نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant

سال چهارم / شماره چهاردهم / پاییز ۱۳۹۶ 4th Year / No. 14 / December 2017

# شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی دریچه دار و پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در آن

سید حامی حجتی[۱]

حسن احمدی[۲]

امیررضا زراتی*[۳]

**چکیده**

افزایش تراز آب در مخزن سد باعث افزایش میزان انرژی برق‌آبی تولیدی می‌شود. با دریچه‌دار کردن سرریز می‌توان با کمترین تغییر در ارتفاع سد تراز آب در مخزن را افزایش داد. از طرفی دریچه‌دار کردن سرریز دبی در واحد عرض و امکان ایجاد کاویتاسیون را افزایش می‌دهد. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D ابتدا مدل عددی سرریز پلکانی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی واسنجی شده است. در ادامه باهدف افزایش تراز آب مخزن تغییراتی ازجمله افزایش تراز تاج سرریز پلکانی و تعبیه دریچه‌های قطاعی بر روی سرریز اعمال و شرایط جریان مطالعه گردیده است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی فشارهای ایجادشده و پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی دریچه‌دار است. با بررسی بازشدگی‌های مختلف دریچه‌ها مشخص گردید، با کاهش بازشدگی دریچه‌ها، فشار ایجادشده بر روی سرریز کاهش‌یافته و در کم‌ترین حالت بازشدگی (بازشدگی ۱۰٪)، فشار منفی بر روی پله اول کمتر از ۹- متر می‌شود. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده وجود پایه دریچه‌ها در مسیر جریان باعث ایجاد جداشدگی جریان در پله مجاور انتهای پایه شده و فشار منفی نیز در پله پائین‌دست آن مشاهده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در اثر دریچه‌دار کردن سرریز پلکانی پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در این نوع سرریز بخصوص در ناحیه زیر دریچه و بعد از پایه میانی افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی**

سرریز پلکانی دریچه‌دار، *Flow-3D*، کاویتاسیون، فشار منفی، مدل عدد

---

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر .

۲ . استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.

۳* . استاد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر. zarrati@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۴

**مقدمه**

سرریزهای پلکانی به جهت پتانسیل بالای استهلاک انرژی جریان، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. علاوه بر استهلاک انرژی در طول سرریز پلکانی، به دلیل کاهش سرعت و افزایش عمق، ریسک وقوع کاویتاسیون[1] نیز کاهش می‌یابد (چنسون[2]، ۱۹۹۴).

تابارا[3] و همکاران در سال ۲۰۰۵ از روش اجزای محدود[4] و نرم‌افزار ADINA برای مدل‌سازی عددی جریان روی سرریزهای پلکانی استفاده کرده‌اند. مطابق نتایج تابارا و همکاران بیان داشته‌اند که درصورتی‌که هد از مقدار هد طراحی سرریز فراتر رود نواحی با فشار منفی در مناطق مشخصی ایجاد می‌گردد که احتمال کاویتاسیون و لرزش[5] را افزایش می‌دهد. چنگ[6] و همکارانش در سال ۲۰۰۶ از نرم‌افزار فلوئنت[7] برای شبیه‌سازی سرریز پلکانی استفاده کرده‌اند. نتایج ایشان نشان می‌دهد مدل آشفتگی k-ε RNG نتایج بهتری نسبت به مدل k-ε استاندارد دارد. همچنین ایشان دریافتند که در طول سطح افقی پله، در ابتدا، با فاصله گرفتن از ابتدای پله، فشار کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابد و پس‌ازآن مجدد کاهش‌یافته تا درست قبل از نوک پله بعدی به حداقل خود برسد. در جهت قائم با افزایش فاصله از کف، فشار تا نوک پله‌ها کاهش می‌یابد. این تغییرات فشار با نتایج تابارا و همکارانش نیز همخوانی دارد. لسلیقتر[8] و همکاران در سال ۲۰۱۴ با ساخت مدل فیزیکی سد سوسو[9] در مالزی[10] به این نتیجه رسیدند که در مناطقی از پله فشارهای منفی رخ می‌دهد و فشار منفی ایجادشده ممکن است باعث وقوع پدیده کاویتاسیون گردد. کمترین فشار منفی ایجادشده در وسط پله با دبی‌های در واحد عرض ۱۵، ۲۵ و ۵۰ مترمربع بر ثانیه به ترتیب برابر ۴/۳۲-، ۵/۵۲- و ۹/۶- متر گزارش‌شده است. آماد ر[11] و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی به این نتیجه رسیدند که منطقه بحرانی شروع کاویتاسیون در سرریز پلکانی در وجه قائم پله و زیر نوک پله است. بر اساس نتایج سانچز و دلز[12] (۲۰۰۶) نوسانات فشار بر روی پله‌هایی که در منطقه کامل هوادهی شده قرار می‌گیرد کمتر از پله‌هایی است که در منطقه هوادهی نشده قرار می‌گیرند.

دریچه‌ها به‌عنوان سیستم‌های کنترل جریان باید به نحوی طراحی شوند که بتوانند در بازشدگی‌های مختلف عمل نمایند. بازشدگی پاره‌ای دریچه‌های سرریز ممکن است با عوارضی مانند نوسانات دریچه و ایجاد گرداب در بالادست همراه باشد. تحقیقات پیشین ازجمله مطالعات انجام‌شده توسط گسلر[13] (۲۰۰۵)، چنگ و همکارانش (۲۰۰۶)، نادری راد و تیموری[14] (۲۰۱۰)، سرفراز[15]و همکاران (۲۰۱۲)، چکیب[16] (۲۰۱۳) و والرو و بانگ[17] (۲۰۱۵) همگی بر روی مدل‌سازی عددی سرریز پلکانی بدون دریچه بوده و تاکنون هیچ تحقیقی در ارتباط با سرریز پلکانی دریچه‌دار انجام‌نشده است. مدل عددی ارائه‌شده در تحقیق حاضر بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود واسنجی و صحت سنجی شده و در ادامه طرح سرریز با دریچه به‌منظور افزایش تراز آب مخزن مورد ارزیابی قرارگرفته است. در طرح سرریز دریچه دار، تراز تاج سرریز به‌منظور ثابت نگه‌داشتن دبی در واحد عرض آن افزایش‌یافته و همچنین

[1] Cavitation
[2] Chanson
[3] Tabbara
[4] Finite Element Method
[5] Vibration
[6] Cheng
[7] Fluent
[8] Lesleighter
[9] Susu Dam
[10] Malaysia
[11] Amador
[12] Sánchez and Dolz
[13] Gessler
[14] Naderi and Teimouri
[15] Sarfaraz
[16] Chakib
[17] Valero and Bung

عرض سرریز کاهش‌یافته است. ثابت نگه‌داشتن دبی در واحد عرض به دلیل امکان مقایسه با سرریز بدون دریچه بوده است. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی در مورد سرریز پلکانی دریچه‌دار، مدل‌سازی عددی آن می‌تواند به شناخت ما در مورد هیدرولیک جریان در سرریز پلکانی و تأثیر پایه و دریچه‌های سرریز بر آن و همچنین پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در این‌گونه از سرریزها کمک کند.

## معرفی روش‌ها و ابزارهای استفاده‌شده و معادلات حاکم

در این تحقیق، با بررسی امکانات و توانایی‌ها و محدودیت‌های نرم‌افزارهای در دسترس، برای تهیه هندسه مرزهای جامد از نرم‌افزار کتیا[1] و برای حل معادلات حاکم بر جریان از نرم‌افزار Flow-3D استفاده‌شده است. روشی که نرم‌افزار Flow-3D بر آن متکی است به روش حجم محدود[2] مشهور است. معادلات حاکم بر حرکت سیال لزج (غیر ایده‌آل) در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده، موسوم به رینولدز(RANS)[3] بیان می‌شوند. ازآنجایی‌که جریان در سرریز همواره آشفته است، بنابراین در اینجا از معادلات رینولدز با مدل آشفتگی دومعادله‌ای برای حل جریان آشفته و محاسبه تنش‌های آشفتگی (تنش‌های رینولدز) در حوزه محاسباتی استفاده‌شده است. لازم به ذکر است که برای حل معادلات حاکم بر انتقال[4] و پخش[5] از روش آپ‌ویند مرتبه دوم[6] استفاده‌شده است (پاتانکار[7]، ۱۹۸۰).

معادلات پیوستگی (بقای جرم) و حرکت (مومنتم) به‌صورت زیر می‌باشند (ردی[8]، ۱۹۸۴):

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) \qquad (۲)$$

در معادلات فوق، $u_i$ لفه سرعت در جهت $x_i$، $P$ فشار کل، $\rho$ جرم مخصوص سیال، مؤلفه $g_i$ شتاب ثقل در جهت $x_i$ و $\tau_{ij}$ تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته با فرض لزجت گردابه‌ای بوزینسک به‌صورت معادله زیر بیان می‌شود (ردی[8]، ۱۹۸۴).

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + v_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \left[\frac{2}{3}\rho(k + v_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij}\right] \qquad (۳)$$

در معادلات فوق، $v_t$ لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی است که برخلاف لزجت مولکولی از خواص سیال نیست، بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متفاوت است. $\delta_{ij}$ و انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم ($k$) در معادله فوق به‌صورت زیر بیان می‌شود (ردی، ۱۹۸۴).

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \qquad (۴)$$

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u_i'}^2 + \overline{u_j'}^2 + \overline{u_k'}^2) \qquad (۵)$$

مدل‌های مختلفی برای محاسبه لزجت گردابه‌ای پیشنهادشده است. مطالعات انجام‌شده توسط چنگ و همکارانش (۲۰۰۶) نشان می‌دهد مدل آشفتگی k-ε RNG نتایج بهتری در شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی نسبت به مدل k-ε استاندارد به دست می‌آورد. در این تحقیق مدل آشفتگیk-ε RNG مورداستفاده قرارگرفته است. این مدل با استفاده از روش

[1] Catia
[2] Finite Volume Method
[3] Reynolds Averaged Navier Stokes
[4] Convection
[5] Diffusion
[6] Second Order Upwind (S.O.U)
[7] Patankar
[8] Rodi

RNG که یک ابزار آماری قوی است، از نرمال‌سازی معادلات ناویر استوکس استخراج شده و یک قالب اصلاح شده از مدل k-ε استاندارد است (فلوساینس[1]، ۲۰۰۸).

در مدل عددی از روش حجم سیال VOF برای به دست آوردن سطح آزاد استفاده‌شده است. این روش می‌تواند سطح آزاد را ردیابی کرده و شرایط مرزی مناسب را در آن سطوح اعمال کند. در تعیین سطح آزاد به روش VOF از یک تابع متغیر به نام F که جزء حجم سیال نامیده می‌شود، استفاده‌شده است. شکل این تابع دیفرانسیلی در حالت دوبعدی چنین است (فلوساینس، ۲۰۰۸).

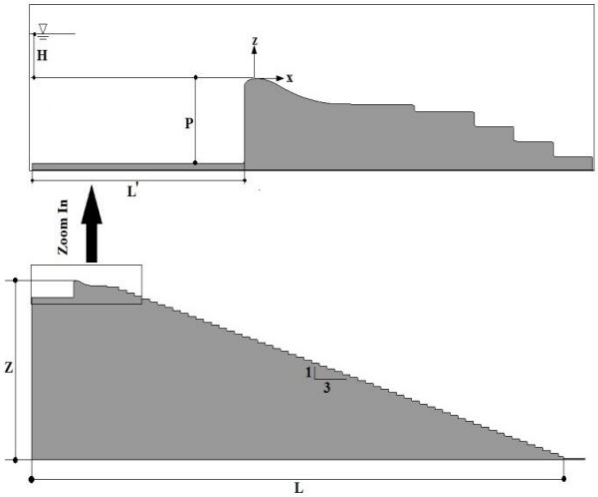
$$\frac{\partial F}{\partial t} + u\frac{\partial F}{\partial x} + v\frac{\partial F}{\partial y} = 0 \qquad (۶$$

در حل معادله فوق در سلولی که پر از سیال است، مقدارF برابر ۱ می‌باشد، ولی در سلول خالی از سیال این مقدار برابر 0 است. در سلول سطحی این مقدار بین 0 و 1 می‌باشد. به هنگام استفاده از معادلات ناویراستوکس و معادله VOF پارامترهای لزجت و جرم مخصوص سیال در هر سلول طبق روابط زیر معین می‌گردد که در سلول‌های سطحی ترکیب دو فاز سیال در چگالی و لزجت هر سلول دیده می‌شود (فلوساینس، ۲۰۰۸).

$$\rho = \sum_{i=1}^{n} F_i\rho_i \qquad \mu = \sum_{i=1}^{n} F_i\mu_i \qquad (۷$$

## صحت سنجی مدل عددی

در این تحقیق از اطلاعات مدل آزمایشگاهی یک سرریز پلکانی که مطالعات آن در موسسه تحقیقات آب انجام‌شده برای صحت سنجی مدل عددی استفاده‌شده است (موسسه تحقیقات آب[2]، ۲۰۰۶). مدل فیزیکی این سرریز با مقیاس ۱:۱۵ ساخته‌شده است. مطابق شکل (۱) این سرریز شامل کانال تقرب ورودی، سرریز اوجی و سرریز پلکانی می‌باشد. در این شکل $P$، $L'$، $L$ و Z به ترتیب ارتفاع سرریز، طول کانال تقرب، طول سرریز از ابتدای کانال تقرب تا انتهای سرریز پلکانی و فاصله قائم تاج سرریز تا انتهای پله آخر و مقدار آن‌ها به ترتیب برابر ۴، ۱۱/۶، ۱۳۳/۳ و ۴۲/۶۵ متر است. همچنین $H$ هد جریان در ورودی کانال تقرب نسبت به مبدأ مختصات (تاج سرریز) و عرض سرریز (B) برابر ۲۰ متر و شیب سرریز پلکانی ۱:۳ می‌باشد. ارتفاع پله ($h$) و طول افقی ($L_s$) پله اول برابر ۰/۳۳ و ۳/۲ متر و برای سایر پله‌ها برابر ۰/۷ و ۲/۱ متر است.



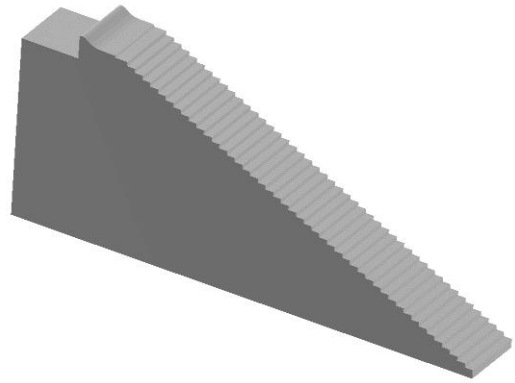

**شکل (۱): شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی سرریز پلکانی**

منحنی تاج سرریز از نوع اوجی به‌صورت معادله زیر است (موسسه تحقیقات آب، ۲۰۰۶):

$$y = -0.0228 \times x^{1.85} \qquad (۸$$

مدل عددی سرریز با مقیاس ۱:۱ در نرم‌افزار Flow-3D ساخته شد که این خود از برتری‌های مدل‌سازی عددی نسبت به مدل‌سازی فیزیکی با توجه به امکان حذف خطاهای ناشی از مقیاس مدل می‌باشد. در شکل (۲) هندسه واردشده به نرم‌افزار Flow-3D نشان داده‌شده است. به‌منظور کاهش زمان محاسبات فقط یک نوار به عرض یک متر از سرریز مدل شده است. فرض یک جریان دوبعدی به‌صورت یک نوار از کل مسیر سرریز با توجه به نبود جریان‌های عرضی فرض، قابل قبولی می‌باشد.

[1] Flow Science
[2] Water. Res. Institute

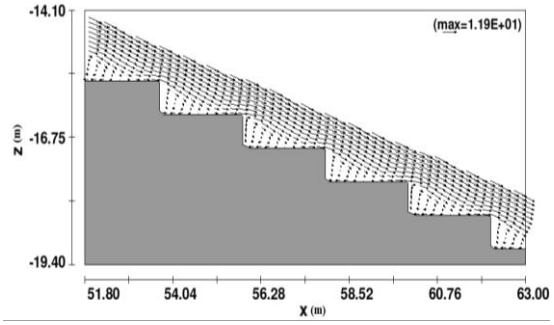


**شکل (۲): هندسه سه‌بعدی طرح سرریز موجود**

در ورودی شرط مرزی، فشار مخصوص[۱] لحاظ شده که به معنی مشخص کردن تراز سیال در ورودی است یا به عبارتی تراز آب در مخزن ثابت‌شده و بنابراین مدل، دبی جریان را با توجه به آن هد به دست می‌آید. شرط مرزی دیواره برای کف این بلوک استفاده‌شده است. همچنین در انتهای پایین‌دست شرط مرزی خروجی جریان[۲] که در این مرز گرادیان تمامی متغیرها (به‌استثنای فشار) در راستای جریان صفر می‌باشد، استفاده‌شده است. فشار در پایین‌دست ثابت و برابر فشار اتمسفر فرض شده است. برای سطح آزاد بالای سرریز (در منطقه هوا)، شرط مرزی فشار مخصوص برابر صفر اعمال‌شده است. مطابق با شرط مرزی فشار مخصوص هد کل جریان برابر عمق بوده و فشار به‌صورت هیدرو استاتیک لحاظ می‌شود. همچنین برای مرزهای کناری از شرط مرزی تقارن استفاده‌شده است زیرا که در این بخش سرریز به‌صورت یک مدل نواری شبیه‌سازی‌شده است. شرط اولیه استفاده‌شده بدین‌صورت است که کل فضای ساخته‌شده در مدل عددی در شروع برنامه پر از آب بوده و به دلیل درنظر گرفتن شرط مرزی خروجی در انتهای مدل، آب اضافی از انتهای سرریز خارج می‌شود.

حساسیت مدل‌های عددی به ابعاد شبکه‌بندی، همواره یکی از مسائل مهم در مدل‌های عددی بوده است. در همین زمینه الگوهای شبکه‌بندی مختلفی بررسی گردیده است تا یک شبکه‌بندی مناسب حاصل شود. به‌منظور حساسیت سنجی مدل نسبت به شبکه ۳ حالت برای شبکه‌بندی مدل درنظر گرفته‌شده است. اندازه سلول‌ها در راستای X (راستای طولی)، Z (راستای ارتفاعی) و Y (راستای عرضی) به ترتیب برای حالت اول برابر ۱۰، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، برای حالت دوم برابر ۲۰، ۶ و ۴۰ سانتی‌متر و برای حالت سوم برابر ۲۰، ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. با توجه به اینکه منحنی دبی-اشل به‌دست‌آمده در هر ۳ حالت کمتر از ۰/۳۵ درصد باهم اختلاف دارند و حالت سوم دارای شبکه درشت‌تری نسبت به دو حالت دیگر است، لذا حالت سوم به‌عنوان حالت منتخب درنظر گرفته شد که این شبکه نیز مجموعاً شامل ۷۳۶۰۰۰ سلول محاسباتی و زمان اجرای این مدل‌ها با تعداد سلول‌های محاسباتی ذکرشده و سیستم کامپیوتر ۴ هسته‌ای با پردازنده ۳/۴ گیگاهرتز حدوداً بین ۷۲ تا ۹۶ ساعت طول می‌کشد.

برای مدل عددی سه هد آب (H) ۱/۶، ۲/۳ و ۲/۹ متر موردبررسی قرارگرفته است. مطابق نتایج آزمایشگاهی به ازای دبی‌های بیش از ۲۵ مترمکعب بر ثانیه، جریان رویه‌ای به‌جای ریزشی بر روی سرریز ایجاد می‌شود (کلیه نتایج مدل آزمایشگاهی در مقیاس نمونه‌ی واقعی ارائه‌شده است) (مرکز تحقیقات آب، ۲۰۰۶). شکل (۳) نشان می‌دهد، مدل عددی به‌خوبی توانسته جریان رویه‌ای در سرریز پلکانی را شبیه‌سازی کند.




**شکل (۳): جهت بردارهای سرعت در مدل عددی در پله‌های میانی**

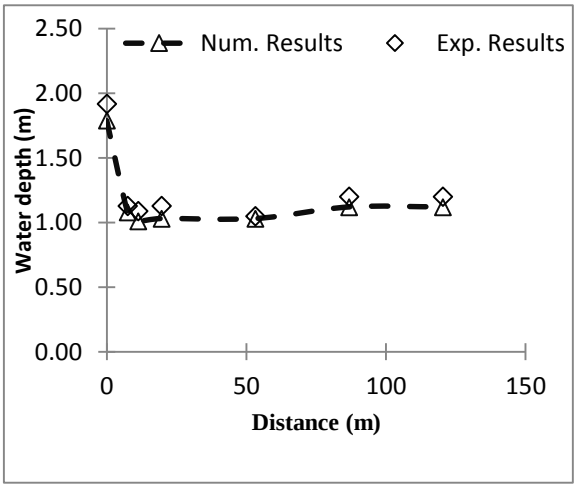
[۱] Specific pressure

[2] Outflow

**برای H=۲/۳m و Q=۱۴۹/۵۴m³/s**

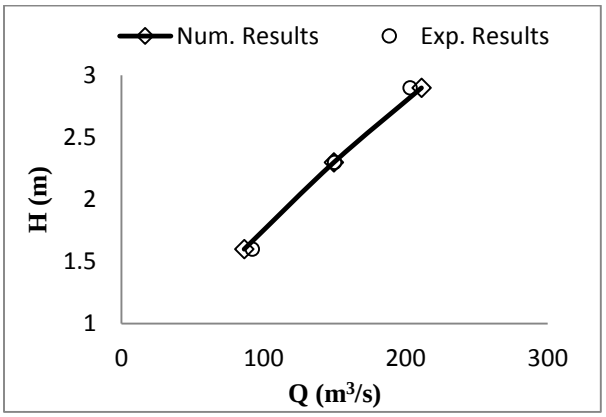
کمترین فشار منفی محاسبه‌شده با درنظر گرفتن H= ۲/۳متر برابر ۱/۸۵- متر ستون آب در نوک پله‌ها می‌باشد. فشار منفی در تمامی پله‌ها در نوک پله ایجادشده که با نتایج ارائه‌شده در تابارا و همکاران (۲۰۰۵) و چنگ و همکارانش (۲۰۰۶) مطابقت دارد. این شرایط در H=۱/۶m و H=۲/۹ متر نیز مشاهده می‌شود.

شکل (۴) عمق جریان (اختلاف رقوم آب و کف بستر) به‌دست‌آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی را در طول سرریز و در وسط پله برای H= ۲/۳mرا نشان می‌دهد که تطابق خوبی باهم دارند. حداکثر خطا در محاسبه عمق جریان حدود ۹ درصد است. مطابق شکل ۴ عمق به‌دست‌آمده از مدل عددی کمتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. البته باید توجه داشت که اندازه‌گیری روی پلکان با تلاطم آب نیز با خطا توأم بوده و به دلیل وجود هوا ممکن است بیش از مقدار به دست آید. لازم به ذکر است نتایج مدل عددی در محاسبه عمق جریان برای هد آب ۱/۶ و ۲/۹ متر، دارای متوسط خطا کمتری نسبت به هد آب ۲/۳ متر می‌باشند.



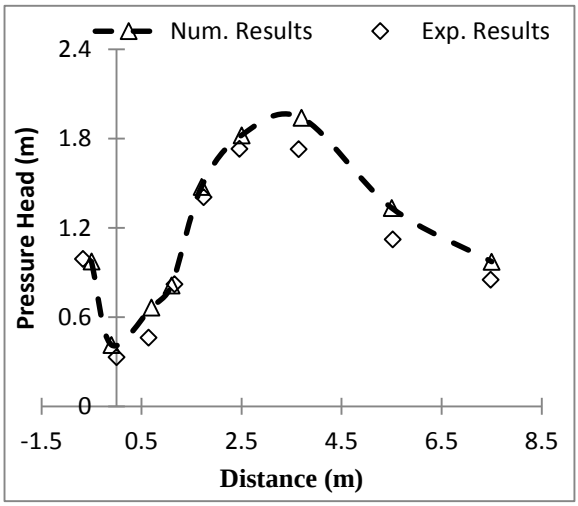

**شکل (۴): مقایسه عمق جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی برای H= ۲/۳m وQ=۱۴۹/۵۴m³/s**

منحنی دبی-اشل سرریز در شکل (۵) آمده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود به ازای اعماق مختلف آب در مخزن، دبی عبوری از سرریز در مدل عددی به‌خوبی محاسبه‌شده است. مقادیر خطا برای سه هد آب ۶/۱، ۳/۲ و ۹/۲ متر به ترتیب برابر ۴، ۰,۳ و ۱۴/۶ درصد می‌باشد.

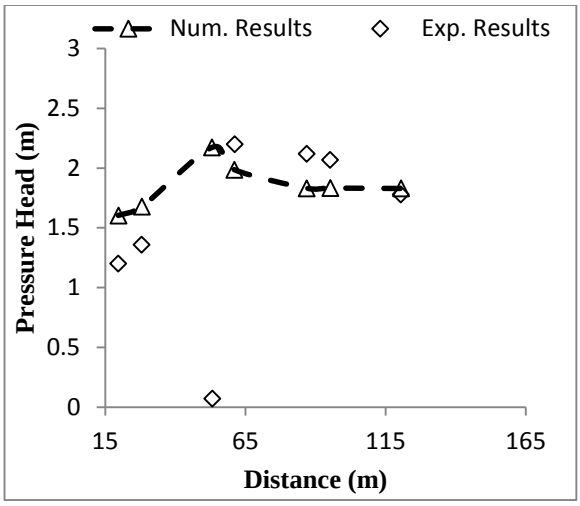



**شکل (۵): مقایسه منحنی دبی-اشل سرریز بین مدل عددی و آزمایشگاهی**

به‌منظور صحت سنجی مقدار فشار بر روی سرریز، نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل (۶) و شکل (۷) به ترتیب برای اوجی و وسط کف افقی پله آمده است.




**شکل (۶): مقایسه فشار بر روی سرریز اوجی بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای H= ۲/۳m وQ=۱۴۹/۵۴m³/s**




**شکل (۷): مقایسه فشار بر روی سرریز پلکانی بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای H= ۲/۳m و Q=۱۴۹/۵۴m³/s**

مطابق شکل ۷ تنها در یک نقطه تفاوت فاحشی بین مدل عددی و آزمایشگاهی رؤیت شده (X=53.2) که به نظر می‌رسد خطایی در اندازه‌گیری فشار در این نقطه در مدل فیزیکی رخ‌داده است، زیرا در این نقطه فشار به‌طور ناگهانی افت می‌کند و با روند مشاهده‌شده در سایر نقاط همخوانی ندارد. آن‌گونه که دیده می‌شود نتایج مدل عددی تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین مدل عددی در محاسبه فشار بر روی قسمت پلکانی با جریان چرخشی دارای خطای بیشتری نسبت به قسمت اوجی است (نقطه صفر مختصات بر روی تاج سرریز قرار دارد). لازم به ذکر است نتایج مدل عددی در محاسبه فشار برای هد آب ۱/۶ و ۲/۹ متر دارای متوسط خطا کمتری نسبت به هد آب ۲/۳ متر می‌باشند.

## مدل سرریز پلکانی با دریچه

با توجه به عدم بررسی سرریز پلکانی دریچه‌دار در تحقیقات پیشین، در این تحقیق هدف مطالعه شرایط جریان بر روی سرریز پلکانی دریچه دار است. بدین منظور تغییراتی بر روی سرریز پلکانی بدون دریچه که در بخش صحت سنجی موردبررسی قرارگرفته ایجادشده است. برای دریچه دار کردن سرریز مطالعه شده با فرض ثابت درنظر گرفتن ارتفاع سد و دبی در واحد عرض، با توجه به افزایش تراز نرمال سطح آب در مخزن تراز تاج سرریز افزایش و عرض آن کمی کاهش یافت. با استفاده از روابط تئوری موجود تغییرات ایجادشده در سرریز پلکانی دریچه‌دار مطابق بندهای زیر اعمال‌شده است (شکل ۸):

۱. تاج سرریز ۴/۲ متر نسبت به حالت اولیه بالاآمده است.
۲. منحنی تاج سرریز از نوع اوجی دریچه‌دار بر اساس استاندارد .U.S.B.R به‌صورت معادله ذیل تعیین گردیده است:

$$y = -0.07143 \times x^2 \quad (۹$$

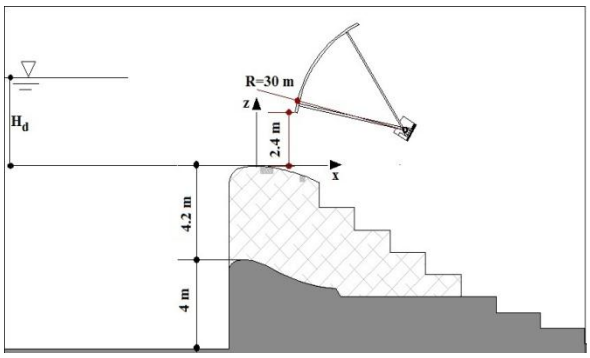
۳. طول مؤثر تاج سرریز از ۲۰ متر به ۱۳/۰ متر کاهش‌یافته و دیواره دریچه به ۱۵ متر افزایش‌یافته است.
۴. مشخصات پله‌های تندآب سرریز به شرح زیر است:

پله اول: دارای ارتفاع ریزش ۱/۱۲ متر و طول پله ۱/۷ متر

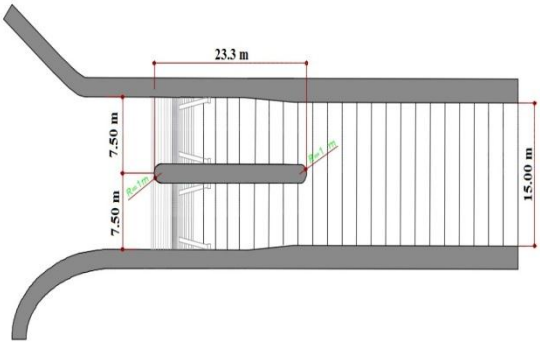
پله دوم، سوم، چهارم و پنجم: دارای ارتفاع ریزش ۱/۰ متر و طول پله ۱/۷ متر

پله ششم به بعد: دارای ارتفاع ریزش ۰/۷ متر و طول پله ۲/۱ متر

لازم به ذکر است که مبدأ مختصات مطابق شکل (۸-الف) در تاج سرریز با تراز جدید درنظر گرفته‌شده است و تمامی اطلاعات نسبت به مبدأ جدید ارائه‌شده است. در طرح جدید دبی عبوری در بازشدگی‌های مختلف دریچه و همچنین احتمال ایجاد فشارهای منفی خیلی کم و کاویتاسیون مورد سؤال می‌باشد. در این شبیه‌سازی باوجود پایه دریچه در داخل آب لازم است مدل بجای نواری به‌صورت ۳ بعدی ساخته شود.




الف)

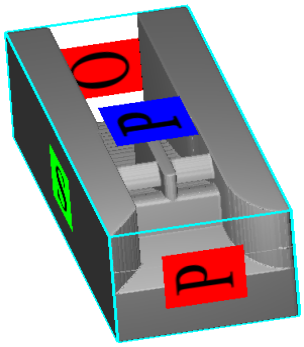



ب)

**شکل (۸): سرریز پلکانی دریچه‌دار: الف) پروفیل عرضی سرریز ب) پلان سرریز**

برای شبکه‌بندی میدان حل از یک بلوک شبکه‌بندی یکنواخت استفاده‌شده است. این بلوک از ۱۷/۷۵ متر بالادست تاج سرریز در داخل مخزن شروع و نهایتاً به ۵۱/۶۲ متر پایین‌دست آن یعنی تا محدوده انتهای پله ۲۴ شبیه‌سازی‌شده است. می‌توان فرض کرد از پله ۲۴ جریان به یک حالت تعادل رسیده و الگوی جریان روی پله‌ها تکرار می‌شود. انتخاب محدوده بالادست با فرض عدم تأثیرپذیری منحنی دبی- اشل در خارج از این محدوده است.

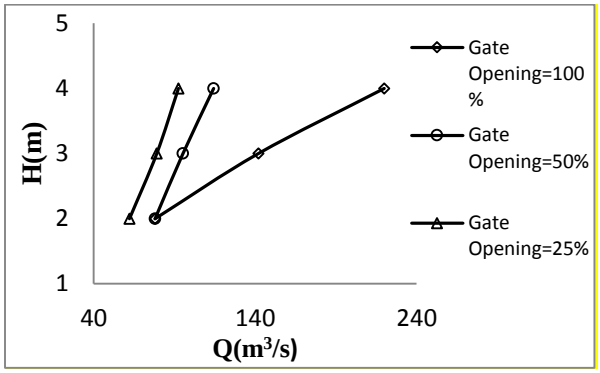
اندازه شبکه‌های بلوک در راستای X (راستای طولی)، Z (راستای ارتفاعی) و Y (راستای عرضی) در زمان بازشدگی کامل دریچه‌ها به ترتیب برابر ۳۴، ۱۳ و ۳۸ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شده است. این شبکه مجموعاً شامل ۲۶۲۵۰۰۰ سلول محاسباتی و زمان اجرای این مدل‌ها با تعداد سلول‌های محاسباتی ذکرشده و سیستم کامپیوتر ۴ هسته‌ای با پردازنده ۳/۴ گیگاهرتز حدوداً بین ۴۸ تا ۱۹۲ ساعت با توجه به بازشدگی دریچه می‌باشد. هر چه بازشدگی دریچه کمتر باشد زمان بیشتری برای پایدار شدن جریان نیاز است. برای سرریز با بازشدگی دریچه برابر ۱۰ درصد به دلیل عمق کمتر جریان در زیر دریچه، از شبکه ریزتری در راستای Z استفاده‌شده است به‌طوری‌که اندازه شبکه‌های بلوک در راستای X (راستای طولی)، Z (راستای ارتفاعی) و Y (راستای عرضی) به ترتیب برابر ۲۹، ۷ و ۳۲ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شده است. این شبکه مجموعاً شامل ۶۴۳۵۰۰۰ سلول محاسباتی و زمان اجرای این مدل‌ها با تعداد سلول‌های محاسباتی ذکرشده و سیستم کامپیوتر ۴ هسته‌ای با پردازنده ۳/۴ گیگاهرتز حدود ۱۹۲ ساعت است. شرایط مرزی اعمال‌شده در این حالت کاملاً مشابه بخش صحت سنجی مدل عددی می‌باشد (شکل ۹).




**شکل (۹): هندسه سه‌بعدی سرریز پلکانی دریچه‌دار شرایط مرزی اعمال‌شده به مدل از نمای بالادست**

در شرایط سرریز دریچه‌دار، سه هد آب ($H_d$) ۴، ۳ و ۲ متر درنظر گرفته‌شده است. بازشدگی‌های دریچه‌ها ۱۰۰٪، ۵۰٪، ۲۵٪ و ۱۰٪ بر روی سرریز اعمال و شرایط جریان و دبی عبوری توسط مدل عددی محاسبه‌شده است. شکل (۱۰)

منحنی دبی- اشل سرریز جدید را نشان می‌دهد. حداکثر دبی عبوری از سرریز در مدل عددی ۲۲۰ مترمکعب در ثانیه است که تقریباً برابر دبی طراحی (همان سرریز بدون دریچه، بررسی‌شده در مرحله صحت سنجی) است؛ بنابراین تراز تاج و عرض سرریز مورد تائید می‌باشد.




**شکل (۱۰) منحنی دبی- اشل سرریز جدید**

نتایج به‌دست‌آمده برای سرریز دریچه دار شامل دو حالت بحرانی الف) بیشترین هد آب یعنی $H_d$=۴m متر و بازشدگی دریچه‌ها برابر ۱۰۰٪ ب) بیشترین هد آب یعنی $H_d$=۴m متر و بازشدگی دریچه‌ها برابر ۱۰٪ است. دلایل انتخاب این دو حالت عبارت‌اند از:

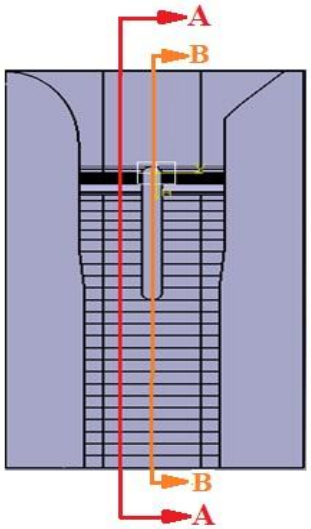
۱) در حالت ۱۰۰٪ بازشدگی باید حداکثر دبی طراحی سرریز حاصل شود و فشارهای منفی نیز کنترل شود. مطابق نتایج تابارا و همکارانش در صورتی با افزایش هد نواحی با فشار منفی در مکان‌های مشخصی ایجاد گردد احتمال کاویتاسیون و لرزش[1] افزایش می‌یابد (تابارا و همکاران (۲۰۰۵)).

۲) در حالت ۱۰۰٪ بازشدگی باید بررسی شود که آب از روی پله‌ها الگوی جریان مناسبی داشته و پرشی نداشته باشد.

۳) در حالت ۱۰٪ بازشدگی با توجه به تنگ‌شدگی زیاد در زیر دریچه امکان ایجاد جت و پرش آب از روی پله‌های ابتدایی وجود داشته که این شرایط باید بررسی گردد.

۴) در حالت ۱۰٪ بازشدگی، با توجه به تنگ‌شدگی در زیر دریچه و افزایش سرعت، امکان ایجاد فشار منفی و پدیده کاویتاسیون در این ناحیه وجود دارد.

مطابق شکل (۱۱)، مقطع میانی سرریز (مقطع A-A) و مقطع واقع در وسط پایه و دیواره سرریز (مقطع B-B) در قسمت نتایج موردبررسی قرارگرفته‌اند.




**شکل (۱۱): مقاطع بررسی‌شده در قسمت نتایج**

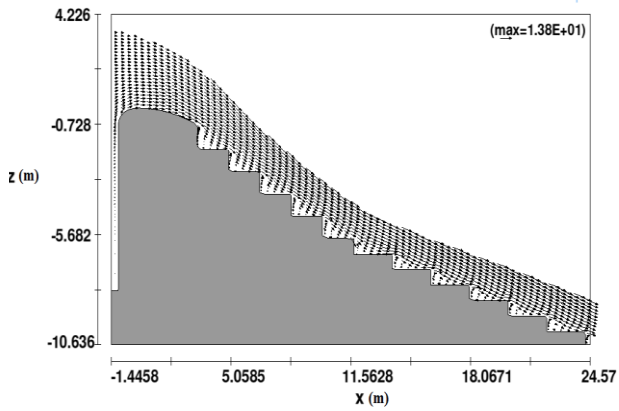
الف) $H_d$=۴m و بازشدگی‌های دریچه‌ها برابر ۱۰۰٪:

مطابق شکل (۱۲) جریان آب به‌صورت جریان رویه‌ای به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید یعنی جریان بر روی لبه خارجی پله‌ها می‌لغزد و بر روی بستری از جریان‌های چرخشی که در بین پله‌ها محبوس شده‌اند قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل تغییر شیب ایجادشده پس از پله ششم جریان با برخورد به پله ششم به سمت پله پایین‌تر منحرف‌شده و باعث ایجاد فرورفتگی در سطح آب می‌شود.

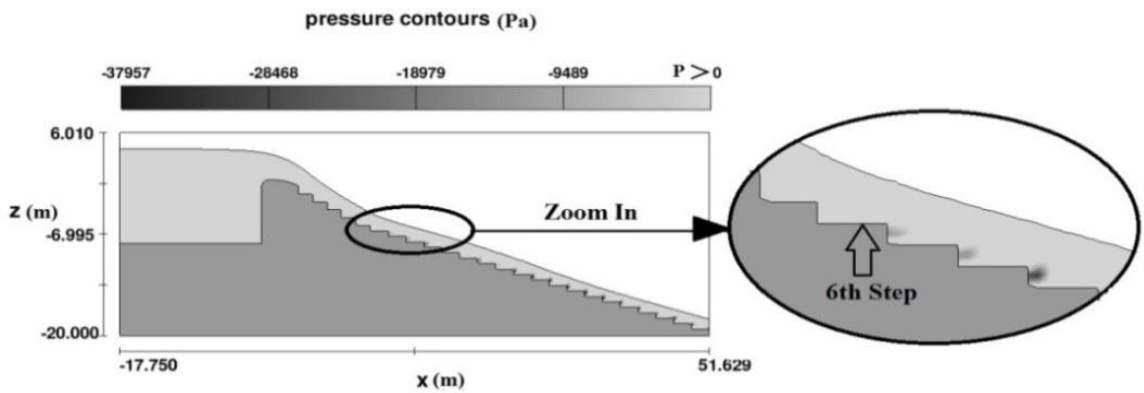
شکل (۱۳) خطوط هم‌تراز فشار فقط برای ناحیه با فشار منفی را بر روی سرریز نشان می‌دهد. کمترین فشار منفی در مقطع B-B حدوداً برابر ۳/۸۶- متر بوده و فشارهای منفی در طول سرریز در نوک پله‌ها ایجادشده است که این میزان فشار منفی

[1] Vibration

بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده در سرریز بدون دریچه می‌باشد. در مقطع B-B فشارهای منفی مشابه سرریز بدون دریچه از پله ششم به بعد ایجادشده است.

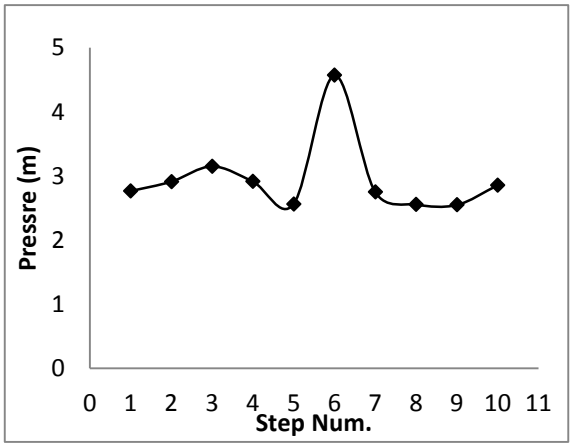



**شکل (۱۲): الگوی کلی جریان روی سرریز در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع B-B**



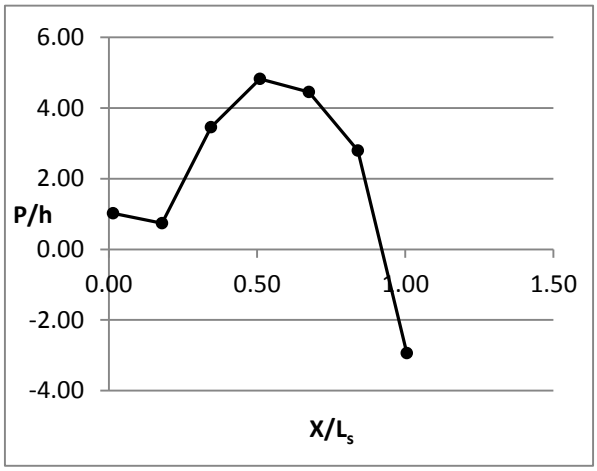

**شکل (۱۳): فشارهای منفی محاسبه‌شده در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع B-B**

شکل (۱۴) توزیع فشار در قسمت وسط سطح افقی پله‌های اول تا دهم را نشان می‌دهد. برخورد جریان به کف پله ششم باعث افزایش ناگهانی فشار در آن نسبت به پله‌های مجاور آن می‌گردد.




**شکل (۱۴): توزیع فشار در قسمت وسط سطح افقی پله‌های اول تا دهم سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع B-B**

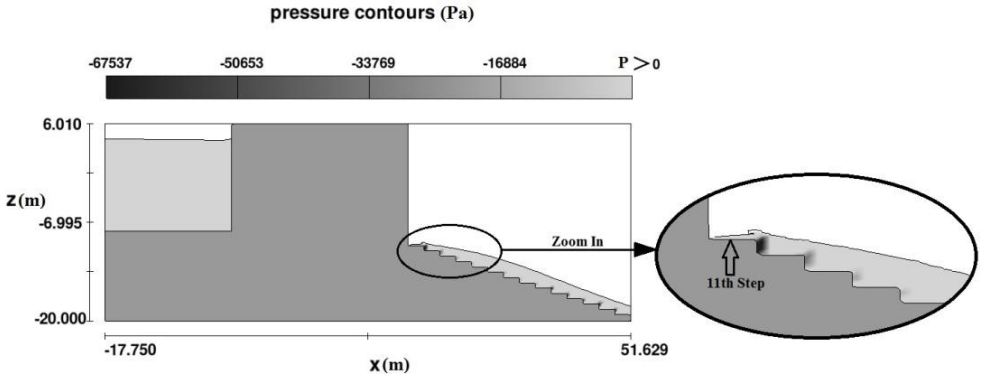
شکل (۱۵) توزیع فشار بر روی قسمت افقی پله چهاردهم را نشان می‌دهد. علت انتخاب پله چهاردهم این است که این پله به‌اندازه کافی از انتهای پایه دور بوده و روند توزیع فشار بر روی پله‌های پایین‌تر تقریباً یکسان است. در این شکل h ارتفاع پله و Ls طول پله چهاردهم می‌باشند.




**شکل (۱۵): توزیع فشار سطح افقی پله چهاردهم در سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع B-B**

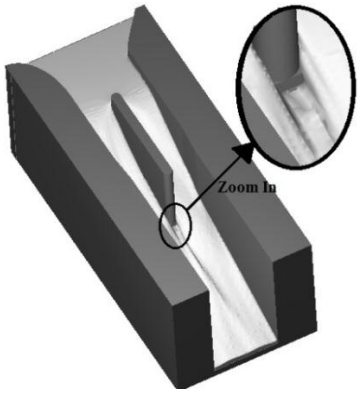
مطابق این شکل در طول سطح افقی پله، در ابتدا، با فاصله گرفتن از گوشه پله، فشار کاهش می‌یابد و سپس افزایش‌یافته در اواسط پله به مقدار حداکثر برسد و رفته‌رفته با فاصله گرفتن از وسط پله فشار کاهش‌یافته و در نوک پله فشار منفی ایجاد می‌شود. در جهت قائم با افزایش فاصله از کف، فشار کاهش می‌یابد. این تغییرات فشار با نتایج تابارا و همکاران (۲۰۰۵) و چنگ و همکارانش (۲۰۰۶) همخوانی دارد.

شکل (۱۶) نشان می‌دهد که فشارهای منفی در مقطع A-A در نوک پله یازدهم یعنی پله پائین‌دست محل انتهای پایه دریچه ایجادشده است.




**شکل (۱۶): فشارهای منفی محاسبه‌شده در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع A-A**

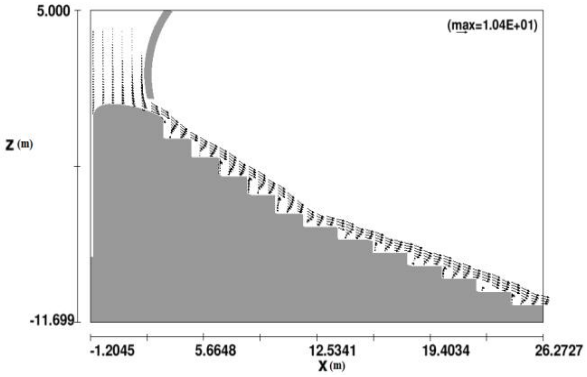
بررسی شکل (۱۶) و (۱۷) مشخص می‌کند تمام شدن پایه در انتهای پله دهم باعث ایجاد جدایش جریان بر روی پله یازدهم شده است. دقت شود فشار بر روی پله یازدهم مثبت است. حداقل فشار منفی به‌دست‌آمده در مقطع A-A در نوک پله یازدهم (در ناحیه مشخص‌شده در شکل (۱۷)) رخ‌داده و مقدار آن حدوداً برابر ۶/۸۸- متر ستون آب می‌باشد که نسبت به حداقل فشار منفی در سرریز بدون دریچه ۳/۵ برابر کاهش نشان می‌دهد و می‌تواند به دلیل وجود اثرات انتهای پایه دریچه باشد. نواحی فشار منفی ایجادشده در این حالت نیز مشابه سرریز بدون دریچه در نوک پله‌ها ایجاد می‌شود.




**شکل (۱۷): نمایش جداشدگی جریان بعد از پایه در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰۰٪ و در مقطع A-A**

ب) $H_d$=۴m و بازشدگی‌های دریچه‌ها برابر ۱۰٪:

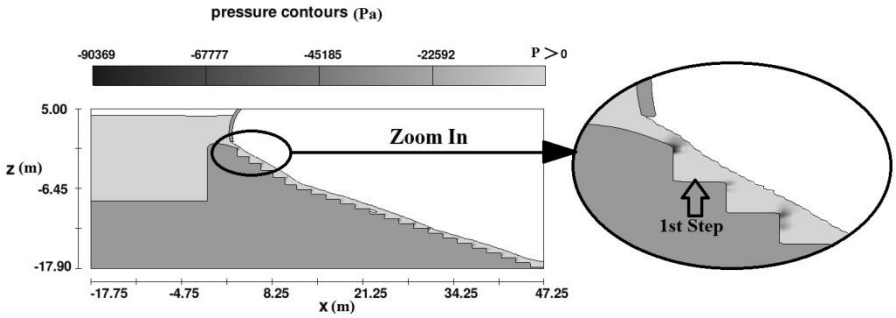
مطابق شکل (۱۸) جریان آب پس از عبور از زیر دریچه به‌صورت جریان رویه‌ای به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. دبی به‌دست‌آمده در این حالت برابر ۵۳/۸ مترمکعب در ثانیه بوده و ایجاد جریان رویه‌ای با توجه به اطلاعات آزمایشگاهی سرریز موجود منطقی می‌باشد. با توجه به اینکه بازشدگی دریچه‌ها در این حالت بسیار کم است، درنتیجه سرعت جریان بعد از دریچه نسبت به حالت ۱۰۰ درصد بازشدگی افزایش‌یافته و باعث می‌شود بردارها با سرعت بیشتری نسبت به حالتی که دریچه‌ها ۱۰۰٪ باز بودند به سمت نوک پله منحرف گردند.




**شکل (۱۸): الگوی کلی جریان روی سرریز در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰٪ و در مقطع B-B**

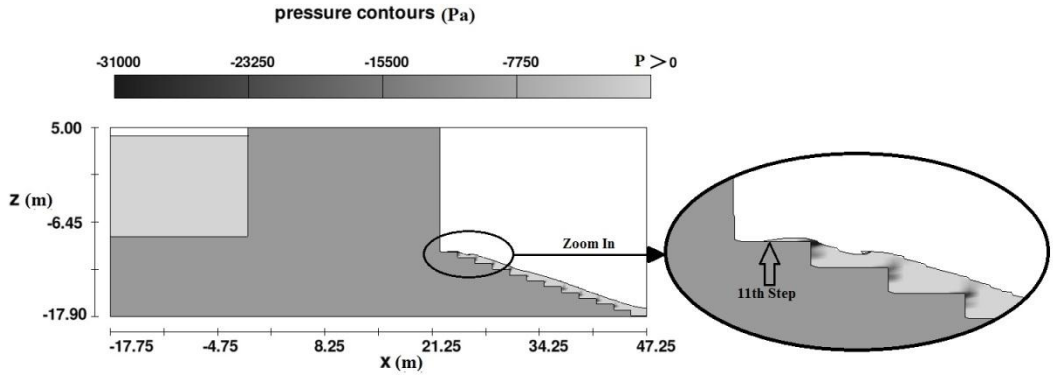
در شکل (۱۹) منحنی هم‌تراز فشار فقط برای ناحیه با فشار منفی ترسیم‌شده است. مطابق این شکل فشار منفی در مقطع B-B از پله اول مشاهده می‌شود درحالی‌که در حالت ۱۰۰ درصد بازشدگی فشار منفی در این مقطع از نوک پله ششم به بعد ایجادشده است.

واضح است که با کاهش بازشدگی دریچه‌ها سرعت جریان پس از عبور از زیر دریچه افزایش می‌یابد و با توجه به رابطه عکس فشار و سرعت، فشار به‌صورت ناگهانی در این ناحیه کاهش می‌یابد. همچنین ورود جریان سریع به اولین پله سرریز باعث ایجاد بیشترین فشار منفی در طول سرریز بر روی پله اول شده که فشار ایجادشده در آن برابر ۹/۲- متر ستون آب است؛ بنابراین امکان بروز پدیده کاویتاسیون در این ناحیه نسبت به نواحی دیگر بیشتر می‌باشد.




**شکل (۱۹): فشارهای منفی محاسبه‌شده در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰٪ و در مقطع A-A**

در شکل (۲۰) توزیع فشار در مقطع A-A نشان داده‌شده است. در این مقطع نیز جدایشی مشابه شکل (۱۷) در انتهای دیوار دریچه و فشار منفی در نوک پله یازدهم در مقطع A-A مشاهده می‌شود. کمترین فشار منفی ایجادشده نیز در مقطع A-A در نوک پله یازدهم (ناحیه مشخص‌شده در شکل (۲۰)) بوده و مقدار آن برابر ۳/۱۶- متر ستون آب است. در بازشدگی ۱۰٪ با توجه به کم‌عمق بودن جریان یک هسته هوا در زیر جریان بر روی پله دهم ایجادشده (شکل (۱۷) و شکل (۲۰)) و این هسته در سرتاسر عرض پله وجود دارد اما در بازشدگی ۱۰۰٪ هسته هوا در عرض پله ادامه نمی‌یابد.




**شکل (۲۰): فشارهای منفی محاسبه‌شده در مدل سه‌بعدی سرریز دریچه‌دار با $H_d$=۴m و بازشدگی دریچه ۱۰٪ و مقطع A-A**

## نتیجه‌گیری

هدف از انجام تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی سرریز پلکانی دریچه‌دار و بررسی فشار منفی و پتانسیل وقوع پدیده کاویتاسیون در آن می‌باشد. در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی سرریز پلکانی واسنجی و صحت سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین خطای ایجادشده در مدل عددی برای پارامترهای عمق جریان و دبی به ترتیب برابر ۸/۸۹ و ۶/۱۴ درصد است. همچنین با مقایسه منحنی دبی- اشل و تغییرات فشار در طول سرریز بین مدل عددی و آزمایشگاهی مشخص گردید مدل عددی دارای دقت کافی می‌باشد. در مرحله بعدی سرریز پلکانی بدون دریچه که در بخش صحت سنجی موردبررسی قرارگرفته با حفظ دبی در واحد عرض دریچه‌دارشده و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهند:

۱. انتهای پایه دریچه باعث ایجاد جدایش جریان می‌شود و در پایین‌دست آن نیز فشار منفی مشاهده می‌گردد. در حالت ۱۰٪ بازشدگی دریچه‌ها، با توجه به کم‌عمق بودن لایه جریان، یک هسته مرکزی از هوا در پله ایجادشده که این هسته در سرتاسر عرض سرریز وجود دارد، اما در حالت ۱۰۰٪ بازشدگی دریچه‌ها هسته هوا تنها در ناحیه نزدیک به پایه اتفاق می‌افتد. این پدیده‌ها باعث ایجاد بیشترین فشار منفی در وسط مقطع عرضی سرریز (مقطع A-A) می‌شود.

۲. در بازشدگی کم دریچه‌ها به دلیل افزایش سرعت و همچنین ورود جریان پرسرعت به اولین پله سرریز فشار منفی زیادی در تمامی عرض پله اول ایجاد می‌شود به‌طوری‌که در بازشدگی ۱۰٪ فشار منفی در این ناحیه کمتر از ۹/۲- متر ستون آب است که به معنی امکان وقوع کاویتاسیون می‌باشد. یک راه‌حل این مشکل تغییر هندسه چند پله اول سرریز است.

## سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران برای حمایت از انجام این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## مراجع


Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2009). Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 135(12), 1092-1100. DOI: 10.1061/ASCE HY.1943-7900.0000118

Chanson, H. (1994). "Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes." Journal of Hydraulic Research, 32(2).

Chakib, B. (2013). Numerical computation of inception point location for flat-sloped stepped spillway. International Journal of Hydraulic Engineering, 2(3), 47-52.

Cheng, X. Chen, Y.& Luo, L. (2006). Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways. Science in China Series E: Technological Sciences, 49(6), 674-684. DOI: 10.1007/s10288-006-2029-2

Flow Science, Incorporated, (2008), *"FLOW-3D Users Manual Version 9.3"*, Santa Fe, New Mexico

Gessler, D. (2005). "CFD modeling of spillway performance", EWRI 2005: Impacts of global climate change. In Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, 15–19 May 2005. Edited by R. Walton. American Society of Civil Engineers, Reston, Va.

Lesleighter, E. J., Tullis, B. P., & Andrews, D. (2014). Stepped spillway model pressures characteristics, Susu Dam Malaysia. In 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (pp. 1-9). The University of Queensland. DOI: 10.14264/uql.2014.20

Patankar, S.V., (1980). "Numerical heat transfer and fluid flow", Taylor & Francis Group.

Naderi Rad, I., & Teimouri, M. (2010). An investigation of flow energy dissipation in simple stepped spillways by numerical model. European Journal of Scientific Research, 47(4), 544-553.

Rodi, W., (1984). "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics—A State of the Art Review, presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics", Experimental and Mathematical Fluid Dynamics.

Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2005). Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure easurements. Journal of Hydraulic Research, 43(5), 540-548. DOI: 10.1080/00221680509500152.

Sarfaraz, M., Attari, J., & Pfister, M. (2012). Numerical Computation of Inception Point Location for Steeply Sloping Stepped Spillways. 9th International Congress on Civil Engineering, May 8-10, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

Tabbara, M., Chatila, J., and Awwad, R. (2005). "Computational simulation of flow over stepped spillways." Computers and Structures, 83(27), 2215–2224. doi:10.1016/j.compstruc.2005.04.005

Valero, D., & Bung, D. B. (2015, June). Hybrid investigation of air transport processes in moderately sloped stepped spillway flows. In E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress (Vol. 28).

Water. Res. Center. (2006)"Final report on: Hydraulic model of Flood Outlet System of Siah-Bishe Pumped Storage Project" Project Code: C8230, Tehran, Iran.