

بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی مستطیلی متقارن و نامتقارن

حسین الهی فرا^۱، امید طیاری^{۲*}، نجمه یزدان پناه^۱ و مهدی مؤمنی رق آبادی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۳۱)

چکیده

سرریزهای زیگزاگی با افزایش طول تاج در یک محدوده عرضی مشخص، موجب افزایش ظرفیت آبگذری سرریز می‌شوند. پژوهش حاضر روی یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۸ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری با استفاده از سرریزهای زیگزاگی مستطیلی متقارن و نامتقارن (دوسیکل) انجام گرفت. آنالیز ابعادی به روش باکینگهام نشان داد که ضریب آبگذری (C_d) تابع پارامترهایی مانند نسبت هد هیدرولیکی کل (H_t/P)، نسبت عرض سیکل چپ به راست (WL/WR)، نسبت طول تاج جانبی سرریز (B/W_{avg}) و فاکتور شکل سرریز (Se) است. نتایج نشان داد که افزایش هد هیدرولیکی باعث کاهش ضریب آبگذری در سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن و نیز سرریز خطی می‌شود. سرریزهای زیگزاگی نامتقارن با ($WL/WR=2/0.5$) در مقایسه با سرریز زیگزاگی متقارن با ($WL/WR=1$)، عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تری داشت. از نظر کمی می‌توان بیان داشت ضریب آبگذری سرریز زیگزاگی با ($B/W_{avg}=3/1$) در مقایسه با ($B/W_{avg}=2/93$) و ($B/W_{avg}=2/76$) به ترتیب در حدود ۲۱ درصد و ۹۴ درصد بیشتر است. ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی با ($WL/WR=2/0.5$) در مقایسه با ($WL/WR=1$) حدود ۱۰ تا ۲۷ درصد بیشتر است. ضریب آبگذری سرریز خطی نیز در حدود ۶۰ تا ۲۵۰ درصد در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن، ضریب آبگذری، نسبت عرض سیکل سرریز، ظرفیت آبگذری، استغراق موضعی

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

۲. گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: tayari@iauk.ac.ir

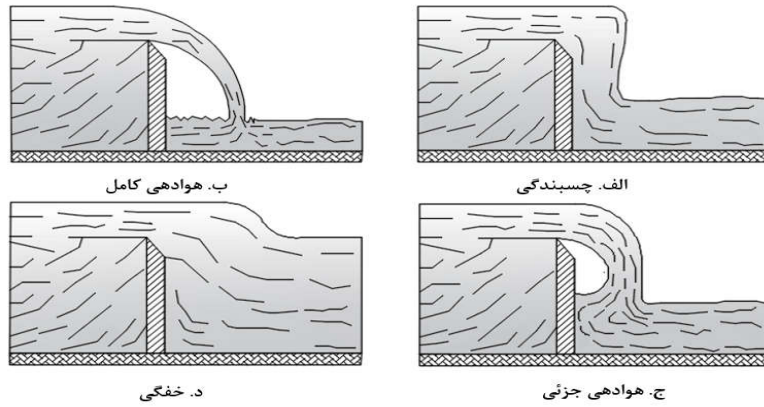
مقدمه

طولی سرریز را نشان می‌دهد.

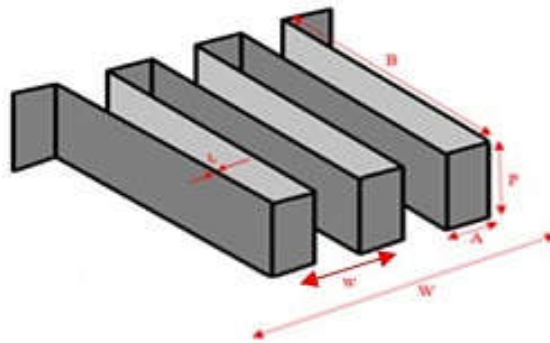
در شکل (۲)، w عرض یک سیکل از سرریز، P ارتفاع سرریز، t_s ضخامت تاج سرریز، B طول بال (تاج) جانبی سرریز، A عرض دماغه سرریز و W عرض کل سرریز است. مشکواتی تروجنی و همکاران (۱۵) به بررسی آزمایشگاهی ضریب آبگذری در سرریزهای زیگزاگی ذوزنقه‌ای پرداختند که نتایج نشان داد برای یک طول مشخص از سرریز و در یک Ht/P ثابت، با افزایش ارتفاع سرریز، ضریب آبگذری روند کاهشی خواهد داشت؛ همچنین در یک عدد فرود ثابت، عمق آب بالادست سرریز خطی، تقریباً $2/8$ برابر بیشتر از سرریز زیگزاگی و ظرفیت آبگذری سرریز زیگزاگی ذوزنقه‌ای به‌طور متوسط، $2/94$ برابر بیشتر از سرریز خطی است (۱۵). ماجدی اصل و فولادی پناه (۱۴) بیان داشتند که محور تاج سرریزهای زیگزاگی بصورت مستقیم بوده و در نمایش سطح افقی، سرریز از دیواره‌های متصل به هم تشکیل می‌شود؛ سرریزهای زیگزاگی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور حداکثر ظرفیت آبگذری محتمل با مشکل مواجه هستند مطرح می‌شوند. گبهاردت و همکاران (۵) سرریزهای جانبی و زیگزاگی در رودخانه ایلمونا را مطالعه کردند. آنها رابطه دبی-اشل را برای سرریزهای جانبی و زیگزاگی ذوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی بصورت تجربی برای شرایط جریان آزاد و مستغرق ارزیابی کردند. براساس نتایج این پژوهش، سرریز زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیشتر می‌تواند جریان بیش‌تری را به‌ازای هد هیدرولیکی کمتر عبور دهد و در مقابل، هد بالادست سرریز زیگزاگی در مواقع سیلابی بیشتر از یک سرریز جانبی است. ضمن آنکه سرریز جانبی در شرایط جریان مستغرق بهتر عمل می‌کند. بلزنر و همکاران (۳) با در نظر گرفتن شرایط جریان آزاد و مستغرق در سرریزهای کلیدپیانویی و زیگزاگی، به مطالعه این سرریزها در آبراه آلمان پرداختند. آنها در پژوهش خود از مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای و سرریزهای کلیدپیانویی بهره گرفتند. نتایج نشان داد که حساسیت به استغراق در سرریزهای زیگزاگی ذوزنقه‌ای و

سرریزهای زیگزاگی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای کنترل جریان و نیز افزایش ظرفیت آبگذری در یک عرض ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سرریزها می‌توانند در پلان با اشکال هندسی مثلثی، مستطیلی و یا ذوزنقه‌ای اجرا و مورد استفاده قرار گیرند. شرایط هیدرولیکی جریان در سرریزهای زیگزاگی با افزایش هد هیدرولیکی در چهار مرحله اساسی قابل تفکیک است (۹؛ الف) مرحله چسبندگی که هد هیدرولیکی روی تاج سرریز (H) ناچیز بوده و جریان به‌طور آزاد از تمام طول تاج آن عبور می‌کند، (ب) مرحله هوادهی کامل که با افزایش مقدار (H)، سطح آب در کانال پایین‌دست سرریز (بخصوص بین تیغه جریان و دیواره پایین‌دست سرریز) افزایش می‌یابد که به دلیل تداخل و فشردگی تیغه‌های جریان در قسمت دماغه بالادست، هوادهی به میزان اندکی در زیر تیغه جریان محدود می‌شود که نتیجه آن کاهش ضریب آبگذری است. (ج) مرحله انتقال (هوادهی جزئی) که با افزایش بیشتر (H)، تیغه‌های ریزشی جریان در بخش‌هایی از طول تاج فشرده‌تر شده و عمق آب در کانال پایین‌دست نیز افزایش می‌یابد. (د) مرحله فشردگی (خفگی)، سرانجام با افزایش بسیار زیاد مقدار (H)، تیغه جریان عبوری از روی سرریز به صورت یک تیغه فشرده و بدون حباب هوا در می‌آید و با افزایش این روند، سرریز زیگزاگی به استغراق کامل خواهد رسید، که این شرایط موجب محدود شدن کارایی هیدرولیکی آن می‌شود. شکل (۱)، شرایط هیدرولیکی جریان بر روی سرریز را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی سرریزهای زیگزاگی در هدهای هیدرولیکی پایین، عملکرد مطلوبی دارند ولی با افزایش ظرفیت آبگذری، به دلیل تداخل تیغه‌های جریان در دهانه‌های خروجی سرریز، کارایی هیدرولیکی آن کاهش می‌یابد. ضریب آبگذری در این سرریزها به عوامل متعددی از قبیل هد هیدرولیکی روی سرریز، زاویه دیواره‌ها، ضخامت و شکل تاج سرریز بستگی دارد (۷ و ۱۸). شکل (۲) عوامل اصلی هندسی و هیدرولیکی سرریز زیگزاگی مستطیلی در قالب نمای سه‌بعدی، پلان و پروفیل



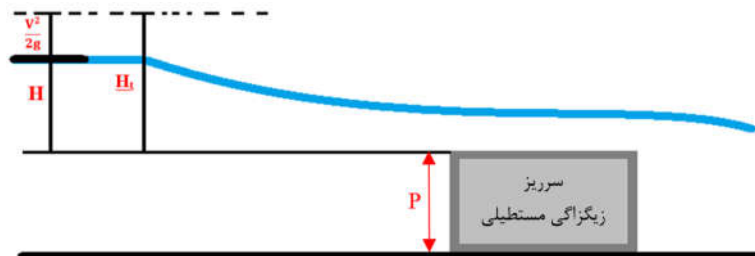
شکل ۱. شرایط هیدرولیکی جریان بر روی سرریز



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. الف) نمای سه بعدی، ب) پلان و ج) پروفیل طولی در سرریز زیگزاگی

بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن استفاده شده است. آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک و رسوب خوزستان و بر روی یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۸ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر انجام شد. شکل (۳)، پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جریان مورد نیاز فلوم از طریق یک پمپ کف‌کش (۶ اینچ) که در مخزن زیرزمینی قرار داشت به هد تانک با ارتفاع ۶ متر منتقل می‌شد، جریان خروجی از هد تانک به سمت فلوم با استفاده از یک شیر پروانه‌ای به قطر ۲۵۰ میلی‌متر قابل کنترل بود و انتقال جریان نیز با استفاده از لوله پلی‌اتیلن انجام می‌شد. شکل (۴) اجزای تشکیل دهنده فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

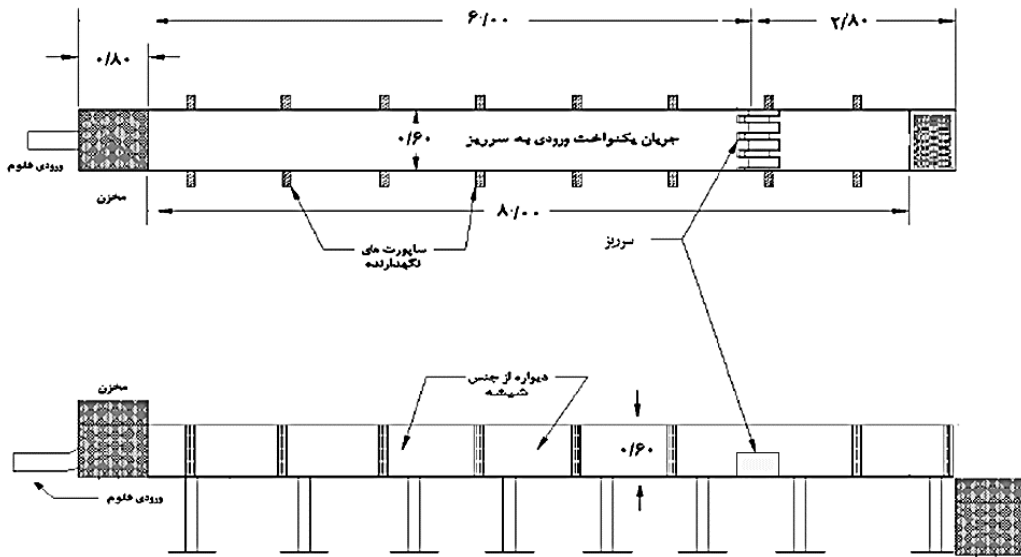
روش انجام آزمایش‌ها در پژوهش حاضر بدین صورت بود که پس از روشن کردن پمپ و انتظار به مدت ۱۵ دقیقه جریان یکنواخت در فلوم برقرار شد. میزان جریان ورودی به فلوم با استفاده از یک سرریز مثلثی لبه تیز و نیز به کمک مانومتر کنترل و اندازه‌گیری می‌شد. طبق نظر باس (۴) قرائت هد هیدرولیکی در بالادست سرریز می‌بایست در فاصله ۳ تا ۴ برابر حداکثر هد هیدرولیکی بر روی سرریز باشد، از این‌رو برداشت و قرائت اطلاعات هیدرولیکی جریان از هدهای هیدرولیکی مختلف، در ۲ نقطه و به فواصل ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر از بالادست سرریز انجام گرفت. برای برقراری شرایط استغراق باید تراز پایاب سرریز با تراز تاج سرریز برابر شود، در این حالت گفته می‌شود که سرریز به آستانه استغراق رسیده و دبی در آن حالت، دبی آستانه استغراق نامیده می‌شود و دبی‌هایی که باعث شوند تراز پایاب بالاتر از تراز تاج سرریز قرار گیرد و سازه را کاملاً مستغرق کند، دبی‌های مستغرق محسوب می‌شوند. در این پژوهش تمام آزمایش‌ها بدون کنترل پایین‌دست انجام شد. مدل فیزیکی سرریزهای زیگزاگی از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۳ میلیمتر ساخته شدند و نصب آنها بر روی کف فلوم در فاصله ۶ متری از ابتدای آن انجام شد تا از تأثیر منفی تغییرات لحظه‌ای

مستطیلی نسبت به کلیدپیانویی و سرریز زیگزاگی مثلثی بیشتر است اما سرریز زیگزاگی مثلثی راندمان هیدرولیکی کمتری دارد. عظیمی و همکاران (۲) به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی در شرایط هیدرولیکی آزاد و مستغرق با استفاده از ۹ مدل با نسبت طول به عرض متفاوت از ۰/۲۵ تا ۳ ($a/b=0.25-3$) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد ضریب آبگذری با افزایش سرعت آستانه و نسبت (a/b) ، کاهش می‌یابد. همچنین، سرریز زیگزاگی مستطیلی در نسبت‌های $(h_0/P < 0.4)$ ، دارای کارایی هیدرولیکی بیشتری نسبت به سرریز خطی لبه تیز بوده و حساسیت بیشتری به استغراق نشان می‌دهد. در شرایط استغراق، ظرفیت آبگذری سرریز زیگزاگی مستطیلی نسبت به سرریز خطی لبه تیز برای $(a/b > 1)$ و $(a/b < 1)$ ، به ترتیب به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. قادری و همکاران (۶) با استفاده از نرم افزار FLOW-3D به بررسی تأثیر کانال‌های متفاوت بر ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که شیب کف برابر ۴ درصد ($\beta=4\%$) به همراه زاویه دیواره کانال همگرا برابر ۱۰ درجه ($\theta=10^\circ$) دارای بالاترین مقدار ضریب آبگذری هستند. بنابراین، تغییر شیب کف و زاویه دیواره کانال سرریز ضریب آبگذری را افزایش می‌دهد و باید این پارامترها در طراحی سرریز زیگزاگی لحاظ شوند. در مجموع می‌توان بیان داشت که تاکنون پژوهش‌های خاصی بر روی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی نامتقارن (دارای عرض سیکل غیریکنواخت) انجام نشده و لازم است تا در این زمینه پژوهش‌های بیشتری انجام شود.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی

با توجه به پیچیدگی الگوی جریان و تأثیر عوامل مختلف بر هیدرولیک جریان، مناسب‌ترین روش برای بررسی و مطالعه سرریزهای زیگزاگی، استفاده از روش تجربی یا آزمایشگاهی است. از این‌رو در پژوهش حاضر از روش آزمایشگاهی برای



شکل ۳. پلان و پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی در پژوهش حاضر



شکل ۴. اجزای تشکیل دهنده فلوم آزمایشگاهی در پژوهش حاضر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

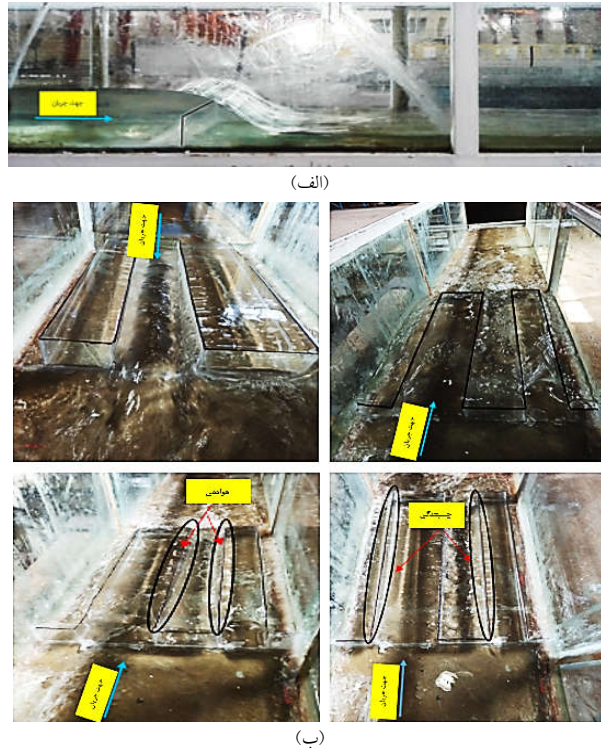
آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

سطح آب بر دقت قرائت هد هیدرولیکی، جلوگیری به عمل آید. شکل (۵)، مدل فیزیکی سرریزهای ساخته شده در پژوهش حاضر را نشان می دهد.

آنالیز ابعادی

یکی از ابزارهای اولیه جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی، آنالیز ابعادی است که هدف آن تعیین نسبت های بدون بعد است. بدین منظور در اولین گام باید متغیرهای مؤثر بر میزان آگذری سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن مشخص شوند و سپس

مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی
در پژوهش حاضر برای درک بهتر ابعاد و طراحی مدل های فیزیکی سرریزهای زیگزاگی، مشخصات هندسی و هیدرولیکی



شکل ۵. مدل فیزیکی سرریزهای ساخته شده در پژوهش حاضر، الف) خطی و ب) زیگزاگی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در رابطه (۲)، ضریب آبگذری (C_d) تابع پارامترهایی همچون Q دبی جریان، B طول تاج جانبی سرریز، S شیب کانال، WL عرض سیکل چپ سرریز، WR عرض سیکل راست سرریز، W_{avg} عرض متوسط سیکل های چپ و راست، W عرض کل سرریز، t_s ضخامت تاج سرریز، P ارتفاع سرریز، N تعداد سیکل، H_t هد هیدرولیکی کل، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی سیال، σ کشش سطحی سیال و S_e فاکتور شکل سرریز (زیگزاگی یا خطی) است. برای تحلیل ابعادی، پارامترهای Q ، ρ و P به عنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفته شدند و در نتیجه پارامترهای بی بعد در رابطه (۳) نشان داده شده است.

(۳)

$$C_d = f(B/P, t_s/P, WL/P, WR/P, W_{avg}/P, N, H_t/P, S, gP^5/Q^2, \mu P/\rho Q, W/P, \sigma/\rho P, S_e)$$

در این پژوهش، پارامترهای بی بعدی مانند شیب کانال (S)، ضخامت تاج سرریز (t_s/P)، عرض کل سرریز (W/P) و تعداد

با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای بدون بعد تعیین شوند. پس از تعیین پارامترهای بدون بعد، می توان نحوه تأثیرگذاری آنها بر میزان آبگذری سرریزها را مورد بررسی قرار داد و به نتایج منطقی و مناسبی بین آنها دست یافت. رابطه (۱)، فرمول عمومی محاسبه ظرفیت آبگذری سرریزها است که توسط تولیس و همکاران (۱۸) برای سرریزهای زیگزاگی بکار گرفته شد.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_t^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q ظرفیت آبگذری سرریز، L طول کل تاج سرریز، g شتاب ثقل، H_t هد هیدرولیکی کل و C_d ضریب آبگذری بدون بعد است که مقدار آن با انجام آزمایش تعیین می شود. پارامترهای مؤثر بر ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی در رابطه (۲) نشان داده شده است.

(۲)

$$C_d = f(Q, B, S, WL, WR, W, W_{avg}, t_s, P, N, H_t, g, \mu, \rho, \sigma, S_e)$$

جدول ۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی در تحقیق حاضر

تعداد آزمایش	تعداد ذره	ارتفاع سرریز (cm)	تعداد سیکل	ضخامت تاج سرریز (mm)	نسبت طول تاج جانبی سرریز	عرض متوسط سیکل های چپ و راست (cm)	نسبت عرض سیکل چپ به سیکل راست	عرض سیکل راست سرریز (cm)	عرض سیکل چپ سرریز (cm)	عرض کل سرریز (cm)	طول تاج جانبی سرریز (cm)	شماره مدل	فاکتور شکل سرریز
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۲/۷۶	۲۹	۱	۲۹	۲۹	۵۸	۸۰	۱	زیگزاگی مستطیلی
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۲/۹۳	۲۹	۱	۲۹	۲۹	۵۸	۸۵	۲	متقارن
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۳/۱	۲۹	۱	۲۹	۲۹	۵۸	۹۰	۳	زیگزاگی مستطیلی
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۲/۷۶	۲۹	۲/۰۵	۱۹	۳۹	۵۸	۸۰	۴	نامتقارن
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۲/۹۳	۲۹	۲/۰۵	۱۹	۳۹	۵۸	۸۵	۵	خطی
۱۲	۱۲	۱۰	۲	۳	۳/۱	۲۹	۲/۰۵	۱۹	۳۹	۵۸	۹۰	۶	
۱۲	۱۲	۱۰	-	۳	-	-	-	-	-	۵۸	-	۷	

بررسی تأثیر نسبت طول تاج جانبی (B/W_{avg}) بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی متقارن و نامتقارن در مقایسه با سرریز خطی شکل (۶- الف و ب) نشان می‌دهد در سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن با افزایش هد هیدرولیکی از ۰/۰۶ تا ۰/۷۲، مقدار ضریب آبگذری از ۱ تا ۰/۲ کاهش می‌یابد. افزایش هد هیدرولیکی باعث تداخل تیغه‌های جریان در دهانه‌های خروجی سرریز می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار (B/W_{avg})، میزان ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. به‌طور کلی ($B/W_{avg}=2/76$) دارای پایداری و عملکرد هیدرولیکی مناسب تری در مقایسه با ($B/W_{avg}=2/93$) و ($B/W_{avg}=3/1$) است به عبارت دیگر کاهش مقدار (B/W_{avg}) باعث افزایش مقدار ضریب آبگذری می‌شود. مقادیر ($B/W_{avg}=2/93$) و ($B/W_{avg}=3/1$) در نسبت‌های هد هیدرولیکی تقریباً کمتر از ۰/۲ ($H_t/P < 0/2$)، دارای ضریب آبگذری بیشتری در مقایسه با مقدار ($B/W_{avg}=2/76$) هستند. سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن، مراحل هیدرولیکی شامل چسبندگی، هوادهی کامل، هوادهی جزئی و خفگی را طی کرده‌اند. با توجه به شکل (۶- الف و ب)، سرریزها به‌طور متوسط از نسبت هد هیدرولیکی ۰/۰۵ تا ۰/۲۷ در مرحله چسبندگی و هوادهی کامل، از ۰/۲۷ تا ۰/۵۵ در مرحله هوادهی جزئی و از ۰/۵۵ تا ۰/۷۷ در مرحله خفگی قرار دارند (۱۳). سرریزهای زیگزاگی نامتقارن با ($WL/WR=2/05$) در شکل (۶- ب)، دارای پایداری و عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تری در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی متقارن با ($WL/WR=1$) در شکل (۶- الف) هستند. افزایش هد هیدرولیکی در سرریز خطی باعث کاهش ضریب آبگذری شده و برای سرریز خطی، افزایش مقادیر هد هیدرولیکی از ۰/۲ تا ۱/۲۷ و کاهش ضریب آبگذری از ۰/۸۱ تا ۰/۶۷ بوده است. اختلاف ناچیز بین مقادیر ضریب آبگذری یا به عبارت دیگر شیب خیلی کم خط هیدرولیکی در سرریز خطی نشان می‌دهد که سرریز دامنه تغییرات قابل توجهی در مرحله هوادهی کامل ندارد و به‌سرعت

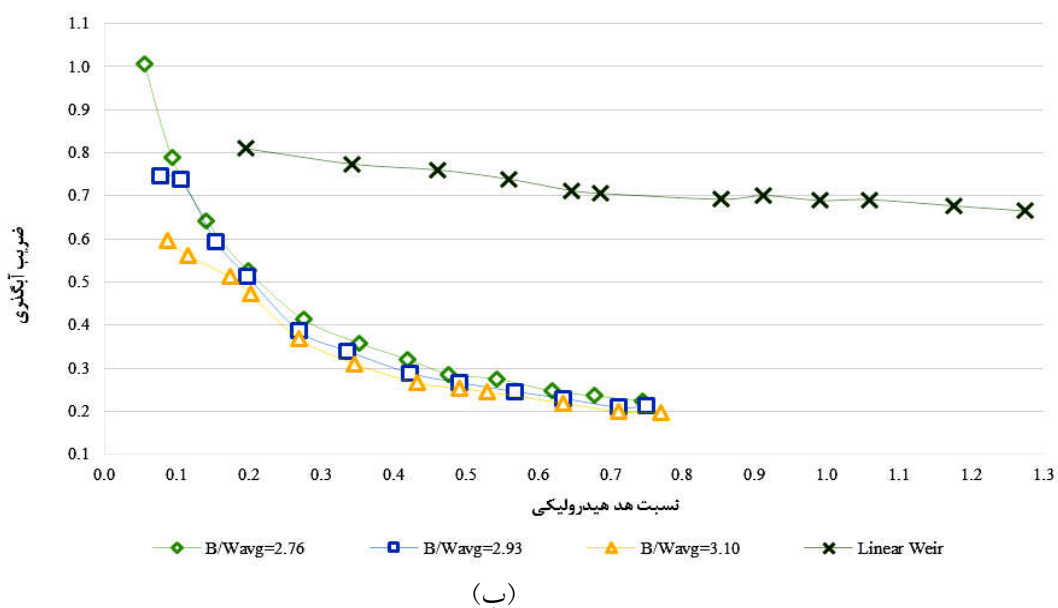
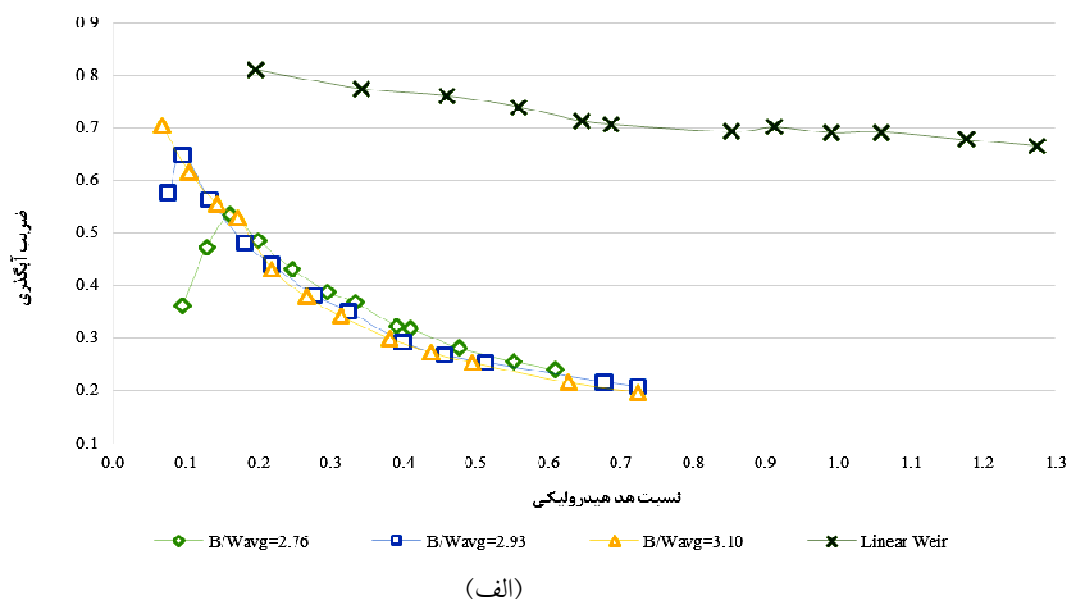
سیکل (N) ثابت بودند، بنابراین، حذف و با توجه به آشفته‌بودن جریان و بالابودن عمق جریان در کانال، از اثر عدد بی‌بعد رینولدز ($\mu P/\rho Q$) و عدد ویر ($\sigma/\rho P$) نیز چشم‌پوشی شد (۸). اما تأثیر شتاب ثقل (gP^5/Q^2) که بیان‌کننده عدد فرود است در پارامتر بی‌بعد (H_t/P) در نظر گرفته شد. با ترکیب عرض سیکل چپ سرریز (WL/P) و عرض سیکل راست (WR/P) پارامتر بی‌بعد و متغیر، نسبت عرض سیکل چپ به راست (WL/WR) و با ترکیب طول تاج جانبی سرریز (B/P) و عرض متوسط سیکل چپ و راست (W_{avg}/P) پارامتر بی‌بعد و متغیر (B/W_{avg}) بدست آمد. چنانچه، رژیم جریان در محدوده آشفته و هد هیدرولیکی روی سرریز از یک مقدار ویژه کمتر نباشد، می‌توان از اثر نیروی لزجت و کشش سطحی چشم‌پوشی کرد. اغلب مراجع از جمله انجمن مهندسين آمریکا (۱)، حداقل هد هیدرولیکی برابر ۲/۵ سانتی‌متر را برای این‌منظور توصیه کرده‌اند. در نهایت، پس از حذف پارامترهای ثابت بی‌بعد، رابطه (۴) به‌عنوان رابطه بی‌بعد نهایی برای محاسبه ضریب آبگذری در پژوهش حاضر ارائه شد.

$$C_d = f(WL/WR, H_t/P, B/W_{avg}, S_e) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، (C_d) معرف ضریب آبگذری، (H_t/P) معرف نسبت هد هیدرولیکی کل (هد هیدرولیکی کل به ارتفاع سرریز)، (WL/WR) معرف نسبت عرض سیکل چپ به راست، (B/W_{avg}) معرف نسبت طول تاج جانبی سرریز (طول تاج جانبی سرریز به عرض متوسط سیکل سرریز) و (S_e) معرف فاکتور شکل سرریز است.

نتایج و بحث

در این پژوهش با روش آزمایشگاهی، عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی متقارن و نامتقارن در مقایسه با سرریز خطی بررسی شد. در سرریزهای متقارن بر خلاف سرریزهای نامتقارن نسبت عرض سیکل برابر ۱ است ($WL/WR=1$).



شکل ۶. مقادیر C_d در مقابل H_t/P برای نسبت های مختلف B/W_{avg} : الف) $WL/WR=1$ و ب) $WL/WR=2.05$

آبگذری سرریز زیگزاگی با $(B/W_{avg}=3/1)$ در مقایسه با $(B/W_{avg}=2/93)$ و $(B/W_{avg}=2/76)$ به ترتیب در حدود ۲۱ درصد و ۹۴ درصد بیشتر و ضریب آبگذری سرریز خطی نیز در حدود ۶۰ تا ۲۵۰ درصد در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی بیشتر است؛ مقدار ۲۵۰ درصد مربوط به $(H_t/P=0/7)$ و مقدار

وارد مرحله خفگی می شود و در نتیجه کارایی هیدرولیکی سرریز از بین می رود. از نظر کمی باید بیان داشت که سرریزهای شکل (۷-الف) برای $(H_t/P < 0/2)$ دارای عملکرد هیدرولیکی مجزایی هستند و پس از این مقدار عملکرد آنها تقریباً مشابه یکدیگر می شود؛ همچنین در $(H_t/P=0/1)$ ضریب

هیدرولیکی نشان‌دهنده استغراق سریع و شدید سرریز است که باعث از بین رفتن کارایی هیدرولیکی آن شده است. در شکل (۸-الف) و برای $(0/2 < Ht/P < 0/1)$ ، ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی با $(WL/WR=2/05)$ در مقایسه با $(WL/WR=1)$ در حدود ۱۰ تا ۱۶۳ درصد بیشتر است. ضریب آبگذری سرریز خطی در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی برای $(Ht/P=0/2)$ و $(Ht/P=0/75)$ ، به ترتیب در حدود ۶۰ درصد و ۱۸۰ درصد بیشتر است. در شکل (۷-ب) و برای $(0/2 < Ht/P < 0/1)$ ، ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی با $(WL/WR=2/05)$ در مقایسه با $(WL/WR=1)$ در حدود ۱۰ تا ۲۷ درصد بیشتر است. برای مقادیر $(Ht/P > 0/3)$ ، سرریزها شرایط هیدرولیکی یکسانی دارند. ضریب آبگذری سرریز خطی نیز در حدود ۶۰ تا ۲۵۰ درصد در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی بیشتر است. در شکل (۷-ج) و برای $(0/2 < Ht/P < 0/1)$ ، ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی با $(WL/WR=2/05)$ در مقایسه با $(WL/WR=1)$ در حدود ۱۶۷ درصد بیشتر است. ضریب آبگذری سرریز خطی نیز در حدود ۶۰ تا ۲۵۰ درصد در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی بیشتر است.

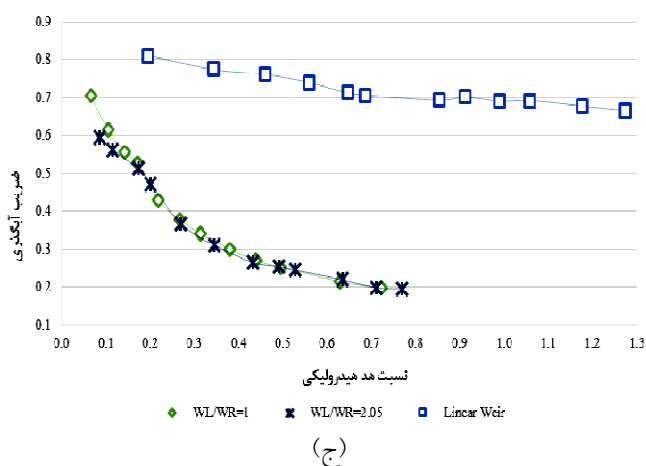
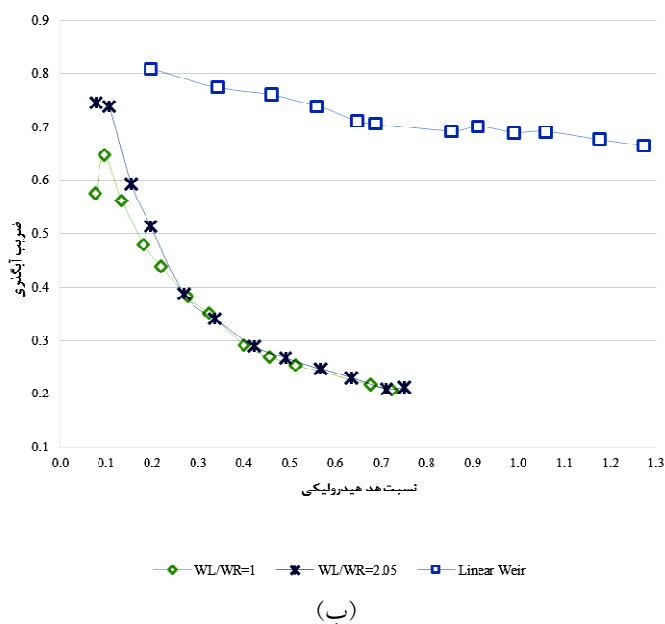
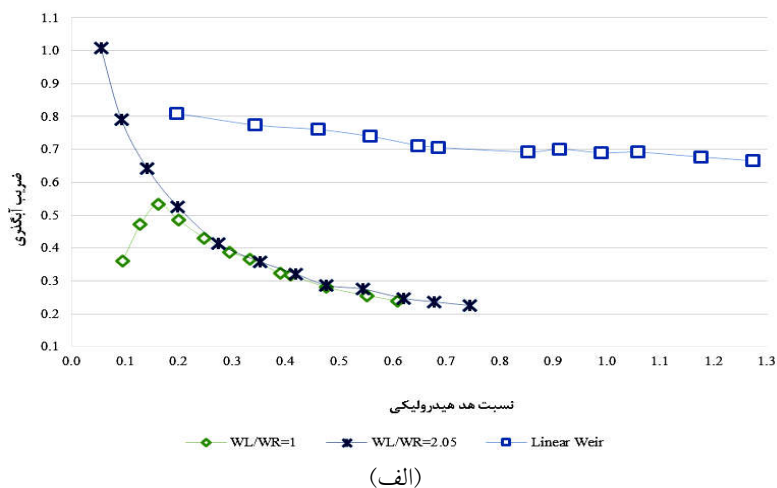
تعیین ضریب آبگذری با استفاده از تحلیل آماری

برای تعیین رابطه ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی از نرم‌افزار SPSS که یک نرم افزار تحلیل آماری کاربردی با قابلیت تقریب تابع بین دو یا چند متغیر است، استفاده شد. برای بدست آوردن بهترین معادله، توابع مختلف برای متغیر وابسته (Cd) در ارتباط با متغیرهای مستقل $(Ht/P, WL/WR, B/W_{avg})$ استخراج شد. در شکل (۸-الف، ب و ج) نمودار پراکنش ماتریسی و نمودار رگرسیون استاندارد باقیمانده و هیستوگرام هر یک از متغیرهای مستقل $(Ht/P, WL/WR, B/W_{avg})$ در مقابل متغیر وابسته (Cd) رسم شده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که در قسمت الف) پراکنش ماتریسی داده‌ها، بخوبی صورت پذیرفته

۶۰ درصد مربوط به $(Ht/P=0/2)$ است. در شکل (۶-ب)، ضریب آبگذری سرریز زیگزاگی با $(B/W_{avg}=3/1)$ در مقایسه با $(B/W_{avg}=2/93)$ و $(B/W_{avg}=2/76)$ به ترتیب در حدود ۳۵ درصد و ۶۶۷ درصد بیشتر است. پس از مقدار $(Ht/P > 0/4)$ ، سرریزها شرایط هیدرولیکی مشابهی دارند. سرریز خطی در حدود ۶۰ تا ۲۵۰ درصد در $(Ht/P=0/2)$ و $(Ht/P=0/75)$ ضریب آبگذری بیشتری دارد.

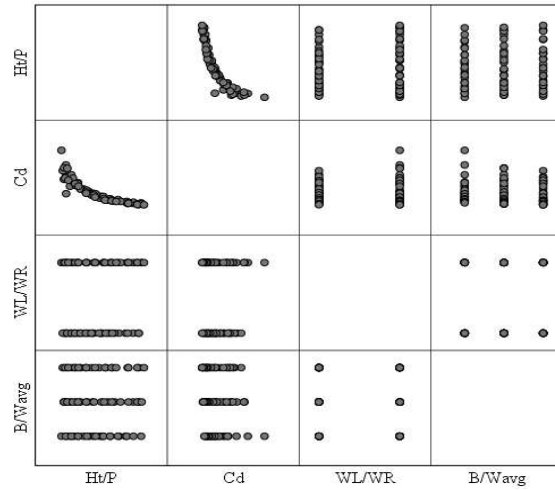
بررسی تأثیر نسبت عرض سیکل (WL/WR) بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی مستطیلی متقارن و نامتقارن در مقایسه با سرریز خطی

شکل (۷-الف، ب و ج) نشان می‌دهد افزایش هد هیدرولیکی در سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن باعث کاهش ضریب آبگذری در آنها می‌شود. همچنین این سرریزها از تمامی مراحل هیدرولیکی (چسبندگی، هوادهی کامل، هوادهی جزئی و خفگی) عبور کرده‌اند که نشان‌دهنده طراحی هیدرولیکی صحیح و نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب سرریزها است. این شکل نشان می‌دهد که سرریزهای زیگزاگی نامتقارن $(WL/WR=2/05)$ دارای ضریب آبگذری بیشتری نسبت به سرریزهای زیگزاگی متقارن $(WL/WR=1)$ هستند که دلیل آن طراحی مناسب پارامترهای هندسی سرریز زیگزاگی نامتقارن بوده که منجر به افزایش کارایی هیدرولیکی آن شده است. به عبارت دیگر افزایش مقدار (WL/WR) باعث افزایش مقدار ضریب آبگذری می‌شود. سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن به طور متوسط برای نسبت‌های هد هیدرولیکی $0/05$ تا $0/27$ در مرحله چسبندگی و هوادهی کامل، از مقدار $0/27$ تا $0/55$ در مرحله هوادهی جزئی و از مقدار $0/55$ تا $0/77$ در مرحله خفگی قرار دارند. این سرریزها با $(B/W_{avg}=2/76)$ در مقایسه با $(B/W_{avg}=2/93)$ و $(B/W_{avg}=3/1)$ ، دارای ضریب آبگذری، کارایی و پایداری هیدرولیکی بیشتر و کنترل هیدرولیکی مناسب‌تری هستند. در سرریز خطی با افزایش هد هیدرولیکی از میزان ضریب آبگذری کم می‌شود. شیب خیلی ملایم خط

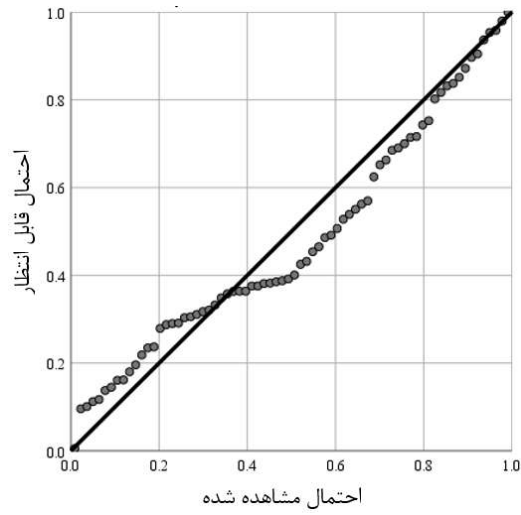


شکل ۷. مقادیر C_d در مقابل H_t/P برای نسبت های مختلف WL/WR :

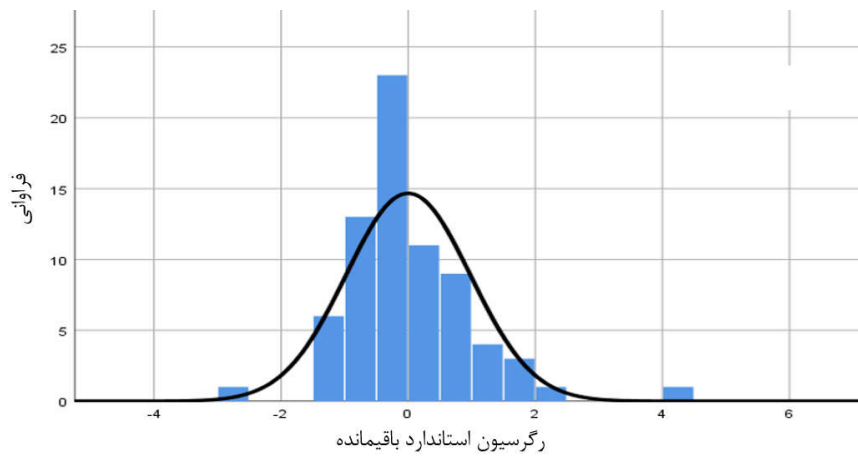
(الف) $B/W_{avg}=2.76$ ، (ب) $B/W_{avg}=2.93$ ، (ج) $B/W_{avg}=3.1$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. الف) نمودار پراکنش ماتریسی، ب) نمودار رگرسیون استاندارد باقیمانده و ج) هیستوگرام

جدول ۲. ویژگی‌های آماری رابطه ارائه شده

شماره	Durbin-Watson	Sig.	Sum of Squares	df	F	Mean	R ^۲
۱	۰/۵۳۵	۰	۱/۶۳۹	۳	۸۳/۶۳۲	۰/۵۴۶	۰/۷۸۷

عملکرد بهتری برخوردار است (۱۸). با توجه به مطالبی که بیان شد در نهایت ضریب نش- ساتکلیف در این پژوهش برابر ۰/۸۹۸ بدست آمد.

مقایسه پژوهش حاضر با دیگر پژوهشگران

به منظور تحلیل نتایج ارایه شده، مقایسه‌ای بین نتایج این پژوهش با مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگران دیگر از جمله رستمی و همکاران (۱۷) انجام شد. شکل (۱۰) نتایج پژوهش حاضر را با پژوهش رستمی و همکاران (۱۷) نشان می‌دهد. حداکثر ضریب آگذری در پژوهش رستمی و همکاران (۱۷) برای (۳ = w/p) اتفاق افتاده است که ضریب آگذری برابر ۰/۵۳ را نتیجه داده است. از سوی دیگر حداکثر ضریب آگذری در پژوهش حاضر برابر ۰/۷۴ و حدود ۸۵ درصد بیشتر از پژوهش رستمی و همکاران (۱۷) بوده است. این افزایش ضریب آگذری به دلیل وجود نامتقارنی در سیکل‌های ورودی و خروجی در پژوهش حاضر است که موجب شده در نسبت‌های هد هیدرولیکی پایین عملکرد خوبی از خود نسبت به پژوهش مذکور از خود نشان دهد، اما در ادامه به تدریج با افزایش هد هیدرولیکی و ایجاد افت انرژی و تداخل تیغه‌های جریان با یکدیگر مقادیر ضریب آگذری در پژوهش حاضر نسبت به پژوهش رستمی و همکاران (۱۷) کمتر می‌شود.

نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی آزمایشگاهی ضریب آگذری سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن و مقایسه آنها با سرریز خطی بود که نتایج آن در ادامه این بخش ارائه می‌شود.

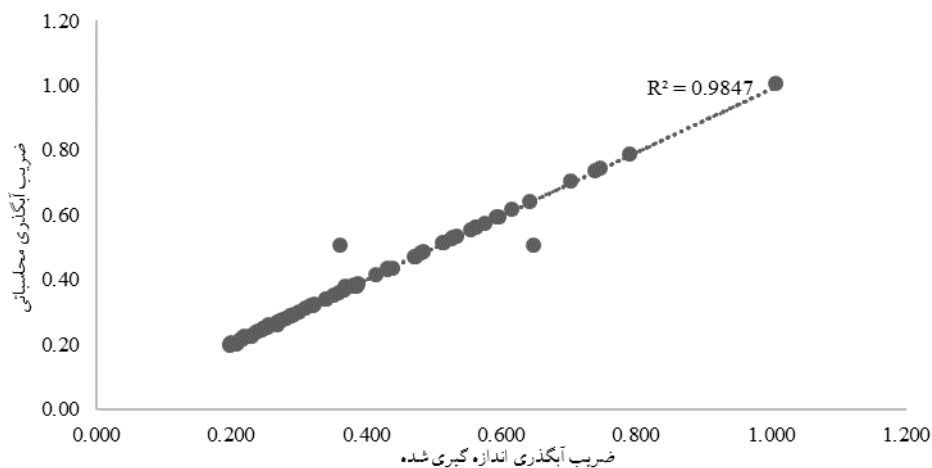
است، از طرفی نیز در قسمت ب) نمودار رگرسیون استاندارد نشان‌دهنده برازش مناسب بین داده‌های مشاهداتی با داده‌های پیش‌بینی شده است و در نهایت نیز در قسمت ج) هستوگرام نشان‌دهنده توالی مناسب داده‌ها است چراکه هیچگونه فاصله‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی مشاهده نمی‌شود.

داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از روش Stepwise مدل‌سازی شد که به وسیله آن رابطه (۵) حاصل شد، ضمن آنکه ویژگی‌های آماری این روش نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

$$Cd = 0/804 - 0/718 Ht/P + 0/051 WL/WR - 0/079B/Wavg \quad (5)$$

شکل (۹) مقادیر Cd اندازه‌گیری شده را در برابر مقادیر Cd محاسبه شده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر Cd اندازه‌گیری شده و محاسباتی با ضریب اطمینان ۹۸٪ با یکدیگر همپوشانی دارند، از این رو می‌توان بیان کرد که رابطه (۵) برای محاسبه ضریب آگذری سرریز زیگزاگی مناسب است. از سوی دیگر مقادیر RMSE=0.041 و NRMSE=0.073 است.

باید بیان داشت در راستای تحلیل آماری بعمل آمده، برای ارزیابی دقت آنالیز آماری از معیار نش- ساتکلیف استفاده شد (۱۶). ضریب نش- ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد (۱۶)؛ و اگر مقدار آن بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شود و چنانچه مقدار این ضریب بین ۰/۳۶-۰/۷۵ باشد نتایج مدل خوب تا متوسط به شمار می‌رود (۱۷). در واقع هر چه مقدار ضریب نش- ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر شود، مدل از



شکل ۹. مقادیر Cd اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر Cd محاسبه‌شده

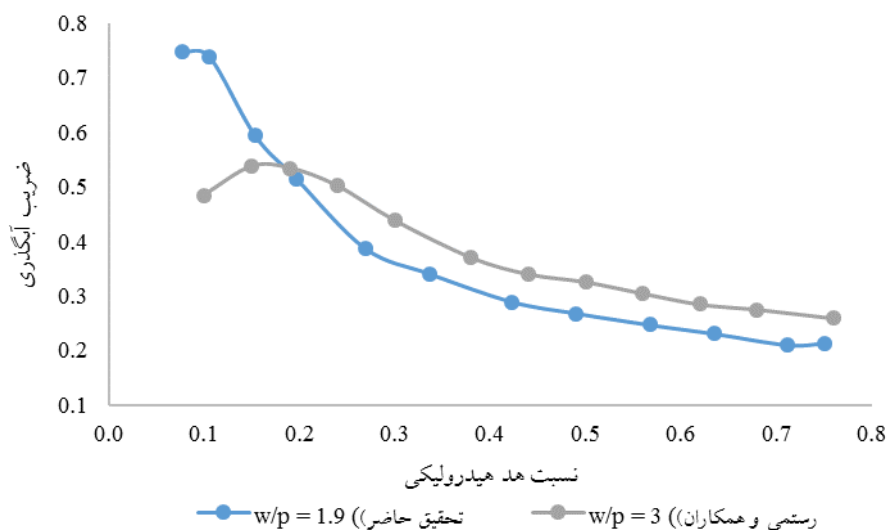
ناشی از کاویتاسیون در هدهای هیدرولیکی بالا و خیلی کم است.

– با افزایش هد هیدرولیکی در سرریز خطی، مقدار ضریب آنگذری کاهش می‌یابد. مقادیر ضریب آنگذری در سرریز خطی از ۱/۲۷ تا ۰/۲ و مقادیر نسبت هد هیدرولیکی از ۰/۶۷ تا ۰/۸۱ متغیر است. سرریز خطی دارای ضریب آنگذری بیشتری نسبت به سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن است اما این شرایط به دلایل هیدرولیکی، امری تعیین‌کننده برای نشان‌دادن برتری سرریز خطی در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی متقارن و نامتقارن نیست. شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهند سرریز خطی دارای کنترل، پایداری و کارایی هیدرولیکی مناسب نیست و همین امر باعث شده مقادیر ضریب آنگذری در این سرریز با شیب بسیار ملایمی روند کاهشی داشته باشند و نیز در زمان کمتری به مرحله استغراق برسد. درحالی که سرریزهای زیگزاگی به دلیل داشتن طول تاج بیشتر در مقایسه با سرریز خطی، دارای ظرفیت آنگذری، پایداری و کارایی هیدرولیکی بیشتری هستند.

– افزایش هد هیدرولیکی باعث تداخل تیغه‌های جریان در دهانه‌های خروجی سرریز زیگزاگی می‌شود. تداخل شدید تیغه‌های جریان باعث ایجاد موج برآمده (Standing Wave)

– در بررسی تأثیر نسبت طول تاج جانبی (B/W_{avg})، نتایج نشان دادند که حداکثر مقدار ($B/W_{avg}=3/1$) صرفاً در هدهای هیدرولیکی کم دارای ضریب آنگذری بیشتری در مقایسه با حداقل مقدار ($B/W_{avg}=2/76$) است اما نمی‌تواند با افزایش هد هیدرولیکی تعادل هیدرولیکی خود را حفظ کند و در نتیجه کارایی هیدرولیکی آن به حداقل می‌رسد. درحالی که با حداقل مقدار ($B/W_{avg}=2/76$)، کارایی هیدرولیکی سرریز با افزایش هد هیدرولیکی به حداکثر می‌رسد و در این خصوص سرریزهای زیگزاگی نامتقارن در شکل (۷-ب) با ($WL/WR=2/05$) دارای عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تری هستند.

– در بررسی تأثیر نسبت عرض سیکل (WL/WR)، نتایج نشان دادند که سرریزهای زیگزاگی نامتقارن ($WL/WR=2/05$)، دارای کارایی و عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تری در مقایسه با سرریزهای زیگزاگی متقارن ($WL/WR=1$) هستند. دلیل این امر عملکرد مناسب سرریزهای زیگزاگی نامتقارن در کنترل افزایش هد هیدرولیکی و هدایت آن به پایین دست است به گونه‌ای که از کارایی هیدرولیکی کاسته نشود و نتیجه آن عملکرد مناسب شامل عدم رسیدن به مرحله استغراق در هدهای هیدرولیکی نسبتاً بالا، کاهش افت انرژی، هوادهی مناسب و کاهش خطرات



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد هیدرولیکی سرریز زیگزاگی نامتقارن و زیگزاگی معمولی (متقارن)

عرض بیشتری است از این رو جریان به راحتی از سرریز عبور می کند و کمتر با دیواره دهانه خروجی سرریز برخورد می کند، در نتیجه افت انرژی دهانه ورودی سرریز کمتر از نوع متقارن سرریز زیگزاگی است که این امر منجر به بهبود میزان ضریب آگذری خواهد شد.

می شود. وجود Standing Wave نشان می دهد که افت انرژی در سرریزهای زیگزاگی افزایش یافته است و در نتیجه کارایی هیدرولیکی آنها در حال کاهش است. به طور کلی باید بیان داشت دلیل افزایش ضریب آگذری در سرریزهای نامتقارن این است که دهانه ورودی دارای

منابع مورد استفاده

1. American Society Civil Engineers. 2000. Hydraulic modeling: Concepts and practice. Manual 97, American Society of Civil Engineering, Reston, VA, United States.
2. Azimi, A. and H. S. Hakim. 2018. Hydraulics of flow over rectangular labyrinth weirs. *Irrigation Science* 37. 10.1007/s00271-018-0616-6.
3. Belzner, F. J., M. Merkel and C. Gebhardt Thorenz. 2017. Piano Key and Labyrinth Weirs at German Waterways: Recent and Future Research of the BAW, Labyrinth and Piano Key Weirs. Taylor and Francis Group, London.
4. Bos, M. G. 1989. Discharge Measurement Structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, Netherland.
5. Gebhardt, M., J. Merkel, F. Belzner and C. Thorenz. 2017. A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river, Labyrinth and Piano Key Weirs. Taylor and Francis Group, London.
6. Ghaderi, A, R. Daneshfaraz, J. Abraham and M. A. Torabi. 2020. Effect of Different Channels on Discharge Coefficient of Labyrinth Weirs. Technical Note.
7. Ghare, A. D., V. A. Mhaisalkar and P. D. Porey. 2008. An approach to optimal design of trapezoidal Labyrinth weirs. *World Applied Sciences Journal* 3: 934-938.
8. Kamaiee Abbasi, B., S. Khodashenas and M. Heidarnejad. 2019. Experimental investigation of discharge coefficient at the piano key weirs (two cycles). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1 (13): 10-20 (In Farsi).
9. Lux, F. 1993. Design methodologies for labyrinth weirs. In: Water power and Dam Construction Proceeding, Nashville, Tenn.
10. Littlewood, L. G., R. T. Clarke, W. Collischonnand and B. F. W. Croke. 2007. Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling and Software* 22: 1229-1239.

11. Mouelhi, S., C. Michel, C. Perrin and V. Andreassian. 2006. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328: 283-296.
12. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 885-900.
13. Motovilov, Y. G., L. Gottschalk, K. England and A. Rodhe. 1999. Validation of distributed hydrological model against observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 99: 257-277.
14. Majedi Asl, M. and M. Fooladipannah. 2018. Application of evolutionary systems in determination of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs. *Water and Soil Sciences* 4(22): 279-290.
15. Meshkavati Toroujeni, S. J., A. R. Emadi, A. M. Dehghani and H. Masoudian. 2017. Experimental study of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 5(11): 852-864.
16. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
17. Rostami, H., M. Heidarnejad, M. H. Purmohammadi, A. Kamanbedast and A. Bordabr. 2016. An experimental study into discharge coefficient of labyrinth weirs with rectangular-shaped plans. *Water Science and Technology: Water Supply* 25(12):5138-5144.
18. Tullis, J. P., N. Amanian and D. Waldron. 1995. Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121: 247-255.

Experimental Study of Discharge Coefficient of Symmetric and Asymmetric Rectangular Labyrinth Weirs

H. Elahifar¹, O. Tayari^{2*}, N. Yazdanpanah¹ and M. Momeni³

(Received October 5-2020; Accepted: April 20-2021)

Abstract

The discharge coefficient of labyrinth weirs increases with increasing the crest length in a certain width range. The present research was carried out in a laboratory flume with a length of 8 m, a width of 0.6 m, and a height of 0.6 m. The discharge coefficient of two-cycle symmetric and asymmetric rectangular labyrinth weirs was experimentally measured. The dimensional analysis by the Buckingham π theorem indicated that the discharge coefficient was dependent on S_e , B/W_{avg} , H_t/P , and W_L/W_R . According to the results, the discharge coefficient decreased with increasing the hydraulic head in the symmetric and asymmetric labyrinth weirs and the linear weir. Asymmetric labyrinth weirs with a W_L/W_R of 2.05 outperformed symmetric labyrinth weirs with a W_L/W_R of 1. Quantitatively, the discharge coefficient of the labyrinth weir with a B/W_{avg} of 3.1 was respectively 21% and 94% higher than that with a B/W_{avg} of 2.93 and 2.76. The discharge coefficient of the labyrinth weir with a W_L/W_R of 2.05 was 10-27% higher than that with a W_L/W_R of 1. The discharge coefficient of the linear weir was 60-250% higher than that of labyrinth weirs.

Keywords: Symmetric and asymmetric labyrinth weirs, Discharge coefficient, Weir cycle width ratio, Discharge capacity, Local submergence

1. Department of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran.

*: Corresponding author, Email: tayari@iauk.ac.ir