

اثر منحرف کننده‌ی جریان و هوادهی بر ضریب تخلیه مستغرق سرریزهای نیلوفری

سروش اسماعیلی‌زاده^{۱*}

طاها میرزاوند^۲

چکیده

سرریزها وظیفه‌ی تخلیه سیلاب در سدها را به عهده دارند. در این میان سرریزهای نیلوفری از دسته سرریزهای آزاد به شمار می‌روند و در دبی‌های سیلابی مستعد تشکیل جریان مستغرق در تاج خود بوده که این عامل منجر به ایجاد نوسانات فشاری شدید در مجرای سرریز، مکش و ارتعاش بدنه و نیز کاهش راندمان سرریز می‌گردد. عدم شناخت کافی از هیدرولیک جریان در حالت استغراق سرریز، زنگ خطری برای شکست و روگذری جریان از سد خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از عناصر جانبی در سرریزهای نیلوفری سبب بهبود الگوی جریان خواهد شد. در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شد تا با استفاده از ساخت مدل فیزیکی، اثر منحرف کننده‌ی جریان و هوادهی و نیز دامنه تأثیر پارامترهای مؤثر بر ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریزهای نیلوفری شناسایی و گسترش یابد و در نهایت با اعمال اثر وزن کلیه عوامل هندسی و هیدرولیکی، رابطه‌ای غیرخطی برای تخمین ضریب تخلیه معرفی شد. رابطه‌ی پیشنهادی با دارا بودن ریشه میانگین مربعات خطای برابر ۰/۰۹۱، نسبت به سایر روابط پیشین (که دارای خطاهای ۰/۱۲۲ و ۰/۱۱۸ هستند) قادر به پیش‌بینی بهتر ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریزهای نیلوفری است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ضریب تخلیه سرریز برخلاف تحقیقات پیشین، به شدت به منحرف کننده‌ی جریان بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی

آبگیر، روزنه، سیلاب، عمق استغراق بحرانی، گرداب.

* کارشناس ارشد عمران، ناظر فنی سد بالارود، شرکت مهندسی مشاور دزآب، خوزستان، soroushesmaeili92@gmail.com
^۲ کارشناس مکانیک سیالات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان.

مقدمه

بسیاری از حوادث در سدها از جمله شکست و روگذری جریان ناشی از طراحی نامناسب سیستم‌های تخلیه سیلاب و ظرفیت کم تخلیه سرریز در دبی‌های سیلابی می‌باشد. بر این اساس کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۱ طراحی سرریز را با در نظر گرفتن دو معیار سیلاب طراحی و سیلاب ایمنی در نظر گرفت. توضیح اینکه سد بتواند بدون هیچ‌گونه خسارت و تخریبی، سیلاب طراحی را تحمل کند و بدون خسارت جدی و فاجعه‌بار از جمله روگذری و یا شکست در هر یک از سازه‌های اصلی شامل بدنه سد، تکیه‌گاه‌ها و سازه‌های سرریز، سیلاب ایمنی را عبور دهد که در این سطح خسارات ناشی از کاویتاسیون^۲ و فرسایش قابل قبول است. سرریزهای نیلوفری از جمله سیستم‌های تخلیه‌کننده‌ی سیلاب بوده که معمولاً در مکان‌هایی که فضا برای ساخت دیگر سرریزها نباشد مانند دره‌های تنگ و همچنین در سدهای خاکی که به دلیل مسائل اشباع دانه‌ای و پوسته‌ی بدنه سد انتظار می‌رود سرریز جدا از بدنه سد باشد و نیز از دیدگاه اقتصادی در سدهایی که دارای تونل انحراف بوده و بتوان تونل سرریز را به تونل انحراف وصل کرد، به کار می‌روند. طراحی سرریزهای نیلوفری دارای ویژگی‌های خاصی است زیرا رفتار هیدرولیکی آن به شدت به توپوگرافی محل و مشخصات هندسی سرریز بستگی دارد. سرریز نیلوفری در دبی‌های سیلابی مستغرق شده و سرتاسر یا بخشی از اجزای تشکیل دهنده آن شامل تاج، شافت قائم و تونل خروجی در وضعیت جریان تحت فشار قرار می‌گیرند که این وضعیت منجر به کاهش ظرفیت تخلیه سرریز می‌شود.

هیدرولیک جریان عبوری در سرریزهای نیلوفری با افزایش تراز مخزن و در نتیجه افزایش هد روی تاج، دست‌خوش تغییرات فراوانی می‌شود. در حالت کلی شرایط جریان در سرریزهای نیلوفری به سه بخش کنترل تاج^۳، کنترل روزنه^۴

و کنترل تونل^۵ تقسیم‌بندی می‌شود. تغییر رژیم جریان در این دسته از سرریزها باعث ناپایدار شدن جریان شده و عامل ایجاد مشکلاتی از قبیل ارتعاشات سازه‌ای شدید، سروصداهای زیاد، نوسانات شدید فشار و ایجاد فشارهای منفی و در نتیجه سبب وقوع کاویتاسیون در مجرای تخلیه سرریز می‌شود (چن و چن^۶، ۲۰۱۵). استفاده از سازه‌های جانبی در سرریز از قبیل نصب منحرف‌کننده‌ی جریان^۷ و هواده‌ی^۸، برای جلوگیری از مشکلات عنوان شده در اثر تغییر رژیم جریان و نیز با هدف بهبود شرایط هیدرولیکی حاکم بر سرریزهای نیلوفری، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. مطالعه‌های آزمایشگاهی اندکی جهت شناخت شرایط هیدرولیکی جریان مستغرق در سرریزهای نیلوفری صورت گرفته است که از جمله آن می‌توان به مطالعات موسالی^۹ (۱۹۶۹) اشاره کرد. وی عوامل مؤثر بر تغییر شرایط جریان از کنترل تاج به کنترل روزنه را در سرریزهای نیلوفری مورد بحث و بررسی قرار داد. از جمله این عوامل تأثیرگذار، می‌توان به هندسه تاج سرریز، قطر تونل خروجی و شفت عمودی، عدد فرود مجرا و هواده‌ی جریان اشاره کرد. موسالی (۱۹۶۹) در تشریح بیشتر هواده‌ی جریان بیان کرد که ورود هوا به مجرای سرریز ناشی از تشکیل فشارهای مکشی بوده و اگر هواده‌ی از طریق انتهای تونل خروجی صورت گیرد، منجر به مخالف شدن جهت حرکت جریان هوا با جریان آب شده و باعث تسریع در تغییر رژیم جریان از حالت کنترل تاج به تونل می‌شود. این در حالی است که عمل هواده‌ی در ابتدای تونل باعث هم جهت شدن جریان هوا و جریان آب شده و گذار از کنترل تاج به تونل را به تعویق می‌اندازد. در بررسی استفاده از سازه‌های جانبی منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده در سرریزهای نیلوفری می‌توان به مطالعات حاجدین^{۱۰} (۱۹۷۹) و اداره احیا اراضی آمریکا^{۱۱} (۱۹۸۷) اشاره کرد. آنان برای شرایط کارگذاری منحرف‌کننده‌ی جریان، شیب منحرف‌کننده‌ی جریان را برابر ۵:۱ (افقی: عمودی) و نسبت

⁷ Deflector

⁸ Aerator

⁹ Mussalli

¹⁰ Hajdin

¹¹ United States. Bureau of Reclamation (USBR)

¹ International Commission On Large Dams (ICOLD)

² Cavitation

³ Crest Control

⁴ Orifice Control

⁵ Pipe Control

⁶ Chen and Chen

(d/R) بستگی دارد. در نهایت رابطه‌ی زیر را جهت تخمین ضریب تخلیه جریان مستغرق در سرریزهای نیلوفری پیشنهاد کردند:

$$C_Q = 0.95 \left(1 - 0.25 \frac{d}{R} \right)^{1.1} \quad (3)$$

که در آن C_Q ، d و R به ترتیب ضریب تخلیه جریان مستغرق در منحرف‌کننده‌ی جریان، قطر خم و شعاع انحناء خم می‌باشند.

این در حالی است که حاجدین (۱۹۷۹) رابطه (۴) را جهت تخمین ضریب تخلیه منحرف‌کننده‌ی جریان ارائه کرد:

$$C_Q = 0.92 - 0.2 \left(\frac{d}{R} \right) \quad (4)$$

با توجه به اینکه ماهیت پدیده گرداب در سرریزهای نیلوفری و آبگیر ساده تقریباً مشابه می‌باشد، تاستان و یلدریم^۴ (۲۰۱۸) با بررسی شکل هندسه ورودی آبگیرهای قائم و تأثیر آن بر وقوع گرداب با هسته هوا، بیان کردند که برای رخداد گرداب با هسته هوا، ضروری است توده سیال به صورت قطاع کروی که حول محور عمودی خود، تحت اثر نیروی کوریولیس^۵ و چرخش تحمیلی یا القا شده قرار گرفته، تشکیل شود یا به صورت هیدرولیکی توسعه یابد. به عبارت دیگر، قطاع‌های سطح ریزش کروی^۶ (SSSSs) برای وجود گرداب الزامی است. جیلالی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی سرریز شفت سد جدرا^۸ در الجزایر پرداختند. آنان با مدلسازی سرریز در آزمایشگاه با مقیاس ۱:۶۰، ورودی دایره‌ای ساده سرریز را جایگزین یک تاج چند وجهی کرده و هیدرولیک جریان در سرریز را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان افزایش ۲۰ درصدی در ضریب تخلیه سرریز را با اضافه کردن تاج چند وجهی به دنبال داشت. همچنین در حالت استغراق، طرح اتخاذ شده می‌تواند عبور از یک جریان نسبی تخمینی را با احتمال ۰/۰۱ درصد تضمین کند که به معنای کاهش ارتفاع سد به میزان ۰/۶۸ متر است و در نتیجه سازه هیدرولیکی کارآمدتر و اقتصادی‌تر شد. گوریو^۹ و همکاران

سطح مقطع تنگ‌شده توسط منحرف‌کننده‌ی جریان به سطح مقطع مجرای سرریز را کوچکتر مساوی ۰/۸۵ به عنوان ابعاد بهینه پیشنهاد کردند. همچنین لئوپاردی^۱ (۲۰۰۴) با استفاده از مدل آزمایشگاهی اثر منحرف‌کننده‌ی جریان را در انتهای زانوی عمودی سرریزهای نیلوفری بر منحنی دبی-اشل^۲ مورد بررسی قرار داد. مهمترین عوامل تأثیرگذار بر انتقال شرایط جریان از کنترل تاج به روزنه در طول مجرای قائم تخلیه (طول شافت)، نسبت قطر مجرای قائم به قطر تاج سرریز و نسبت سطح مقطع کنترل (مقطع منحرف‌کننده‌ی جریان) به سطح مقطع مجرای قائم شناسایی کرد. ساویچ^۳ و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه آزمایشگاهی پیرامون سرریزهای نیلوفری به همراه منحرف‌کننده‌ی جریان و هوادهی در ابتدای زانوی سرریز، روابطی را برای ضرایب دبی در شرایط جریان کنترل تاج و منحرف‌کننده‌ی جریان و نیز ضرایبی برای سرعت در امتداد تونل خروجی به دست آوردند. همچنین آنان با بیان اینکه میزان سرعت جریان هوا در مجرای هوادهی برای جلوگیری از ایجاد سروصدا و لرزش‌ها به ۵۰ متر بر ثانیه محدود می‌شود، عنوان کردند که سطح مقطع مورد نیاز هوادهی برای حصول اطمینان از برقراری جریان سطح آزاد در تونل به کمک روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_A = K_A Q \quad (1)$$

$$K_A = 0.03 (Fr - 1)^{1.06} \quad (2)$$

که در آن Q_A و K_A به ترتیب دبی و ضریب دبی هوای مورد نیاز و Q و Fr نیز به ترتیب دبی جریان و عدد فرود در مقطع منحرف‌کننده‌ی جریان می‌باشد. نتایج پژوهش آنان حاکی از آن بود که ضریب تخلیه جریان در شرایط کنترل تاج عمدتاً تحت تأثیر نسبت هد روی تاج به قطر بیرونی تاج (H_s/D_s) و شرایط جریان در کانال تقرب قرار دارد. این در حالی است که ضریب تخلیه جریان در شرایط کنترل منحرف‌کننده‌ی جریان به نسبت قطر خم عمودی (زانو) به شعاع انحنای آن

⁶ Spherical Sink Surface Sectors

⁷ Djillali

⁸ Djedra Dam

⁹ Gur'yev

¹ Leopardi

² Rating Curve

³ Savic

⁴ Tastan & Yildirim

⁵ Coriolis

ثابت برای تمامی سناریوها در مجرای قائم سرریز استفاده شد. جهت به کارگیری منحرف کننده ی جریان با در نظر گرفتن محدودیت عنوان شده توسط حاجدین (۱۹۷۹) و اداره احیا اراضی آمریکا (۱۹۸۷) مبنی بر اینکه میزان نسبت سطح مقطع تنگ شده توسط منحرف کننده ی جریان به سطح مقطع شفت سرریز (Ad/Ai) کوچکتر مساوی $0/۸۵$ باشد لذا سه سناریو از نقطه نظر نسبت Ad/Ai در نظر گرفته شد. برای این منظور در هر یک از نسبت های Ad/Ai معادل $0/۷۵$ ، $0/۵$ و $0/۲۵$ منحرف کننده هایی با ابعاد مدنظر ساخته شد. به منظور هواده ی مجرای سرریز، چهار عدد لوله تأمین هوا با مجموع سطح مقطعی بیش از سطح مقطع مورد نیاز محاسباتی از روابط (۱) و (۲) بلافاصله بعد از بخش منحرف کننده ی جریان تعبیه شد (شکل (۱)). برای ساخت منحرف کننده ها مطابق هندسه ی از پیش تعیین شده، با تهیه شافت توپر پلیمری از نوع تفلون، در کارگاه تراشکاری نسبت به تهیه آن مبادرت ورزیده شد. منحرف کننده ها دارای طرحی جدید و ابتکاری بوده، به گونه ای که از تراش تدریجی هسته شافت توپر تفلون ایجاد شده و به صورت یک استوانه ی متقارن با قطر داخلی متغیر ساخته شده اند (شکل (۲)-ج). آب از مخزن زیرزمینی که در خارج از محوطه آزمایشگاه قرار دارد به وسیله یک پمپ با حداکثر دبی ۲۰۰ لیتر بر ثانیه پمپاژ می شود. جریان آب قبل از عبور از دبی سنج الکترومغناطیسی با دقت $\pm 0/۲$ درصد مقیاس واقعی، توسط یک شیر کنترل دبی تنظیم می شود. استهلاك انرژی و یکنواخت نمودن جریان، پس از عبور جریان از کنتور و در ابتدای مخزن با استفاده از صفحات آرام کننده انجام گرفت. برای حصول اطمینان از ثبات جریان در هر آزمایش، مقرر گردید که حداقل زمانی معادل ۲۰ دقیقه اعمال شود. برای اندازه گیری عمق آب روی تاج سرریز، از یک عمق سنج با دقت $\pm 0/۰۵$ میلی متر استفاده گردید. جریان آب پس از عبور از سرریز نیلوفری وارد مجرای قائم و گذر از منحرف کننده ی جریان شده و به کانال انتقال هدایت می شود و مجدداً به استخر زیرزمینی وارد می گردد. این چرخه در طول آزمایش ها برای سناریوهای مختلف و در شرایط هیدرولیکی مختلف ادامه می یابد. شکل (۱) نمای کلی از آزمایشگاه و سیکل گردش

(۲۰۲۱) در پژوهشی با استفاده از مدل سرریزهای شفت چندین سد بیان کردند که جهت سهولت در اجرای سازه ی سرریز و همچنین جلوگیری از جدایی جریان درون شفت قائم از سطح بتن در محل های اتصالات اجرایی و در نتیجه امکان ایجاد خلاء در ناحیه مذکور، توصیه کردند که مقطع شفت قائم به صورت چندضلعی اجرا گردد.

بررسی مطالعات کتابخانه ای نشان می دهد که دامنه ی تحقیقات صورت گرفته در خصوص ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریز نیلوفری به همراه منحرف کننده ی جریان و هواده، بسیار اندک می باشد. همچنین گستردگی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی سرریز و منحرف کننده ی جریان از یک سو و نیز ضرورت شناخت کافی از رفتار سرریز در شرایط مستغرق از سوی دیگر، لزوم مطالعه و کنکاش بیشتر در این زمینه را بیش از پیش پررنگ تر می کند. لذا در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از ساخت مدل فیزیکی، اثرپذیری پارامترهای هندسی و هیدرولیکی منحرف کننده ی جریان و هواده ی را بر تخمین ضریب تخلیه سرریز نیلوفری در شرایط جریان مستغرق بررسی کرد و برخی ابهامات را در خصوص عملکرد ضریب تخلیه جریان مستغرق این دسته از سرریزها برطرف نمود.

مواد و روش ها

ساختار کلی این پژوهش بر اساس مطالعه ی آزمایشگاهی استوار است. آزمایش ها در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی جندی شاپور انجام شدند. برای این منظور از مخزنی با طول چهار متر، ارتفاع یک متر و عرض یک متر استفاده شد. جداره مخزن از جنس ورق گالوانیزه بوده که انتهای آن به صورت دایره ای می باشد و آب پمپاژ شده از ایستگاه پمپاژ توسط لوله ای T-شکل در ابتدای مخزن منتقل می شود (شکل های ۱ و ۲-الف و ب). مدل سرریز نیلوفری نیز بعد از طراحی در نرم افزار اتوکد^۱ با استفاده از دستگاه چاپگر سه بعدی با جنس ماده ای پلیمری ساخته شد. به منظور اثربخشی منحرف کننده ی جریان و هواده، از سه عدد منحرف کننده ی جریان با ابعاد هندسی مختلف برای هر سناریو و چهار عدد لوله تأمین هوا با مقطع

^۱ Autocad

- خصوصیات هندسی: طول تاج سرریز نیلوفری (L)، فاصله تراز تاج سرریز تا منقبض‌ترین بخش منحرف‌کننده‌ی جریان (P)، قطر داخلی شفت قائم (D_i) (معادل قطر بیرونی منحرف‌کننده مطابق شکل (۲-ج))، مساحت داخلی شفت قائم (A_i)، قطر داخلی منقبض‌ترین قسمت منحرف‌کننده‌ی جریان (D_d) (شکل (۲-ج))، مساحت داخلی منقبض‌ترین قسمت منحرف‌کننده‌ی جریان (A_d)، شعاع انحناء زانو (R)، فاصله مرکز سرریز از جداره مخزن (r) (شکل (۱)).

بنابراین پارامترهای حاکم بر فضای پژوهش را می‌توان به صورت زیر معرفی نمود:

$$f\left(\rho, \mu, \sigma, V, h, S, g, \Gamma, L, P, D_i, A_i, D_d, A_d, R, r\right) = 0 \quad (5)$$

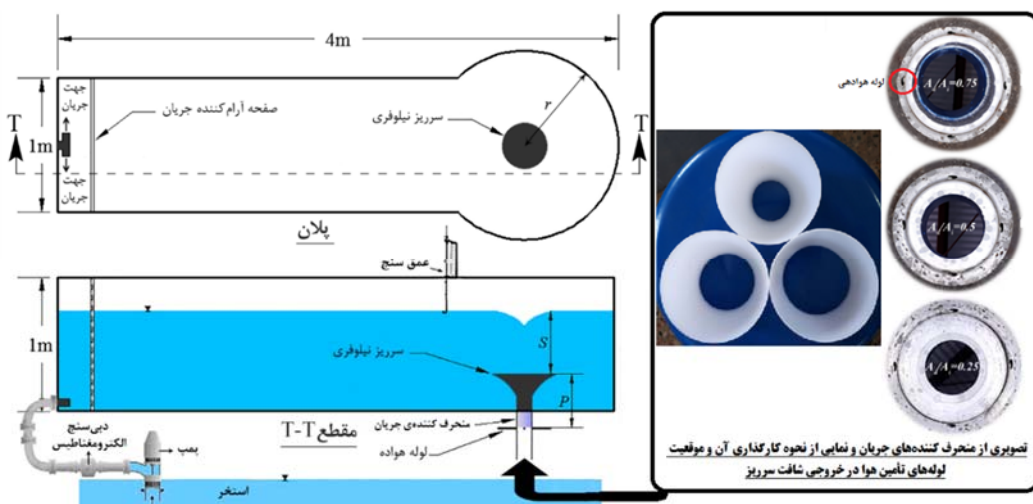
سپس با استفاده از تئوری پی‌باکینگهام^۱ و با فرض پارامترهای ($\rho V D_i$) به عنوان پارامترهای تکراری، رابطه حاکم بر فضای پژوهش جهت تخمین ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریزهای نیلوفری به شرح زیر می‌باشد:

$$f\left(\frac{\rho V D_i}{\mu}, \frac{\rho V^2 D_i}{\sigma}, \frac{V}{\sqrt{g D_i}}, \frac{\Gamma}{V D_i}, \frac{V}{\sqrt{2gh}}, \frac{L}{D_i}, \frac{h}{D_i}, \frac{S}{D_i}, \frac{P}{D_i}, \frac{A_d}{A_i}, \frac{D_i}{R}, \frac{r}{D_i}\right) = 0 \quad (6)$$

آب و موقعیت استقرار سرریز، منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲) مجموعه تجهیزات و محیط آزمایشگاه تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد. به‌منظور بررسی و ارزیابی مدل فیزیکی ساخته شده در این پژوهش با نتایج تحقیقات پیشین، از نتایج آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴) بهره‌گیری شد. آزمایش‌های انجام شده توسط لئوپاردی (۲۰۰۴) در چندین بخش مختلف با تغییر در پارامترهای قطر و ارتفاع شافت، شعاع انحناء زانو، طول تاج سرریز و مساحت ناحیه تنگ‌شده توسط منحرف‌کننده‌ی جریان به اجرا درآمد. موقعیت قرارگیری منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده در انتهای زانو منظور شده است. شماتیک سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق لئوپاردی (۲۰۰۴) در شکل (۳) نمایش داده شده است.

بر اساس تئوری آنالیز ابعادی و همچنین مشخصات سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده، کلیه پارامترهای مؤثر بر فضای تحقیق را می‌توان به شرح زیر لیست نمود:

- خصوصیات سیال: جرم مخصوص سیال (ρ)، لزوجت سیال (μ)، کشش سطحی (σ).
- خصوصیات جریان: سرعت جریان در روزنه یا منحرف‌کننده‌ی جریان (V)، بار آبی روی روزنه یا منحرف‌کننده‌ی جریان (h) (معادل $S+P$ در شکل (۱))، بار آبی روی تاج سرریز (S)، شتاب ثقل (g)، چرخش اعمال شده به جریان یا گردش (Γ).

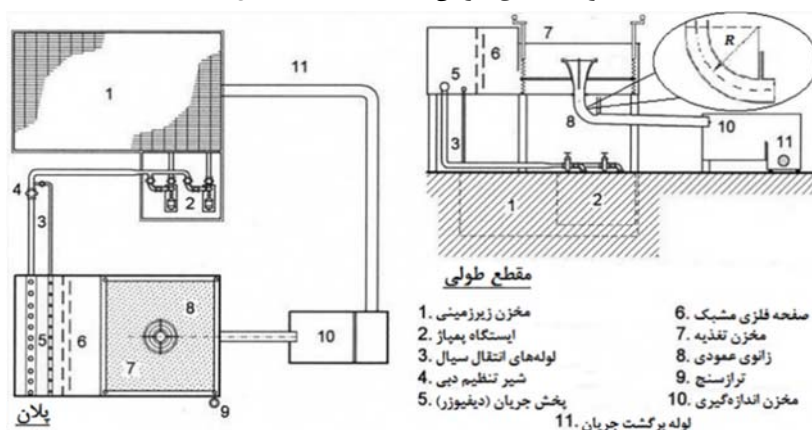


شکل (۱): پلان، مقطع و موقعیت استقرار سرریز، منحرف‌کننده‌ی جریان و لوله‌های هواده‌ی آزمایش‌های صورت گرفته در تحقیق حاضر

¹ Buckingham π Theorem



شکل (۲): نمایی از مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی الف: مخزن و سرریز مورد استفاده ب: ایستگاه پمپاژ آزمایشگاه ج: شماتیک منحرف کننده‌ی جریان با نسبت A_d/A_i معادل ۰/۵



شکل (۳): شماتیک سیستم آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴)

باشد. لذا در این تحقیق پارامتر (r) معادل $۰/۷۵$ متر می‌باشد که از مقدار $۴D_i$ برابر $۰/۴$ متر، بیشتر بوده، بنابراین از بررسی نسبت r/D_i صرف نظر می‌شود. همچنین از آن جایی که پارامتر نسبی h/D_i در نسبت‌های S/D_i و P/D_i مستتر بوده، لذا از بررسی آن چشم‌پوشی می‌شود. پارامترهای P/D_i ، L/D_i و D_i/R نیز در طی تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده و به ترتیب معادل $۳/۱۵$ ، ۰ و $۹/۴$ می‌باشند.

با توجه به شرایط کاملاً مستغرق سرریز در کل محدوده آزمایش‌ها و حاکم بودن کنترل روزنه بر شرایط هیدرولیکی جریان لذا از لحاظ نمودن کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر به دلیل بی‌اثر بودن، صرف نظر می‌شود. اودگارد^۶ (۱۹۸۶)

که در آن $\rho V D_i / \mu$ معرف عدد رینولدز^۱ (Re) ، $\rho V^2 D_i / \sigma$ معرف عدد وبر^۲ (We) ، $V / \sqrt{g D_i}$ معرف عدد فرود^۳ (Fr) و $\Gamma / V D_i$ معرف عدد کلف^۴ (Ko) می‌باشد. پارامتر $V / \sqrt{2gh}$ معرف ضریب تخلیه جریان روزنه‌ای (C_s) بوده که معادل $Q / A \sqrt{2gh}$ است. همچنین A_d/A_i بیانگر نسبت سطح مقطع داخلی منقبض‌ترین قسمت منحرف کننده‌ی جریان به سطح مقطع داخلی شفت سرریز می‌باشد. برای جلوگیری از اثر دیواره‌های مخزن بر هیدرولیک جریان، انوار^۵ و همکاران (۱۹۷۸) پیشنهاد کردند که فاصله جداره‌ی مخزن تا مرکز آبگیر (r) بیشتر از $۴D_i$

⁵ Anwar
⁶ Odgaard

¹ Reynolds
² Weber
³ Froude
⁴ Kolf

جدول (۱): شرایط آزمایش‌ها و محدوده تغییرات پارامترهای حاکم بر فضای تحقیق حاضر

محدوده تغییرات پارامترهای حاکم		نسبت A_d/A_i	آزمایش‌ها
Fr	S/D_i		
الی ۱/۴۷ ۳/۵	الی ۰/۷۶ ۵/۹	۱ (بدون منحرف‌کننده‌ی جریان یا مدل شاهد)	مرحله اول
الی ۱/۹۷ ۳/۹۴	الی ۰/۵۹ ۶	۰/۷۵	مرحله دوم
الی ۲/۳ ۳/۹۷	الی ۰/۵۲ ۶	۰/۵	مرحله سوم
الی ۲/۴۹ ۴/۱۴	الی ۰/۵ ۶/۱	۰/۲۵	مرحله چهارم

نتایج و بحث

با آگیری مخزن و رسیدن تراز سطح آب به تراز تاج سرریز، عملکرد سرریز در شرایط کنترل تاج شروع شد. در این وضعیت با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش هد آب روی تاج، سرریز به آستانه‌ی روزنه‌ای شدن جریان نزدیک شد. آغاز انجام آزمایش‌ها در شرایط شروع کنترل روزنه صورت گرفت. آستانه تبدیل کنترل تاج به روزنه حالت حدی دارد و ثابت نیست. برای تشخیص آستانه‌ی روزنه‌ای شدن جریان عبوری از سرریز نیلوفری دو حالت مدنظر قرار گرفت: در حالت اول با افزایش دبی و نزدیک شدن به آستانه‌ی روزنه‌ای، سطح آب به علت ورود هوا به سیستم در اثر گذار جریان از آزاد به روزنه‌ای دچار نوسان شد. به‌عبارتی این حالت با رخداد اولین گرداب همراه بود و به عنوان شرایط استغراق روزنه‌ای در نظر گرفته شد. معیار دوم اینکه با نزدیک شدن جریان به آستانه‌ی روزنه‌ای، وقوع جریان دوفازی لخته‌ای و عبور بسته‌های هوا به‌طور منقطع از قسمت پلکسی‌گلاس^۷ شفاف شفت قائم به وضوح قابل مشاهده بود. با مشاهده‌ی وضعیت‌های گفته شده آزمایش‌ها به‌ترتیب در سه وضعیت منحرف‌کننده‌ی جریان با نسبت A_d/A_i و نیز در حالت بدون منحرف‌کننده‌ی جریان (مدل شاهد)، شروع و دبی اولیه برای سرریزها ثبت شد. همانطور که گفته شد آستانه شروع روزنه‌ای شدن جریان با وقوع اولین گرداب با

در مطالعات خود نشان داد که اثر نیروی لزجت وقتی مهم است که عدد رینولدز کوچکتر از ۱۱۰۰۰۰ باشد. حدود این معیار توسط داگت و کیولگان^۱ (۱۹۷۴) برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ گزارش شد. در تحقیق حاضر حداقل میزان عدد رینولدز ۱۴۴۰۰۰ می‌باشد. بنابراین به استناد مطالعات اودگارد (۱۹۸۶) و داگت و کیولگان (۱۹۷۴) تاثیر پارامتر بدون بعد رینولدز در این تحقیق کم بوده و می‌توان از اثر آن صرف‌نظر نمود. همچنین بر اساس مطالعات اسماعیلی‌زاده و لشکرآرا (۲۰۲۰) وجود منحرف‌کننده‌ی جریان و مستغرق شدن آگیری سبب ضعیف شدن قدرت گرداب خواهد شد و از آنجا که طبق مطالعات کناوز^۲ (۱۹۸۷) گردابه‌های ضعیف دارای گردش ضعیفی هستند، لذا با آگاهی از وجود رابطه مستقیم بین گردش و عدد کلف، می‌توان از تأثیر این عدد بر ضریب تخلیه صرف‌نظر نمود. بنابراین معادله حاکم بر تخمین ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریز نیلوفری در حضور منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده به شکل عمومی رابطه (۷) نمایش داده می‌شود:

$$C_s = f\left(\text{Fr}, \frac{S}{D_i}, \frac{A_d}{A_i}\right) \quad (7)$$

ابتدا با بهره‌گیری از رگرسیون غیرخطی رابطه‌ای که توانایی تخمین واقع‌گرایانه ضریب تخلیه جریان مستغرق را در سرریزهای نیلوفری داشته باشد، معرفی گردید. سپس به ارزیابی و مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با تحقیقات پیشین پرداخته و تجزیه و تحلیل‌های لازم در راستای نقاط ضعف و قوت منحرف‌کننده‌ی جریان در مجرای سرریزهای نیلوفری ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی کارایی بخش‌های مختلف این تحقیق از ضریب تعیین^۳، جذر میانگین مربعات خطا^۴، میانگین خطای مطلق^۵، ضریب وزن باقیمانده^۶ و همچنین ضریب زاویه خط رگرسیون برازش داده شده از بین نتایج در مقایسه با خط ۴۵ درجه استفاده شده است. جدول (۱) سناریوهای آزمایش‌ها و محدوده پارامترهای حاکم بر تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

⁵ Mean Absolute Error

⁶ Coefficient of residual mass

⁷ PlexiGlass

¹ Daggett & Keulegan

² Knauss

³ The Coefficient of Determination

⁴ Root-Mean-Square Error

• ضریب تخلیه جریان مستغرق

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب مقادیر ضریب تخلیه جریان مستغرق (روزنه‌ای) را بر حسب مقادیر بی‌بعد S/D_i و Fr نشان می‌دهند. در این اشکال، سرریز بدون منحرف‌کننده‌ی جریان به‌عنوان مدل شاهد معرفی شده است. از مقایسه مقادیر ضریب تخلیه سرریز در این شکل‌ها، اثر منحرف‌کننده‌ی جریان بر افزایش ضریب تخلیه کاملاً مشهود است. به‌گونه‌ای که با نصب منحرف‌کننده‌ی جریان با نسبت‌های Ad/A_i معادل ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ مقادیر حداکثری ضریب تخلیه سرریز نیلوفری به ترتیب ۱۰/۴، ۱۱/۶ و ۱۶/۴ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش می‌یابد. اندرکنش ضریب تخلیه جریان مستغرق در مقابل تغییرات هد نسبی سرریز در شکل (۵)، نشان می‌دهد که در مدل شاهد و مدل Ad/A_i معادل ۰/۷۵، در ابتدای شرایط روزنه‌ای شدن جریان، روند تغییرات ضریب تخلیه با شیبی ملایم افزایش یافته ولی در ادامه با افزایش نسبت S/D_i ، آهنگ تغییرات ضریب تخلیه از روندی ثابت و یا کاهشی برخوردار است. علت را می‌توان از رابطه دبی اشل در حالت روزنه‌ای ($Q = (\pi/4)C_s d^2 \sqrt{2gh}$) بررسی کرد. در این رابطه ضریب تخلیه C_s با دبی جریان رابطه مستقیم و با هد آب (h) نسبت معکوس دارد. به‌عبارتی در شروع شرایط جریان روزنه‌ای، افزایش دبی، سبب افزایش ضریب تخلیه می‌شود. این وضعیت تا جایی ادامه دارد که اثر افزایش سریع و تصاعدی هد جریان روی سرریزها (افزایش S/D_i) توسط منحرف‌کننده‌ی جریان بر اثر افزایش دبی غلبه کرده و معکوس بودن نسبت هد و ضریب تخلیه سبب کاهش و یا ثابت ماندن ضریب تخلیه می‌گردد.

در بررسی صورت گرفته در مدل‌های Ad/A_i معادل ۰/۵ و ۰/۲۵ مشخص است که به دلیل انقباض بیشتر منحرف‌کننده‌ی جریان، اثر افزایش هد جریان بر افزایش دبی در مراحل آغازین روزنه‌ای شدن جریان، غالب شده و سبب ثابت ماندن ضریب تخلیه در همان نسبت‌های اولیه S/D_i می‌شود.

هسته هوا همراه بود. شکل (۴) گرداب تشکیل شده را در سرریز نیلوفری برای مدل شاهد و مدل‌های منحرف‌کننده‌ی جریان در نسبت S/D_i معادل ۱/۵ نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل (۴) مشخص است، نوع و قدرت گرداب در سرریز، بستگی زیادی به نوع منحرف‌کننده‌ی جریان (Ad/A_i) دارد به‌گونه‌ای که با کاهش Ad/A_i ، قطر هسته گرداب و نوع گرداب روندی کاهشی دارد. علت این پدیده را می‌توان در دو عامل جستجو کرد: عامل اول افزایش عدد فرود در اثر افزایش انقباض منحرف‌کننده‌ی جریان می‌باشد. بنا به مطالعات یانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، اثر فشردگی^۲ و کششی^۳ گرداب همزمان با یکدیگر در تعامل هستند و اینکه کدامیک غالب است به عدد فرود بستگی دارد. به‌عبارتی افزایش عدد فرود سبب غالب شدن اثر فشردگی گرداب می‌شود به‌گونه‌ای که منحرف‌کننده‌ی جریان درون مجرا به نوبه خود باعث فشردن هسته هوا و گرداب و حرکت آن به سمت سطح مخزن شده و در نتیجه گرداب‌های ضعیف را ایجاد می‌کند و از میزان چرخش جریان روی تاج می‌کاهد. عامل دوم را می‌توان در مطالعات کوکاباس و یلدیریم^۴ (۲۰۰۲) جستجو کرد. آنان در نظر داشتند که حجمی کروی شکل از جریان تحت تأثیر مکش آبگیر قرار دارد، این حجم که به سطح ریزش کروی^۵ SSS موسوم است، علاوه بر اینکه به صورت شعاعی جمع می‌شود حول محور عمودی آبگیر نیز می‌چرخد و گرداب با هسته هوا زمانی رخ می‌دهد که سطح ریزش کروی در اثر مکش آبگیر، فروپاشی^۶ شود. بنابراین به هر میزانی که نسبت Ad/A_i کمتر باشد از شدت فرو ریزش کروی SSS کمتر شده و در نتیجه زمینه را برای شکل‌گیری گرداب با هسته هوا به درون شفت کم‌رنگ‌تر می‌کند و به‌تبع آن نوع و قدرت گردابه‌های شکل گرفته در ورودی سرریز روندی کاهشی می‌گیرد. با کاهش نوع گرداب و در نتیجه کاهش نفوذ هوا به درون سرریز، روند تخلیه جریان در سرریز با حداقل نوسانات هیدرولیکی صورت گرفت، به‌گونه‌ای که ثبات تغییرات در تراز سطح آب مخزن به‌طور ملموس قابل مشاهده بود.

⁴ Kocabaş and Yildirim

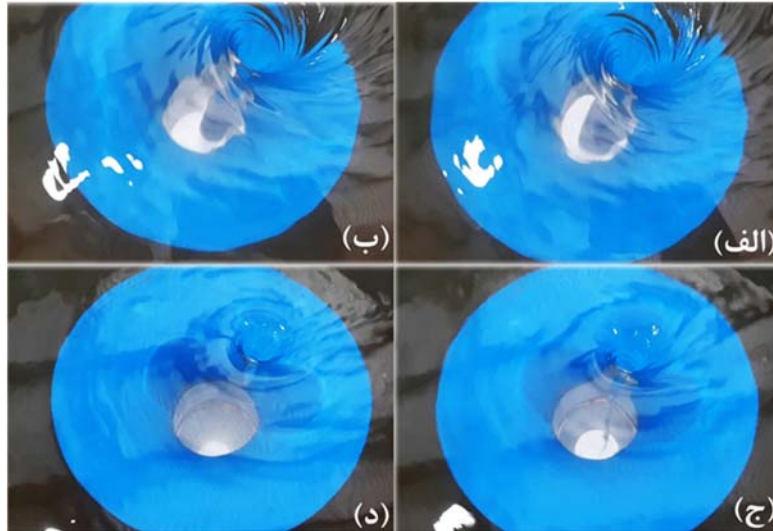
⁵ Spherical Sink Surface (SSS)

⁶ Collapses

¹ Yang

² Squeezing

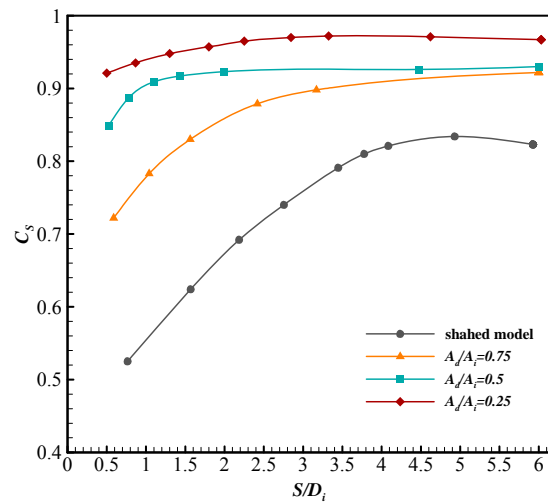
³ Stretching



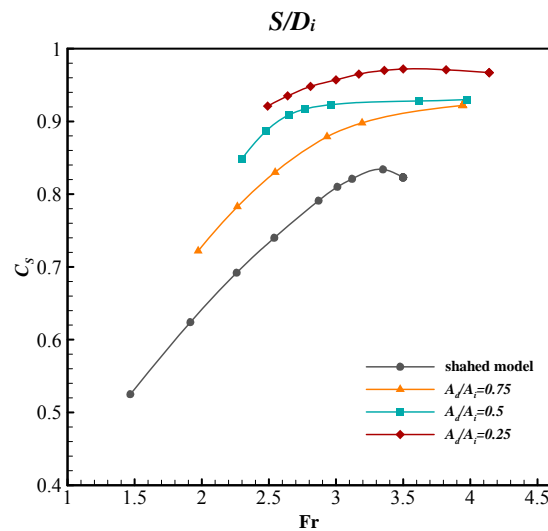
شکل (۴): شکل گیری گرداب در سرریزهای نیلوفری در نسبت S/D_i معادل ۱/۵ الف: مدل شاهد ب: مدل منحرف کننده‌ی جریان با نسبت A_d/A_i معادل ۰/۷۵ ج: A_d/A_i معادل ۰/۵ د: A_d/A_i معادل ۰/۲۵

در شکل (۶) ضریب تخلیه جریان مستغرق در تمامی سناریوها، با افزایش عدد فرود، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. میزان ضریب تخلیه مدل A_d/A_i معادل ۰/۲۵ در کل محدوده عدد فرود، به ترتیب بیشتر از مدل‌های A_d/A_i معادل ۰/۵ و ۰/۷۵ و مدل شاهد می‌باشد. در بررسی‌های دقیق‌تر می‌توان اثرگذاری عدد Fr بر ضریب تخلیه C_s را در سه دیدگاه به شرح زیر خلاصه کرد:

اول اینکه عدد Fr وابسته به سرعت درون منحرف کننده‌ی جریان می‌باشد و سرعت در منحرف کننده‌ی جریان نیز رابطه مستقیمی با هد جریان روی سرریز دارد، بنابراین هرگونه تغییر در عدد Fr سبب تأثیر مستقیم بر هد جریان روی سرریز شده و در نتیجه ضریب تخلیه C_s طبق رابطه معکوسی که با هد جریان دارد، عمل خواهد کرد. دیدگاه دوم را می‌توان در تحقیقات صورت گرفته توسط لانکاستر^۱ (۱۹۷۹) جستجو کرد. لانکاستر (۱۹۷۹) عنوان کرد که جریان خروجی از روزنه تعبیه شده در کف مخزن به فاصله δ دارای فشردگی می‌شود. به عبارتی به فاصله δ بعد از روزنه، سطح مقطع فشرده شده‌ای تشکیل می‌شود که از سطح مقطع روزنه کوچکتر می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب تخلیه روزنه از دیدگاه تحلیلی با ضریب سرعت (C_V)، ضریب فشردگی (C_C) حاصل نسبت سطح مقطع فشرده شده به سطح مقطع روزنه و فاصله δ رابطه مستقیم داشته،



شکل (۵): تغییرات ضریب تخلیه جریان مستغرق در مقابل

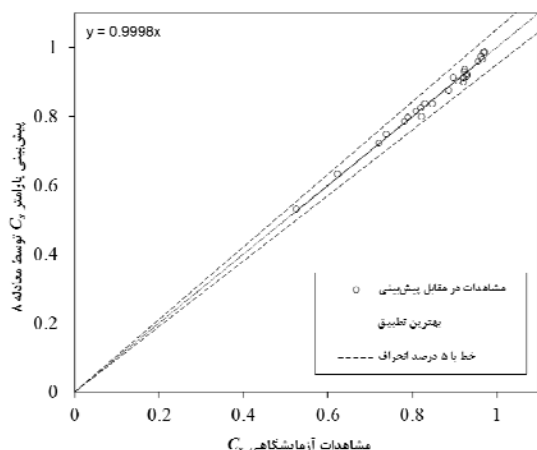


شکل (۶): تغییرات ضریب تخلیه جریان مستغرق در مقابل

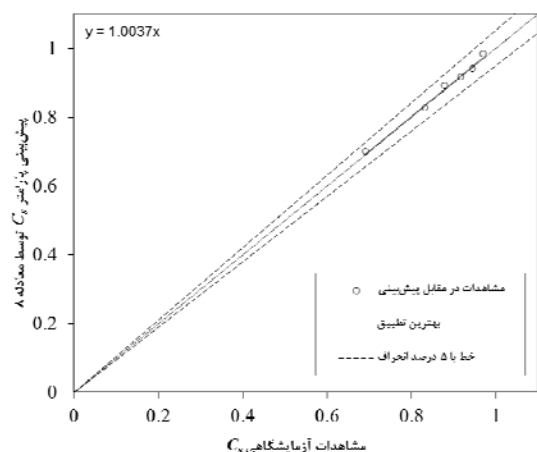
عدد فرود Fr

^۱ Lencastre

حدود ۰/۳۷ درصد بیشتر از مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۷): پیش‌بینی پارامتر C_s در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آموزش



شکل (۸): پیش‌بینی پارامتر C_s در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی در مرحله آزمون

به‌منظور بررسی دقت رابطه (۸) و نیز عمومیت آن در پیش‌بینی ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریزهای نیلوفری، از داده‌های حاصل از تحقیق لئوپاردی (۲۰۰۴) استفاده شد. در این بررسی از معادلات (۳) و (۴) نیز بهره‌گیری شد، به گونه‌ای که مشاهدات آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴) به عنوان داده‌های ورودی به توابع ۳، ۴ و ۸ معرفی شدند و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل آماری در جدول (۳) خلاصه شده است. مقایسه روابط مطرح شده در جدول (۳) نشان‌دهنده این است که رابطه (۸) دارای عملکرد بهتری نسبت به روابط (۳) و (۴) می‌باشد.

بنابراین با کوچکتر شدن ابعاد روزنه (کم شدن A_d/A_i) و در نتیجه افزایش عدد فرود، ضریب فشردگی و سرعت بیشتر شده و لذا ضریب تخلیه جریان مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. در دیدگاه سوم می‌توان بیان کرد که افزایش عدد فرود سبب افزایش اثرات فشردگی گرداب می‌شود و در نتیجه باعث حذف و یا کاهش میزان ورود گرداب با هسته هوا به درون مجرای سرریز شده و به نوعی شرایط جریان و ضریب تخلیه را به‌طور کامل به منحرف کننده‌ی جریان منتقل می‌کند.

به منظور تعیین رابطه حاکم بر فضای تحقیق، از نرم‌افزار تحلیل گر آماری سیگما پلات^۱ استفاده شده است. برای تعیین فضای نگاهت بین پارامترهای مستقل و وابسته نشان داده شده در رابطه ۷، مقادیر مشاهداتی نوع منحرف کننده‌ی جریان (A_d/A_i)، هد نسبی (S/D_i) و عدد فرود (Fr) در مقابل ضریب تخلیه جریان مستغرق، ارزیابی شد. بدین منظور ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل (مرحله آموزش) و ۲۰ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی آن (مرحله آزمون) به کار گرفته شد. نگاهت صورت گرفته بر فضای بین پارامترهای مستقل و وابسته را می‌توان به‌صورت رابطه ۸ نشان داد:

$$C_s = -0.0726 \left(\frac{S}{D_i} \right) + \left(0.6583 Fr^{0.6501} \times \left(\frac{A_d}{A_i} \right)^{-0.0015} \right) - 0.2597 \quad (8)$$

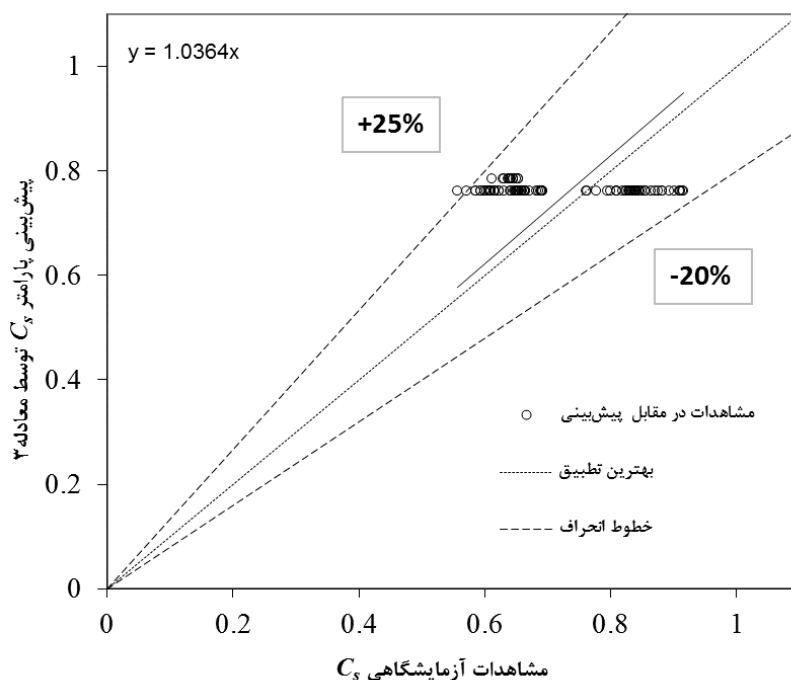
به‌منظور ارزیابی نتایج رابطه (۸) از توابع تحلیل‌گر خطا استفاده شد و نتایج حاصل در جدول (۲) خلاصه شده است. میزان ضریب تعیین رابطه پیشنهادی ۰/۹۹۰۱ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۱۱ برآورد گردید. شکل (۷) و (۸) به‌ترتیب نحوه انطباق نتایج حاصل از پیش‌بینی رابطه (۸) را با مشاهدات نظیر آزمایشگاهی در مرحله آموزش و آزمون نشان می‌دهد. از بررسی میزان ضریب زاویه خط برازش شده از بین نتایج نظیر مشاهداتی و محاسباتی می‌توان دریافت که رابطه (۸) مقادیر پارامتر C_s را در مرحله آموزش حدود ۰/۰۲ درصد کمتر از مقادیر مشاهداتی و در مرحله آزمون

^۱ SigmaPlot

شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نحوه انطباق نتایج حاصل از پیش‌بینی رابطه رگرسیون غیرخطی توسط رابطه ۴، ۳ و ۸ را با مشاهدات نظیر آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴) برای تخمین ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریز نیلوفری نشان می‌دهد. با توجه به پراکنش داده‌ها بهترین شاخص جهت شناسایی معادله برتر، میزان ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد که با توجه به جدول (۳) می‌توان دریافت رابطه

جدول (۲): توابع خطای حاصل از نتایج معادله پیشنهادی ۸ در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی

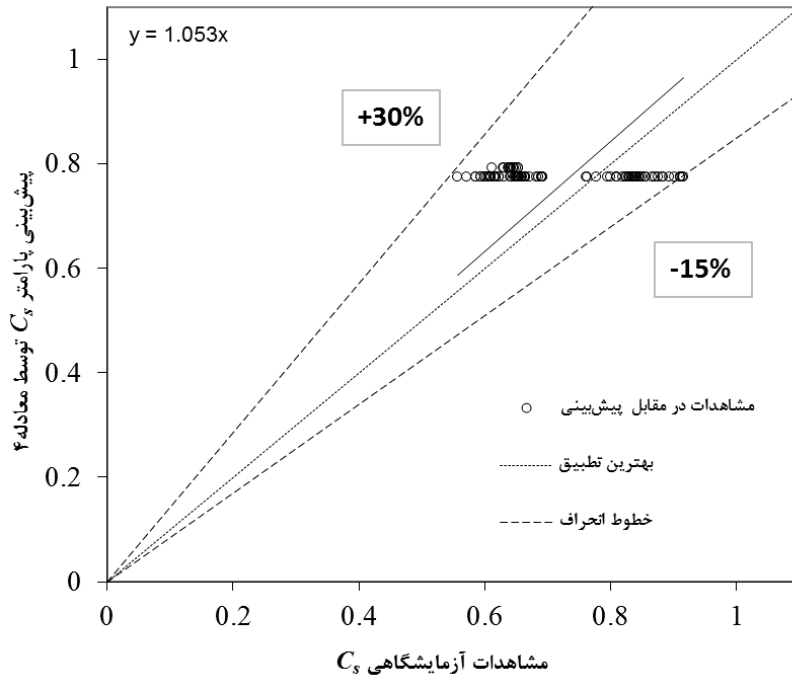
مرحله	پارامتر	ضریب تعیین R^2	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین خطای مطلق MAE	ضریب وزن باقیمانده CRM	ضریب زاویه m
آموزش (۸۰٪)	C_s	۰/۹۹۰۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱	$۱/۶۶ \times ۱۰^{-۷}$	۰/۹۹۹۸
آزمون (۲۰٪)	C_s	۰/۹۹۱۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	$-۳/۸۶ \times ۱۰^{-۳}$	۱/۰۰۳۷



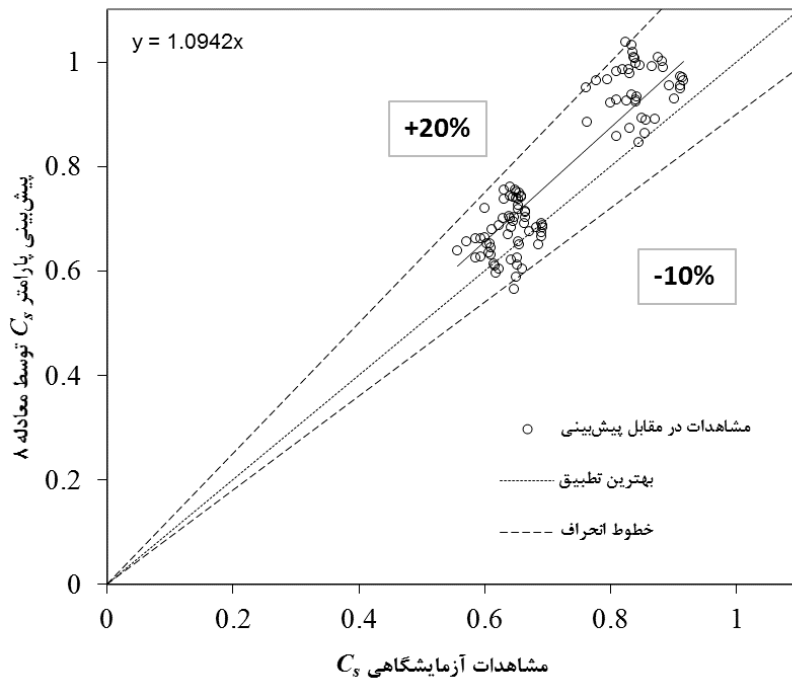
شکل (۹): ارزیابی عملکرد رابطه (۳) در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴)

جدول (۳): ارزیابی آماری رابطه (۳)، (۴) و (۸) با استفاده از مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴)

رابطه	ضریب تعیین R^2	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین خطای مطلق MAE	ضریب وزن باقیمانده CRM	ضریب زاویه m
(۳)	-۰/۲۱۷	۰/۱۱۸	۰/۱۱	$-۵/۹۷ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۰۳۶۴
(۴)	-۰/۳۱	۰/۱۲۲	۰/۱۱۲	$-۷/۶۵ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۰۵۳
(۸)	۰/۲۶۶	۰/۰۹۱	۰/۰۷۵	$-۹/۱۴ \times ۱۰^{-۲}$	۱/۰۹۴۲



شکل (۱۰): ارزیابی عملکرد رابطه (۴) در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴)



شکل (۱۱): ارزیابی عملکرد رابطه (۸) در مقایسه با مجموعه مشاهدات آزمایشگاهی لئوپاردی (۲۰۰۴)

غالب شدن اثر فشردگی در گرداب شده، به گونه‌ای که منحرف‌کننده‌ی جریان درون شافت باعث جمع‌شدگی هسته‌ی هوای گرداب و حرکت آن به سطح آب می‌شود. همچنین با کمتر شدن نسبت A_d/A_i منحرف‌کننده‌ی جریان، از شدت فرو ریزش کره‌ی بحرانی SSS کاسته شده، بنابراین مجموع این عوامل سبب کاهش نوع و

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی نسبت به بررسی اثر منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده بر ضریب تخلیه سرریزهای نیلوفری در حالت جریان مستغرق پرداخته شد. آزمایش‌ها نشان داد که:

- نصب منحرف‌کننده‌ی جریان در سرریز نیلوفری سبب

- قدرت گرداب می‌شود.
- منحرف‌کننده‌ی جریان و هواده، باعث تسریع در ثبات تغییرات تراز سطح آب مخزن می‌شوند.
 - ضریب تخلیه جریان مستغرق سرریز نیلوفری برخلاف تحقیقات پیشین، به‌شدت به منحرف‌کننده‌ی جریان بستگی دارد به‌گونه‌ای که با کمتر شدن نسبت Ad/Ai ضریب تخلیه سرریز C_s افزایش می‌یابد.
- در نهایت با استفاده از تحلیل نتایج آزمایشگاهی و بهره‌گیری از روش رگرسیون غیرخطی نسبت به معرفی رابطه‌ی عمومی برای تعیین ضریب تخلیه جریان مستغرق C_s سرریزهای نیلوفری با در نظر گرفتن شرایط عدد فرود جریان در روزنه Fr ، اثر منحرف‌کننده‌ی جریان Ad/Ai و هد نسبی S/D_i ، اقدام گردید. سپس به منظور ارزیابی دقت رابطه پیشنهادی، از مطالعات لئوپاردی (۲۰۰۴) استفاده شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. تحلیل نتایج نشان داد که رابطه‌ی پیشنهادی تحقیق حاضر از توابع خطای توصیه شده کمتری در مقایسه با روابط محققین پیشین در تخمین C_s برخوردار است. به بیان دیگر مقدار ریشه میانگین مربعات خطای رابطه پیشنهادی ۰/۰۹۱، در مدل حاجدین (۱۹۷۹) ۰/۱۲۲ و در مدل ساویچ و همکاران (۲۰۱۴) ۰/۱۱۸ تخمین زده شده است.
- دستاوردهای این تحقیق را می‌توان در بازطراحی سرریزهای شفت و نیلوفری با هدف بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و نیز افزایش بازده سرریز در مواقع سیلابی مخزن استفاده کرد. اندازه‌گیری نرخ ورود هوا به سیستم در اثر وقوع گرداب با هسته هوا بسیار پیچیده است و نیاز به ابزارهای خاص و مطالعه عددی گسترده دارد، لذا نویسندگان اثر منحرف‌کننده جریان را بر نرخ نفوذ هوا به سیستم به‌عنوان مطالعات آینده توصیه می‌کنند.
- ### سپاسگزاری
- از دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور به پاس فراهم آوردن امکان استفاده از آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه گروه مهندسی عمران سپاسگزاری می‌شود.
- ### References
- 1- Anwar, H. O., Weller, J. A., & Amphlett, M. B. (1978). "Similarity of free-vortex at horizontal intake". *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 95-105.
 - 2- BUREAU, O. R. (1987). "Design of small dams". Washington, DC: US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation. *A Water Resources Technical Publication*.
 - 3- Chen, S. H., & Chen, M. L. (2015). "Hydraulic structures" (Book). Berlin: Springer.
 - 4- Daggett, L. L., & Keulegan, G. H. (1974). "Similitude in free-surface vortex formations". *Journal of the Hydraulics Division*, 100(11), 1565-1581.
 - 5- Djillali, K., Abderrezak, B., Petrovic, G. A., & Sourenvna, B. E. (2021). Discharge capacity of shaft spillway with a polygonal section: a case study of Djedra dam (East Algeria). *Water Supply*, 21(3), 1202-1215.
 - 6- Esmacili Zadeh, S., Lashkara-Ara, B. (2020). 'Investigation of the Effect of Symmetrical Deflector Angle on Performance of Vertical Intake', *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20(77), pp. 89-110. (In Persian)
 - 7- Gur'yev, A., Khanov, N., Chumicheva, M., Verkhoglyadova, A., Hayek, B., & Brakeni, A. (2021). Improvement of the theory of shaft spillway calculations. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 264, p. 03031). EDP Sciences.
 - 8- Hajdin, G. (1979). "Two contributions to spillway designing based on experimental studies". In *Proceedings of 13th Congress Commission Internationale Des Grand Barrages, New Delhi, India* (pp. 781-788).
 - 9- Knauss, J. (1987). "Swirling Flow Problems at Intakes: Hydraulic Structures Design Manual". *Hydraulic design considerations*. Balkema, Rotterdam.
 - 10- Kocabaş, F., & Yildirim, N. (2002). "Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe". *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 741-752.
 - 11- Lencastre, A., (1979). *Manuel d'Hydraulique Generale* (Book). Eyrolles.
 - 12- Leopardi, M. (2014, May). "Experimental study and design aspects of morning-glory spillways". In *New Developments in Dam Engineering: Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering* (pp. 461-470). CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
 - 13- Mussalli, Y. G. (1969). "A study of flow conditions in shaft spillways" (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
 - 14- Odgaard, A. J. (1986). "Free-surface air core vortex". *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7), 610-620.
 - 15- Savic, L., Kapor, R., Kuzmanovic, V., & Milovanovic, B. (2014, May). "Shaft spillway with deflector downstream of vertical bend". In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 167, No. 5, pp. 269-278). Thomas Telford Ltd.
 - 16- Tastan, K., & Yildirim, N. (2018). Effects of intake geometry on the occurrence of a free-surface vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(4), 04018009.
 - 17- Yang, J., Liu, T., Bottacin-Busolin, A., & Lin, C. (2014). "Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices". *Journal of Hydraulic Research*, 52(4), 523-531.

Effect of deflector and aeration on the discharge coefficient of submerged flow of morning glory spillways

Soroush Esmaeilizadeh*¹
Taha Mirzavand²

Abstract

Spillways are responsible for draining floods in dams. However, morning glory spillways are considered as free spillway type. In floods, a submerged flow is formed in their crest. This factor leads to severe pressure fluctuations in the shaft, suction and vibration of the structure and also reduces the spillway efficiency. Insufficient knowledge of the hydraulics of the submerged flow will be a warning sign for failure and overtopping of the dam. Studies show that the use of ancillary structures in morning glory spillways will improve the flow pattern. In this experimental research, an attempt has been made to investigate the effect of deflector and flow aeration by constructing a physical model and also the parameters affecting the discharge coefficient of submerged flow of morning glory spillways are expanded. Finally, by applying the weight effect of all geometric and hydraulic factors, a nonlinear relationship was introduced to estimate the discharge coefficient. The proposed relation with the RMSE of 0.091, compared to other previous relations (which have errors of 0.122 and 0.118) is able to better predict the discharge coefficient of submerged flow of spillway. The results also show that the discharge coefficient, unlike previous research, is highly dependent on the deflector.

Keywords

Critical submerged depth, Flood, Intake, Orifice, Vortex

¹* Master of Civil Engineering, Technical Supervisor of Balaroud Dam, Dezab Consulting Engineering Company, Khuzestan. soroushesmaeili92@gmail.com

² Bachelor of Fluid Mechanics, Faculty of Engineering, Lorestan University.