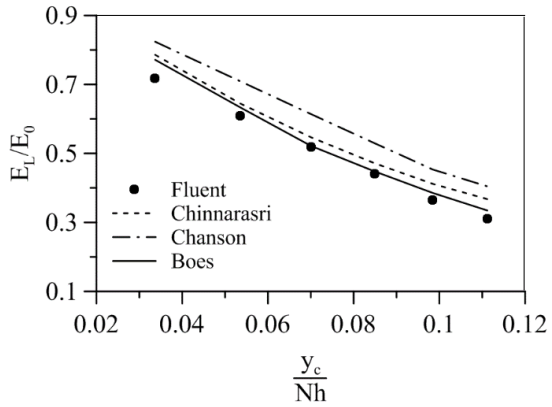


شکل ۱۰- تاثیر تغییرات دبی بر تراز آب و نوع جریان برای الف- دبی l/s ٤، ب-.دبی l/s ۲۰ و ج-دبی l/s ۲٤

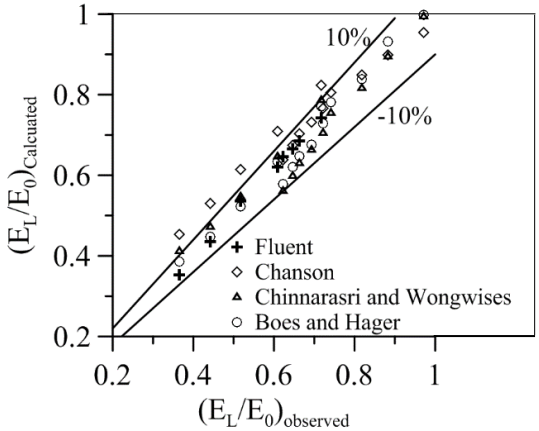
همان‌طور که ملاحظه می‌شود در دبی چهار لیتر بر ثانیه جریان در حال تبدیل به جریان ریزشی است. در این دبی مقدار عمق بحرانی ۲/۶۳ و طبق رابطه (۱) حداقل عمق بحرانی برای شروع جریان غیرریزشی ۲/۶۲ است. همچنین نسبت h/l برای پله‌ها ۱/۳۳ و طبق رابطه (۲) مقداری $(h/l)_c$ برای شروع جریان غیرریزشی ۱/۰۹ می‌باشد، بنابراین برای تمام دبی‌های عبوری از سرریز جریان از نوع غیرریزشی است.

دبی عبوری از سرریز پلکانی و به عبارت دیگر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ از عوامل موثر بر میزان استهلاک انرژی است. تاثیر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ساده در شکل (۱۱) آورده شده است. همچنین روابط مختلف ارائه شده توسط محققین برای استهلاک انرژی با نتایج خروجی نرم افزار Fluent آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دبی مقدار عمق بحرانی و پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ افزایش یافته و مقدار پارامتر بی‌بعد E_L/E_0 و مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی، عمق جریان عبوری از سرریز افزایش یافته و زبری نسبی که به‌صورت $h\cos\phi/D$ (h ارتفاع پله، ϕ زاویه شیب وجه پایین‌دست و D قطر هیدرولیکی) معرفی می‌شود کاهش می‌یابد. با توجه به آن‌که ضریب اصطکاک f رابطه مستقیم با زبری نسبی دارد، بنابراین با افزایش دبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. هم‌چنین شکل (۱۱) نشان می‌دهد رابطه Boes و Hager (2003) در محاسبه مقدار افت انرژی در سرریز پلکانی ساده نتایج مناسب‌تری دارد.

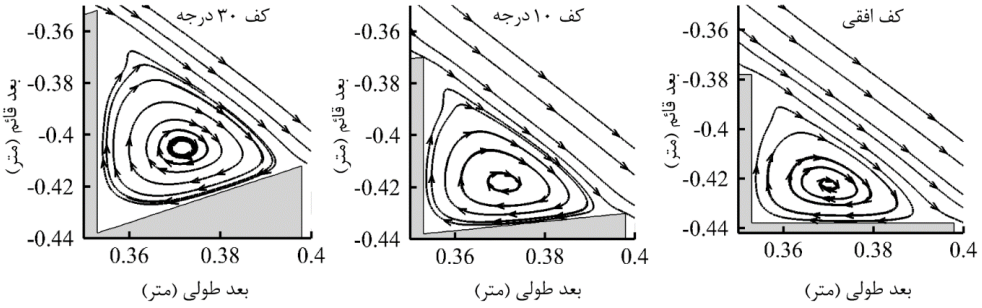
به منظور صحت‌سنجی روابط ارائه شده برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ساده علاوه بر خروجی نتایج فلوئنت، از داده‌های Chinnarasri و Wongwisess (2006) نیز استفاده شده است. استهلاک نسبی انرژی براساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی مدل فلوئنت در مقابل میزان استهلاک نسبی انرژی محاسباتی توسط روابط مختلف برای سرریزهای پلکانی در شکل (۱۲) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خروجی مدل فلوئنت، روابط Chinnarasri و Wongwisess (2006) و Boes و Hager (2003) برای تمام داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد دارند. متوسط درصد خطا برای خروجی مدل فلوئنت ۲/۸ درصد و متوسط درصد خطا روابط ارائه شده توسط باوس و هگر، چینارسی و ونگوایس، و چنسون به ترتیب ۳/۷، ۵/۴ و ۱۱/۶ درصد است. شیبدار کردن پله‌ها باعث آشفتگی و تلاطم بیشتر جریان عبوری از سرریز پلکانی شده و بر خصوصیات هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی تاثیر می‌گذارد.



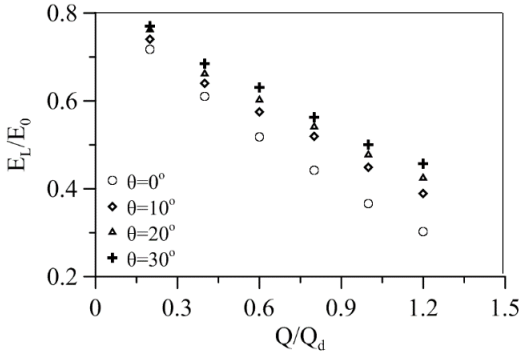
شکل ۱۱- تاثیر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاک نسبی انرژی در سرریز پلکانی ساده



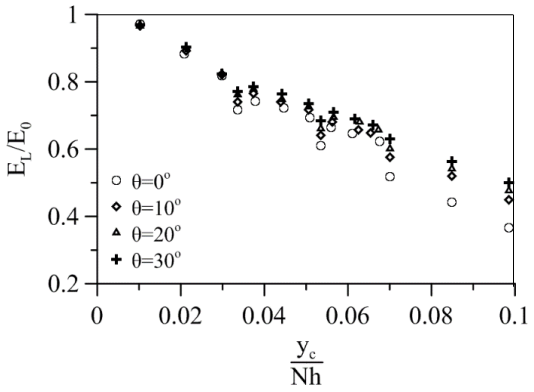
شکل ۱۲- مقایسه استهلاک نسبی انرژی مشاهداتی و محاسباتی در سرریز پلکانی ساده



شکل ۱۳- تاثیر تغییرات شیب کف پله‌ها بر خطوط جریان برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه



شکل ١٤- تاثیر دبی و شیب کف پله‌ها بر استهلاک نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی



شکل ۱۵- تاثیر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاک انرژی در سرریز پلکانی شیبدار

تأثیر تغییرات شیب کف پله‌ها بر خطوط جریان برای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه در شکل (۱۳) آورده شده است. با زیاد شدن شیب کف پله، مرکز گردابه ایجاد شده مقداری به لبه پله نزدیک و از کف پله دورتر می‌شود. همچنین افزایش شیب کف پله‌ها باعث ایجاد گردابه‌های بزرگتری می‌شود که در نتیجه مقدار بیشتری از انرژی صرف چرخاندن آن‌ها می‌شود. تاثیر شیب پله‌ها بر میزان استهلاک نسبی انرژی برای دبی‌های مختلف در شکل (۱۴) آورده شده است. با افزایش شیب پله‌ها بدلیل افزایش تلاطم و بزرگ شدن گردابه‌ها میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال برای دبی طراحی در حالتی که پله‌ها افقی باشد، مقدار استهلاک انرژی نسبی ۰/۳۶۶ و برای حالتی که زاویه کف پله با افق ۳۰ درجه است، مقدار استهلاک انرژی نسبی ۰/۵ است. به منظور ارائه رابطه جدید برای استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار، علاوه بر خروجی نتایج فلوئنت از داده‌های Chinnarasri و Wongwisess (2006) نیز استفاده شد. میزان استهلاک نسبی انرژی برای مقادیر مختلف پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ براساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی مدل فلوئنت در شکل (۱۵) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ از ۰/۰۳ کمتر باشد شیبدار کردن کف پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با کاهش پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ جریان عبوری از پله‌ها به جریان ریزشی نزدیک می‌شود بنابراین در جریان ریزشی افزایش شیب پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با افزایش پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ تاثیر شیبدار کردن پله‌ها بر افت انرژی بیشتر می‌شود. در صورتی که عدد بی‌بعد مزبور ۰/۱ باشد برای زاویه‌های ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب استهلاک نسبی انرژی ۰/۳۸، ۰/۴۳، ۰/۴۷ و ۰/۵ است. متوسط درصد خطای رابطه (۱۱) که برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار ارائه شده برای داده‌های آزمایشگاهی ۲/۳ درصد و برای نتایج خروجی نرم‌افزار فلوئنت ۲۳ درصد است. لازم به ذکر است رابطه (۱۱) برای عدد بی‌بعد $y_c/(Nh)$ کوچکتر از ۰/۰۶۵ صادق است، حال آنکه عدد بی‌بعد مزبور برای شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار فلوئنت به ۰/۱ می‌رسد. به منظور ارائه رابطه‌ای مناسب برای تعیین میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار با استفاده از رگرسیون غیرخطی روابط متعددی بر داده‌های مشاهداتی و نتایج فلوئنت برازش داده شد و در نهایت رابطه (۱۵) که کمترین خطا را با داده‌ها داشت، ارائه شد:

$$\left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta>0}=\left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta=0}\left[e^{\left(\frac{\theta}{360}\right)}\left(3.9\frac{y_c}{Nh}+0.8\right)\right] \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق عبارت $(E_L/E_1)_{\theta=0}$ استهلاک نسبی انرژی برای حالتی که شیب پله‌ها افقی است و براساس رابطه Boes و Hager (2003) محاسبه می‌شود. خطای کلیه داده‌های محاسباتی توسط رابطه (۱۵) کمتر از ۵ درصد و متوسط خطا رابطه مزبور در محاسبه استهلاک انرژی ۳/۱ درصد است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا دقت مدل فلوئنت در شبیه‌سازی تراز سطح آب، پروفیل سرعت و فشار بر روی سرریز پلکانی مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر خطای مطلق در محاسبه تراز سطح آب ۳ میلیمتر و ریشه دوم میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی پروفیل سرعت و فشار به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۷۲ است، بنابراین با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن تهیه داده‌های آزمایشگاهی می‌توان از مدل فلوئنت در پیش‌بینی رفتار جریان بر روی سرریز پلکانی استفاده نمود. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، به بررسی تاثیر تغییرات دبی نسبت به دبی طراحی و شیب کف پله‌ها بر هیدرولیک جریان در سرریز پلکانی پرداخته شد. با افزایش دبی، فشار روی قسمت افقی پله‌ها افزایش و روی قسمت قائم پله‌ها مقداری کاهش می‌یابد. تغییر شیب پله‌ها تاثیر چندانی بر الگوی توزیع فشار ندارد، به طوریکه حداکثر فشار در انتهای قسمت شیبدار پله‌ها اتفاق می‌افتد و در قسمت عمودی نیز کمترین فشار رخ می‌دهد. بنابراین خطر کاویتاسیون و خراب شدن بتن در قسمت عمودی پله‌ها بیشتر است. در این تحقیق، میزان استهلاک نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی ساده توسط روابط مختلف محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی و خروجی مدل فلوئنت مقایسه شد. رابطه ارائه شده

توسط Boes و Hager (2003) کمترین میزان خطا برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی را دارد. در صورتی که پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ از ۰/۰۳ کمتر باشد شیبدار کردن کف پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با کاهش پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ جریان عبوری از پله‌ها به جریان ریزشی نزدیک می‌شود بنابراین در جریان ریزشی افزایش شیب پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با افزایش پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ تاثیر شیبدار کردن پله‌ها بر افت انرژی بیشتر می‌شود. در صورتی که عدد بی‌بعد مزبور ۰/۱ باشد برای زاویه‌های ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب استهلاک نسبی انرژی ۰/۳۸، ۰/۴۳، ۰/۴۷ و ۰/۵ است. همچنین در پژوهش حاضر برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار رابطه‌ای ارائه شد که متوسط خطای آن حدود ۳/۱ درصد می‌باشد.

منابع

1- Boes, R.M. and Hager, W.H., 2003. Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, 129(9)*, pp.671-679.

2- Chamani, M.R. and Rajaratnam, N., 1999. Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, 125(9)*, pp.969–971.

3- Chanson, H., 1994. Comparison of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research, 32(2)*, pp.213-218.

4- Chanson, H., 2001. A transition flow regime on stepped spillways: the facts. In *29th IAHR Congress, Tsinghua University, Beijing, China*.

5- Chanson, H., 2002. *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Steenwijk, the Netherlands: A. A. Balkema Publishers.

6- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H., 2002. Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway over flow. *Journal of Hydraulic Engineering, 128(7)*, pp.683-688.

7- Cheng, X., Chen, Y. and Luo, L., 2006. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillway. *Journal Science in China Series E: Technological Sciences, 49(6)*, pp.674-684.

8- Chinnarasri, C. and Wongwisess, S., 2004. Flow regimes and energy losses on chutes with upward inclined steps. *Canadian Journal of Civil Engineering, 31(5)*, pp.870-879.

9- Chinnarasri, C. and Wongwisess, S., 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(1)*, pp.70-76.

10- Javan, M., Sadeghfam, S. and Eghbalzadeh, A., 2013. Comparison of mixture and VOF methods for numerical simulation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. *Journal of Water and Soil Conservation, 20(4)*, pp.75-97. (In Persian).

11- Kherbache, K., Chesneau, X., Abide, S. and Benmamar, S., 2013. Modeling of a Water Flow Over Stepped Spillways. *Machine Dynamics Research, 37(1)*, pp.47-64.

12- Naderi Rad, I., Talebbeydokhti, N. and Nikseresht, A.H., 2009. Investigation of energy dissipation over stepped spillways with horizontal, inclined and end sill steps by using numerical model. *Journal of Civil and Environmental Engineering, 39(1)*, pp.53-66. (In Persian).

13- Rajaratnam, N., 1990. Skimming flow in stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering, 116(5)*, pp.587-591.

14- Salmasi, F., 2009. Effect of number of steps on energy dissipation of stepped spillways based on the new design approach. *Journal of Water and Soil Science, 19(1)*, pp.27-38. (In Persian).

15- Sorensen, R.M., 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering, 111(12)*, pp.1461–1472.

16- Varjavand, A., Khosravi-Nia, P. and Salmasi, F., 2008. Investigation of energy dissipation in stepped spillway by using fluent numerical modeling. In *4th National Congress on Civil Engineering, Tehran University, Tehran, Iran*. (In Persian).

Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineering **Vol. 41, No. 3, Fall 2018, p. 185-199**

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Energy Dissipation and Hydraulic Characteristics of Flow on Simple and Inclined Stepped Spillways using FLUENT Model

E. Fazeli[1] and M. M. Heidari[2*]

1- Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Razi University, Iran.
2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Iran *(mm.heidari@razi.ac.ir).*

Received:1 February 2017 Accepted: 3 May 2017

Keywords: Cavitation, Fluent Model, Friction Coefficient, Navier-Stokes Equations, Two-Phase Flow.

Introduction

Stepped spillways are hydraulic structures which due to the high energy loss of flow have important role in reducing dimensions of stilling basin of downstream of the dams and consequently their economical design. The dam designers tended to study the characteristics of flow on this type of spillways in recent decades. Horizontal steps, inclined steps, and steps with end sills may be used in stepped spillways. The energy loss of flow on stepped chute depends on the total discharge per unit width of chute, the total flow head, the step height, the step length, the gravitational acceleration, and the height characteristics of the step. For the inclined step, the height characteristics is the increment of step above the horizontal level or the angles of step.
The objective of the study is to compare the relative energy dissipation between horizontal steps and inclined steps and find the optimal energy dissipation efficiency for flow on stepped chutes. In this paper, the effect of angles of inclined step, relative critical depth, and relative discharge on the relative energy dissipation over stepped spillways are investigated and discussed, too. To achieve this goal, first the FLUENT model's output results for simulation of flow passing over a stepped spillway are validated using the experimental data, and then effect of the of angles of inclined step is examined. Also, an equation for the estimate of the relative energy dissipation for inclined stepped spillways was developed.

Methodology

Using the physical models and experimental evaluation of the flow pattern on the stepped spillways demands high costs and mathematical models can help to identify the flow pattern on these structures. In this paper, Chen et al's (2002) experimental data were used for evaluating the accuracy of the FLUENT model results. A stepped spillway model made of plexiglass with a standard WES profile was tested in Chen et al's (2002) model. The spillway crest is 78.9 cm above the toe, and the design head of the spillway is H_d=59.7 cm. The standard spillway crest profile is described by the equation $y= 3.633x^{1.85}$, connected by three arc segments to the vertical upstream face. Below the tangency point, the spillway profile had a slope of 1V:0.75H, completed by an arc with a radius of 28 cm down to the horizontal channel at the toe. There were 13 steps on the whole stepped spillway. The calculation of the maximum absolute error of free water surface is 3 mm and root mean square error in the simulation of velocity profile and pressure respectively are 0.15 and 0.72. The model was validated, then the effects of discharge and steps slope on flow hydraulic characteristics were investigated.

Results and Discussion

After meshing and applying the boundary conditions for the selected experiments, the FLUENT model was applied and the water depth and velocity in toe of spillway was calculated,

and then the relative energy dissipation was determined. The relative energy dissipation calculated with the proposed methods by Cahnson (1994), Chinnarasri and Wongwises (2006) and Boes and Hager (2003), too. The average error of FLUENT model's output for calculation of the relative energy dissipation for stepped spillway is 2.8% and for the proposed methods by Cahnson (1994), Chinnarasri and Wongwises (2006) and Boes and Hager (2003) are 3.7%, 5.4%, and 11.6%, respectively.

A new approach to increase the energy loss efficiency is to incline the step face in stepped spillway. The effect of the angles of inclined step for various discharges are shown in Figure 1. By increasing the angles of inclined step due to increased turbulence and rising vortices, the magnitude of energy dissipation increases. For example, for design discharge, where the steps are horizontal, the relative energy dissipation is 0.366 and for inclined step with 30-degree angle is 0.5.

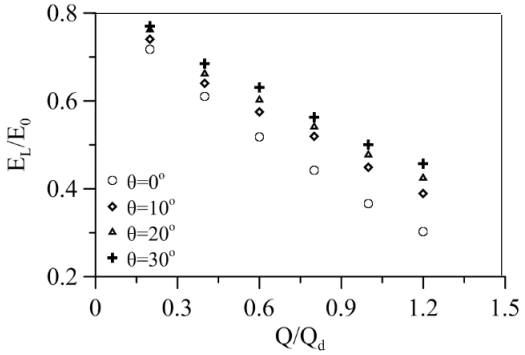


Fig 1- Effect of discharge and the angles of inclined step on relative energy loss

The relationship between relative energy loss (E_L/E_0) and y_c/Nh based on FLUENT model's output results presented in Figure 2. İf y_c/Nh be less than 0.03, the angles of inclined step has no effect on the relative energy dissipation. By reducing the y_c/Nh, the flow through the step is close to nappe flow regime, and increasing the angles of inclined step in nappe flow regime does not have effect on energy dissipation. By increasing the y_c/Nh, the effect of the angles of inclined step on energy dissipation will increase.

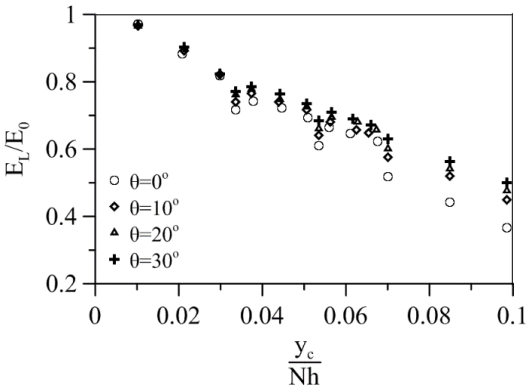


Fig 2- Effect of y_c/(Nh) on energy dissipation for inclined steps

Using nonlinear regression analysis, the empirical correlation for relative energy loss on inclined steps is obtained by fitting the FLUENT model's output results and defined as:

$$\left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta>0} = \left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta=0}\left[e^{(\frac{\theta}{360})}\left(3.9\frac{y_c}{Nh}+0.8\right)\right] \quad (1)$$

It should be noted that in Equation (1), the $(E_L/E_1)_{\theta>0}$ and $(E_L/E_1)_{\theta=0}$ are the relative energy loss on inclined steps and horizontal steps, respectively. The relative energy loss on horizontal steps could be calculated with the proposed methods by Boes and Hager (2003). The average error of presented formula for relative energy loss calculation on inclined steps is about 3.1%.

Conclusions

The results showed that the maximum pressure takes place on the horizontal part of steps and it increased by increasing the discharge of the stepped spillway, but decreases the minimum pressure on the vertical part of steps. Therefore, chance of cavitation is more in high discharges and the vertical part of steps. The results also revealed that the rate of energy dissipation increased in skimming flow by increasing the bottom of steps slope increased due to increase in turbulence and enlargement of vortex. But the effect of increase in steps slope in skimming flow on energy loss is less significant. Using experimental data and output results of Fluent model to calculate energy dissipation in inclined stepped spillways presented formula that the average error is about 3.1%.

References

1- Boes, R.M. and Hager, W.H., 2003. Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, 129(9),* pp.671-679.

2- Chanson, H., 1994. Comparison of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research, 32(2),* pp.213-218.

3- Chen, Q., Dai, G. and Liu, H., 2002. Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway over flow. *Journal of Hydraulic Engineering, 128(7),* pp.683-688.

4- Chinnarasri, C. and Wongwisess, S., 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132(1),* pp.70-76.