

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

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 پذیرش: ۹۶/۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۳

چکیده

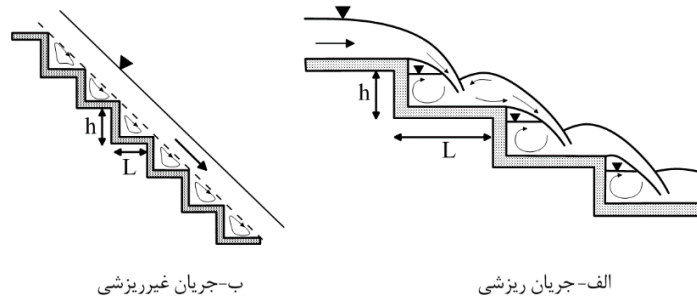
سرریزهای پلکانی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که به دلیل اتلاف زیاد انرژی جریان، نقش مهمی در کاهش ابعاد حوضچه آرامش پایین دست سدها و در نتیجه طراحی اقتصادی آن‌ها دارند. مطالعه و بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی این سرریزها مورد توجه طراحان سد در دهه‌های اخیر بوده است. استفاده از مدل‌های فیزیکی و 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 فلونت 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 0.15 و 0.72 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 استهلاك 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 فلونت برای محاسبه استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار رابطه‌ای ارائه شد که متوسط خطای آن حدود $3/1$ درصد می‌باشد.

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

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 استهلاك انرژی جریان را افزایش می‌دهد. به طور کلی سه نوع جریان در روی سرریزهای پلکانی مشاهده می‌شود، نوع اول جریان ریزشی است که در آن جریان به صورت 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 به صورت 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.

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 پایین دست 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 پایین دست 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 استهلاك انرژی در سدها به کار گرفته می‌شوند. میزان افت انرژی زیاد سرریزهای پلکانی باعث کاهش عمق حفاری حوضچه آرامش پایین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی شده و هزینه اجرای سد کمتر می‌شود و در بعضی شرایط ممکن است منجر به حذف حوضچه



شکل ۱- جریان ریزشی و غیرریزشی بر روی سرریزهای پلکانی

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 آشفستگی $k-\epsilon$ 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 فلونت و روش حجم سیال و مدل آشفستگی $k-\epsilon$ استاندارد جریان روی سرریز پلکانی را شبیه‌سازی 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 فلونت 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 پایین دست 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 اختلاطی 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، به طوری 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 فلونت

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 پایین دست 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 پایین دست 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 پایین دست 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 آشفستگی $k-\epsilon$ جریان بر روی سرریز پلکانی را شبیه‌سازی نمودند. در پژوهش آن‌ها فشار و سرعت روی پله‌ها اندازه‌گیری و با مدل عددی مقایسه شد. شیب‌دار کردن پله‌ها و

نسبت ارتفاع به طول پله‌ها بیشتر از مقدار بحرانی محاسبه شده از رابطه (۲) باشد، رژیم جریان غیرریزشی می‌باشد:

$$\left(\frac{h}{L}\right)_c = \sqrt{0.89 \left[\left(\frac{y_c}{h}\right)^{-1} - \left(\frac{y_c}{h}\right)^{-0.34} + 1.5 \right]} - 1 \quad (2)$$

بالا آمدن سطح آب به دلیل احداث سد باعث افزایش انرژی جریان می‌شود. مقداری از انرژی به دلیل 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 به منظور طراحی سازه مستهلک کننده انرژی مثل حوضچه آرامش ضروری است. مقدار انرژی باقی‌مانده در پنجه سرریز پلکانی (E_2) از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Boes and Hager, 2003):

$$E_2 = h_w + \alpha \frac{q_w^2}{2gh_w^2} \quad (3)$$

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 پایین دست سرریز باید از عمق آب معادل مطابق رابطه (۴) استفاده نمود (Boes and Hager, 2003):

$$h_w = \int_0^{h_{90}} [1 - C(y)] dy \quad (4)$$

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:

$$E_2 = E_1 - E_L \quad (5)$$

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) به صورت بدون بعد ارائه می‌شود:

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 ۴ تا ۵ برابر کم‌تر از روش حجم سیال است. Kherbache et al. (2013) نتایج خروجی مدل عددی فلونتت 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 آشفته‌گی و توزیع فشار پرداختند و به این نتیجه رسیدند با افزایش دبی میزان آشفته‌گی، حداکثر فشار و سرعت روی پله‌ها افزایش می‌یابد.

در صورت افزایش افت انرژی توسط سرریز، هزینه احداث حوضچه آرامش پایین دست 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 از آن‌ها از اهداف دیگر این تحقیق است. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی Chen et al. (2002) یک سرریز پلکانی توسط مدل فلونتت شبیه‌سازی و دقت آن در محاسبه پروفیل سرعت و فشار روی پله‌ها بررسی شده است. سپس به بررسی تأثیر 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:

$$(y_c)_{onset} = 1.057h - 0.465 \frac{h^2}{L} \quad (1)$$

در رابطه فوق، h ارتفاع پله و L طول افقی هر پله می‌باشد. Chamani و Rajaratnam (1999) نشان دادند در صورتی که

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

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

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:

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

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

معرفی مدل فلونت

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 شمای مختلف انجام می‌گیرد. برای تعیین لزجت گردابه‌ای در جریان آشفته از مدل‌های یک معادله‌ای، دو معادله‌ای ($k-\epsilon$ و $k-\omega$) و پنج معادله‌ای استفاده می‌شود. مدل‌سازی سطح آزاد در فلونت با استفاده از روش اختلاطی، جزء حجم سیال و اولری امکان‌پذیر است. فلونت قابلیت حل مسائل دو بعدی و سه بعدی را دارد و استفاده از مدل‌های پیشرفته آشفته‌گی 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 فاز 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 فلونت

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 از جنس 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

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

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

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

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

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

در رابطه فوق، K ارتفاع زبری برابر $h\cos\phi$ 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)

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

برای $\frac{H_{dam}}{y_c} < 15-20$

(۹-ب)

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

که در آن:

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

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:

Realizable $k-\epsilon$ ، برای الگوریتم حل میدان سرعت و فشار از روش SIMPLE، PISO، 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 شما (B.F.W) Body Force Weighted برای جداسازی معادله فشار و از روش SIMPLE برای حل میدان سرعت و فشار و از روش $k-\epsilon$ 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 شما (Second Order Upwind)، مدل‌سازی سطح آزاد از روش اختلاط و شما (QUICK) بوده است. همچنین گام‌های زمانی برای حل مسأله 0.001 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

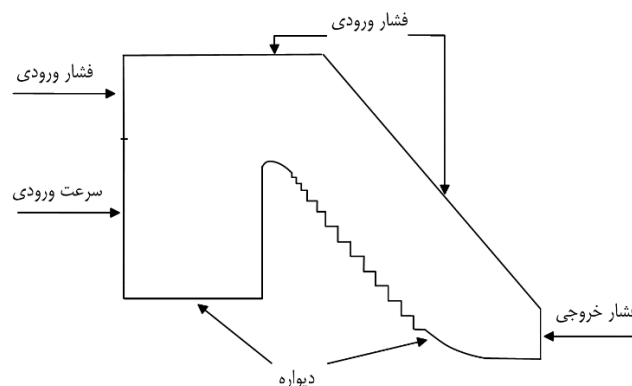
برای تعیین دقت مدل فلوئنت در شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد، پروفیل‌های فشار و سرعت از نتایج آزمایشگاهی (Chen et al., 2002) استفاده گردید. پروفیل سطح آزاد محاسباتی و مشاهداتی در شکل (۳) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود پروفیل سطح آزاد محاسبه شده با داده‌های آزمایشگاهی تقریباً یکسان است. ماکزیمم خطای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

بالادست سرریز متصل شده است. شیب وجه پایین دست متصل به سرریز اوجی یک قائم به 0.75 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، $2/4$ ، ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر و از پله شش ابعاد پله‌ها یکنواخت و دارای طول $4/5$ 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 بیهینه 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 فوم، سرریز و پله‌ها شرط مرزی دیواره، در قسمت خروجی شرط مرزی فشار نسبی صفر، در بخش فوقانی شرط مرزی هوای ورودی که به صورت 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 0.02 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

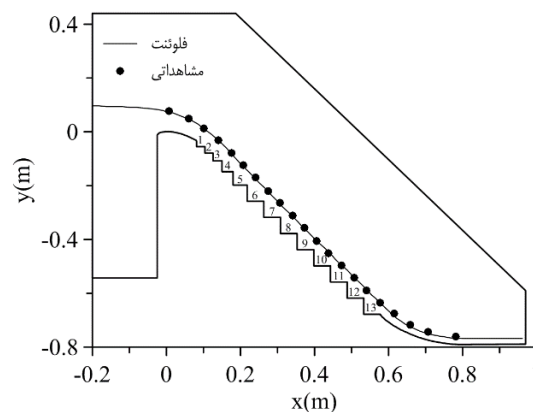
به منظور تعیین روش و شما عددی مناسب برای جداسازی معادلات حاکم، از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ Standard، $k-\epsilon$ RNG و



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

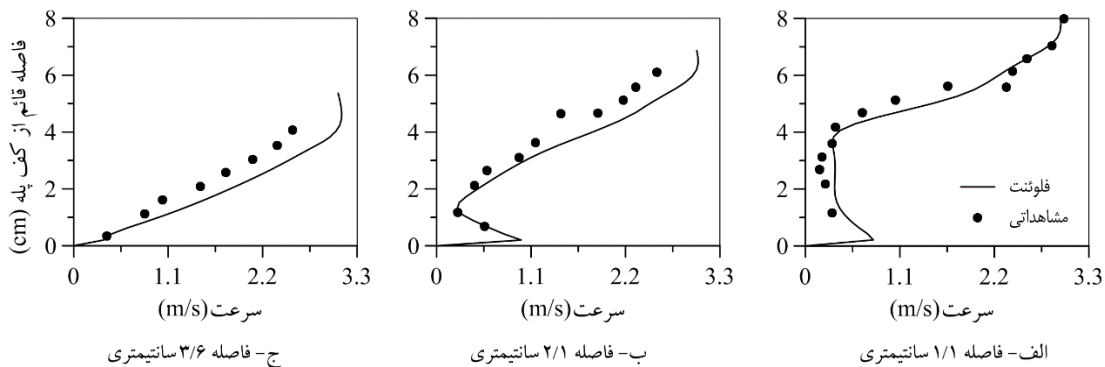
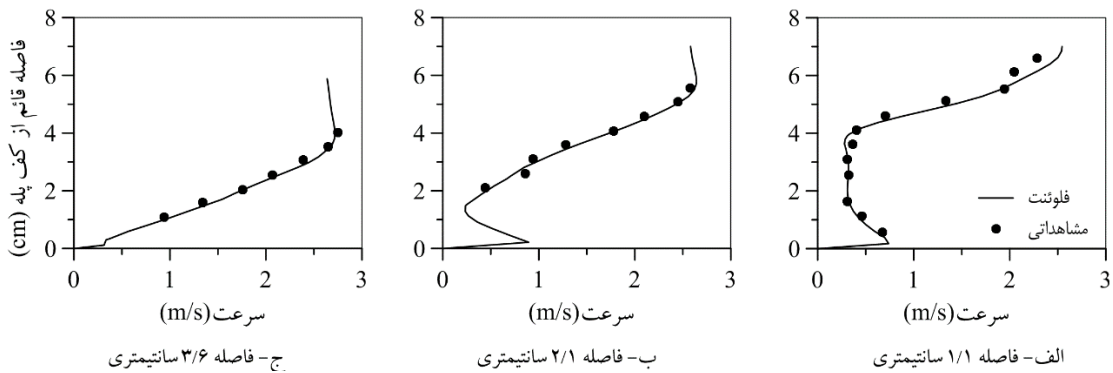
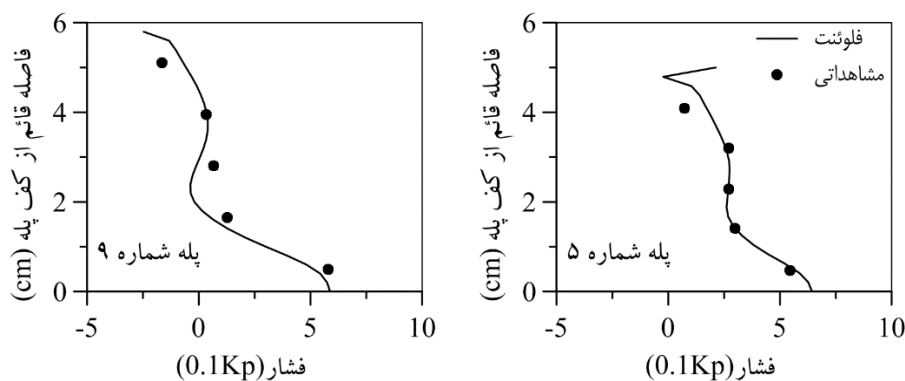
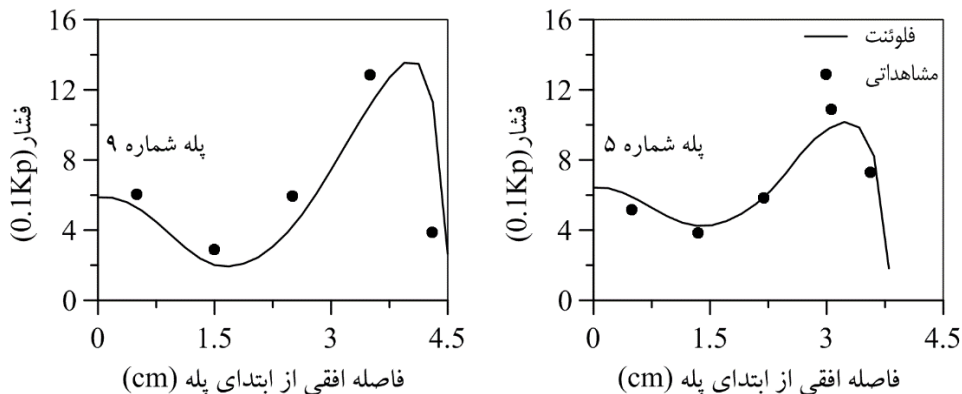
ردیف	شماره مدل	مدل آشفتگی	الگوریتم حل سرعت-فشار	جداسازی فشار	RMSE
۱	A1	k-ε Standard	PISO	B.F.W	۰/۳۹۲
۲	A2	k-ε RNG	PISO	B.F.W	۰/۳۹۳
۳	A3	k-ε Realizable	PISO	B.F.W	۰/۳۸۱
۴	B1	k-ε Standard	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۹۲
۵	B2	k-ε RNG	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۷۳
۶	B3	k-ε Realizable	SIMPLE	B.F.W	۰/۳۸۲
۷	C1	k-ε Standard	SIMPLEC	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

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 به دلیل 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.

با استفاده از مدل فلونت 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 انتهایی 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 فلونت بهتر انجام شده است. باتوجه به اینکه طول پله ۵ و ۹ به ترتیب ۳/۸ و ۴/۵ سانتی‌متر است، ملاحظه می‌شود ابتدا فشار بر روی سطح افقی پله‌ها کاهش می‌یابد و در حدود ۱/۵



دبی بیش از طراحی بر توزیع سرعت و فشار، دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه نیز در نظر گرفته شد. تاثیر سه مقدار دبی متفاوت بر توزیع فشار روی سرریز پلکانی در شکل (۸) آورده شده است که 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 که 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 قسمت عمودی پله‌ها بیشتر است. در این تحقیق به بررسی تاثیر تغییرات 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 بر توزیع سرعت ندارد اما در انتهای پله، تا یک عمقی تغییرات دبی تاثیری بر توزیع سرعت نداشته و سپس با کاهش دبی، سرعت جریان نیز کاهش می‌یابد. در سرریزهای پلکانی بدلیل وجود پله‌ها، یک کف کاذب وجود دارد که گردابه‌های چرخشی در زیر آن تشکیل می‌شود. در جریان غیرریزشی تغییرات دبی تاثیر ناچیزی بر پروفیل سرعت در ناحیه زیر کف کاذب دارد. با توجه به آنکه ارتفاع پله 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 تاثیری بر توزیع سرعت آن ندارد. تاثیر تغییرات دبی بر عمق و نوع جریان در شکل (۱۰) آورده شده است.

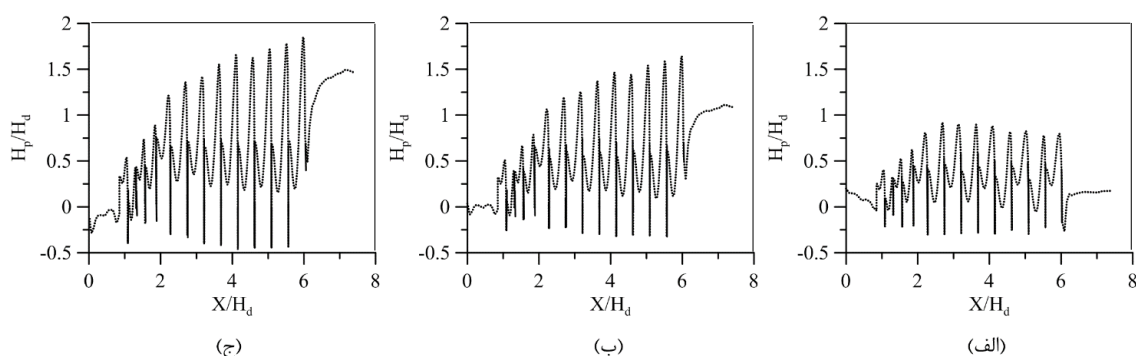
پروفیل سرعت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در مقاطع مختلف پله‌های ۷ و ۹ به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. لازم به ذکر است، داده‌های مشاهداتی از رقومی کردن نمودارهای (Chen et al. (2002) توسط (Javan et al. (2013) تهیه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در بیشتر مقاطع نرم افزار فلوئنت به خوبی پروفیل سرعت را شبیه‌سازی کرده است. به منظور محاسبه دقت نتایج مدل عددی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا برای پروفیل سرعت روی پله ۷ و ۹ محاسبه و در جدول (۲) آورده شده است. مدل فلوئنت پروفیل سرعت روی پله ۷ را با دقت بهتری نسبت به پله ۹ شبیه‌سازی کرده است. همان‌طور که بیان شد، مکان شروع هوادهی لبه انتهایی پله ۵ بوده است. با فاصله گرفتن از این پله در جهت پایین دست غلظت هوا و اختلاط آب و هوا بیشتر شده و باعث کاهش دقت مدل عددی شده است.

خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای پلکانی ساده و شیبدار

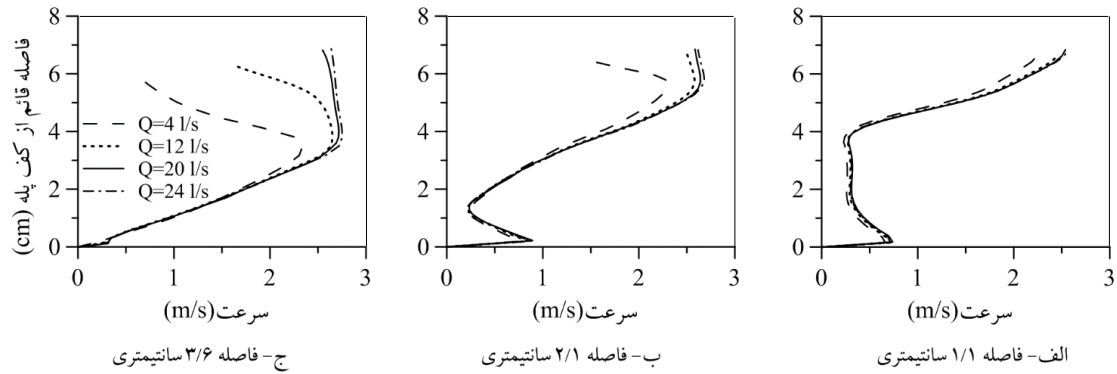
بعد از تعیین روش و شمای عددی مناسب برای جداسازی معادلات حاکم و صحت‌سنجی مدل عددی، با تغییر شیب کف پله‌ها از حالت افقی به زوایای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه و برای دبی‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ لیتر بر ثانیه مدل مجدداً اجرا شد و تاثیر دبی و شیب پله‌ها بر خصوصیات جریان مورد بررسی قرار گرفت. کمترین دبی که جریان غیرریزشی در این مدل آزمایشگاهی اتفاق می‌افتد دبی چهار لیتر بر ثانیه و دبی طراحی نیز ۲۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. با در نظر گرفتن پنج دبی بین دبی حداقل و دبی طراحی، دبی‌های شبیه‌سازی انتخاب شد. هم‌چنین به منظور بررسی تاثیر

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

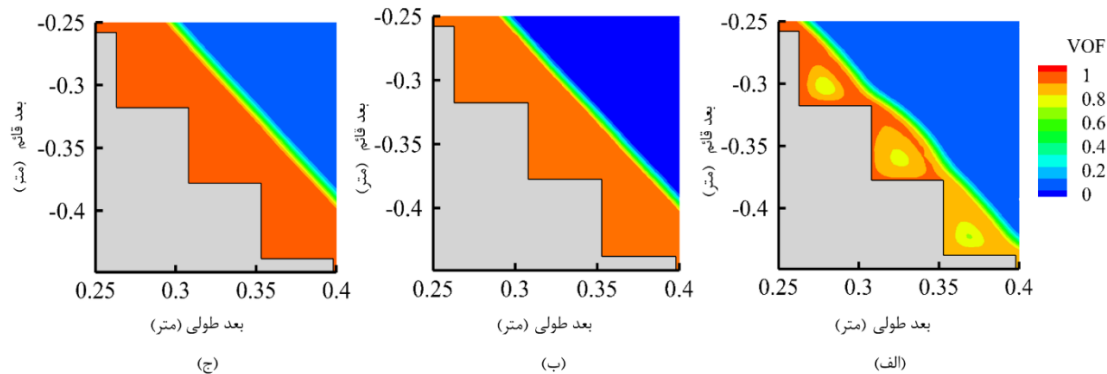
شماره پله	شماره مقطع	RMSE
۷	۱	۰/۰۱۵
۷	۲	۰/۰۱۱
۷	۳	۰/۰۱۷
۹	۱	۰/۰۵۲
۹	۲	۰/۰۳
۹	۳	۰/۲۹



شکل ۸- فشار روی سرریز پلکانی برای الف-دبی ۴ لیتر بر ثانیه، ب-۲۰ لیتر بر ثانیه و ج-دبی ۲۴ لیتر بر ثانیه



شکل ۹- تاثیر تغییرات دبی نسبت به دبی طراحی بر پروفیل سرعت پله ۵ در مقاطع مختلف پله ۲



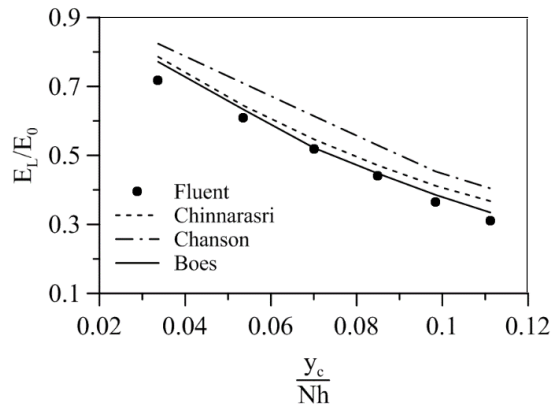
شکل ۱۰- تاثیر تغییرات دبی بر تراز آب و نوع جریان برای الف- دبی ۴ l/s، ب- دبی ۱۲ l/s و ج- دبی ۲۴ l/s

نسبی دارد، بنابراین با افزایش دبی استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. هم‌چنین شکل (۱۱) نشان می‌دهد رابطه Hager و Boes (2003) در محاسبه مقدار افت انرژی در سرریز پلکانی ساده نتایج مناسب‌تری دارد.

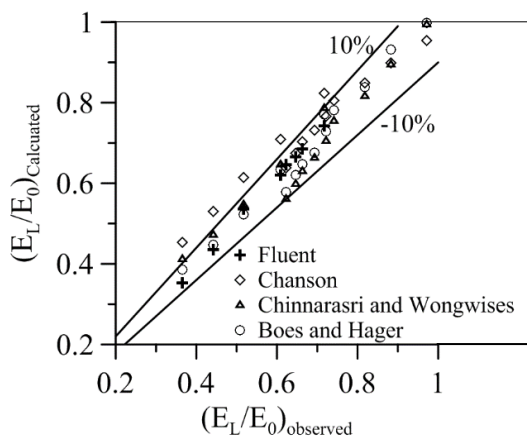
به منظور صحت‌سنجی روابط ارائه شده برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ساده علاوه بر خروجی نتایج فلونت، از داده‌های Chinnarasri و Wongwisess (2006) نیز استفاده شده است. استهلاک نسبی انرژی براساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی مدل فلونت در مقابل میزان استهلاک نسبی انرژی محاسباتی توسط روابط مختلف برای سرریزهای پلکانی در شکل (۱۲) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود خروجی مدل فلونت، روابط Chinnarasri و Wongwisess (2006) و Hager و Boes (2003) برای تمام داده‌ها خطای کمتر از ۱۰ درصد دارند. متوسط درصد خطا برای خروجی مدل فلونت 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 آشفتنی و تلاطم بیشتر جریان عبوری از سرریز پلکانی شده و بر خصوصیات هیدرولیکی جریان و استهلاک انرژی تاثیر می‌گذارد.

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.

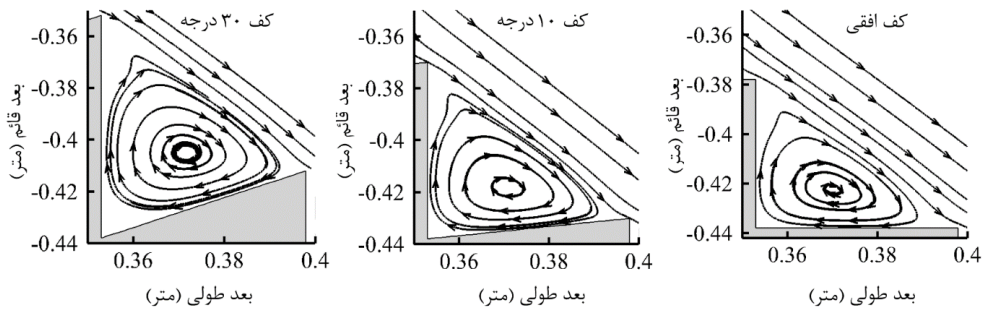
دبی عبوری از سرریز پلکانی و به عبارت دیگر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ از عوامل موثر بر میزان استهلاک انرژی است. تاثیر پارامتر بی‌بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ساده در شکل (۱۱) آورده شده است. هم‌چنین روابط مختلف ارائه شده توسط محققین برای استهلاک انرژی با نتایج خروجی نرم افزار Fluent 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_1/E_0 و مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی، عمق جریان عبوری از سرریز افزایش یافته و زبری نسبی که به صورت $h \cos \phi / D$ (ارتفاع پله، ϕ زاویه شیب وجه پایین دست و D قطر هیدرولیکی) معرفی می‌شود کاهش می‌یابد. با توجه به آن که ضریب اصطکاک f رابطه مستقیم با زبری



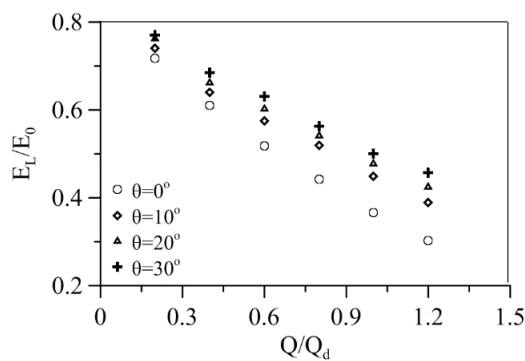
شکل ۱۱- تاثیر پارامتری بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاك نسبی انرژی در سرریز پلکانی ساده



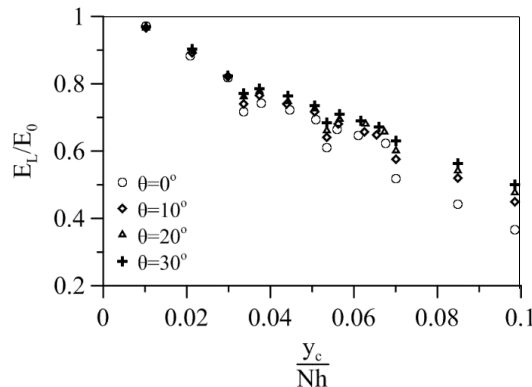
شکل ۱۲- مقایسه استهلاك نسبی انرژی مشاهداتی و محاسباتی در سرریز پلکانی ساده



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



شکل ۱۴- تاثیر دبی و شیب کف پله‌ها بر استهلاك نسبی انرژی در سرریزهای پلکانی



شکل ۱۵- تأثیر پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ بر استهلاک انرژی در سرریز پلکانی شیبدار

استفاده از رگرسیون غیرخطی روابط متعددی در داده‌های مشاهداتی و نتایج فلونتت برآزش داده شد و در نهایت رابطه (۱۵) که کمترین خطا را با داده‌ها داشت، ارائه شد:

$$\left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta>0} = \left(\frac{E_L}{E_1}\right)_{\theta=0} \left[e^{\left(\frac{\theta}{360}\right)} \left(3.9 \frac{y_c}{Nh} + 0.8 \right) \right] \quad (15)$$

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 فلونتت 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 فلونتت در پیش‌بینی رفتار جریان بر روی سرریز پلکانی استفاده نمود. پس از صحت‌سنجی مدل عددی، به بررسی تأثیر 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 تأثیر چندانی بر الگوی توزیع فشار ندارد، به طوری که حداکثر فشار در انتهای قسمت شیبدار پله‌ها اتفاق می‌افتد و در قسمت عمودی نیز کمترین فشار رخ می‌دهد. بنابراین خطر کاویناسیون 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 فلونتت مقایسه شد. رابطه ارائه شده

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. تأثیر 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 فلونتت از داده‌های Chinnarasri و Wongwisess (2006) نیز استفاده شد. میزان استهلاک نسبی انرژی برای مقادیر مختلف پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ براساس داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی مدل فلونتت در شکل (۱۵) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ از ۰/۰۳ کمتر باشد شیبدار کردن کف پله‌ها تأثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با کاهش پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ جریان عبوری از پله‌ها به جریان ریزشی نزدیک می‌شود بنابراین در جریان ریزشی افزایش شیب پله‌ها تأثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با افزایش پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ تأثیر شیبدار کردن پله‌ها بر افت انرژی بیشتر می‌شود. در صورتی که عدد بی بعد 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 فلونتت ۲۳ درصد است. لازم به ذکر است رابطه (۱۱) برای عدد بی بعد $y_c/(Nh)$ کوچکتر از ۰/۰۶۵ صادق است، حال آنکه عدد بی بعد مزبور برای شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار فلونتت به ۰/۱ می‌رسد. به منظور ارائه رابطه‌ای مناسب برای تعیین میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار با

افزایش پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ تاثیر شیبدار کردن پله‌ها بر افت انرژی بیشتر می‌شود. در صورتی که عدد بی بعد مزبور $0/1$ باشد برای زاویه‌های 0° ، 10° ، 20° و 30° به ترتیب استهلاک نسبی انرژی $0/38$ ، $0/43$ ، $0/47$ و $0/5$ است. همچنین در پژوهش حاضر برای محاسبه استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شیبدار رابطه‌ای ارائه شد که متوسط خطای آن حدود $3/1$ درصد می‌باشد.

توسط Hager و Boes (2003) کمترین میزان خطا برای محاسبه استهلاک نسبی انرژی را دارد. در صورتی که پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ از $0/3$ کمتر باشد شیبدار کردن کف پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با کاهش پارامتر بی بعد $y_c/(Nh)$ جریان عبوری از پله‌ها به جریان ریزشی نزدیک می‌شود بنابراین در جریان ریزشی افزایش شیب پله‌ها تاثیری بر استهلاک انرژی ندارد. با

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).