



بررسی آزمایشگاهی تاثیر گرداب شکن های هرمی بر ضریب دبی سرریز نیلوفری در شرایط استغراق

فرزانه صیادزاده^۱، سید حبیب موسوی جهرمی^{۲*}، حسین صدقی^۱، امیر خسرو جردی^۱

^۱گروه مهندسی سیستم های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲گروه عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۰۹
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۰۳
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

سرریز نیلوفری
گرداب
ضریب دبی
مطالعه آزمایشگاهی
گرداب شکن هرمی

خلاصه: سرریز نیلوفری در بالادست درون مخزن سد، جهت تخلیه سیلاب از مخازن به پایین دست احداث می شود. مشکل اصلی که معمولاً در این سرریز اتفاق می افتد، جریان چرخشی و گرداب بوده که در شرایط استغراق افزایش یافته و باعث کاهش بازده تخلیه سیلاب در مخزن خواهند شد. انجام راهکارهایی نظیر استفاده از انواع مختلف گرداب شکن ها به منظور افزایش ضریب دبی و راندمان سرریز نیلوفری، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این تحقیق با طراحی و ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری، تاثیر ابعاد و تعداد گرداب شکن های هرمی بر ضریب دبی سرریز با انجام ۲۰۹ آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج به دست آمده و بهره گیری از رگرسیون غیر خطی، معادلاتی تجربی جهت تعیین ضریب دبی جریان برای سرریز نیلوفری با گرداب شکن های هرمی به دست آمد. با مقایسه آماری نتایج روابط به دست آمده با داده های آزمایشگاهی، ضریب تبیین برای گرداب شکن های هرمی مثلثی و مربعی به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۲۶ حاصل شد. همچنین به منظور بررسی هر یک از عوامل تاثیرگذار بر ضریب دبی جریان، آنالیز حساسیت نیز انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که گرداب شکن های هرمی با آرایش شش تایی سبب افزایش میانگین عملکرد سرریز برابر ۱۱/۸۰ درصد الی ۱۶/۱۳ درصد نسبت به سرریز شاهد می شوند.

۱- مقدمه

خواهد بود. با افزایش ارتفاع آب، جریان مستغرق و به حالت روزنه عمل می کند و به اصطلاح کنترل دبی در گلوگاه یا تبدیل اتفاق می افتد. با افزایش بیشتر ارتفاع آب، استغراق کامل سرریز صورت می گیرد و دبی جریان توسط تونل پر به صورت مجاری تحت فشار کنترل می گردد [۲]. معادله دبی در حالت کنترل تاج مطابق رابطه ۱ و برای کنترل روزنه طبق رابطه ۲ برای سرریز های نیلوفری به صورت زیر است [۲ و ۳]:

$$Q = C_d \cdot L \cdot H^{1.5} \quad (L = 2\pi R) \quad (1)$$

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH_a} \quad (A = \pi r^2) \quad (2)$$

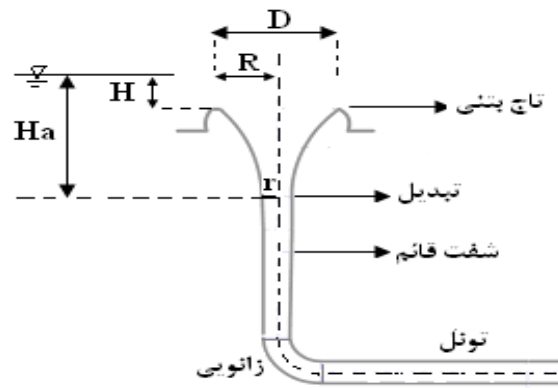
که مطابق شکل ۱، در این روابط Q دبی عبوری از سرریز نیلوفری،

سرریز نیلوفری یکی از انواع سرریزهاست که جهت تخلیه سیلاب مخازن سدها به کار برده می شود. این نوع سرریز وقتی که محدودیت مکانی برای ساخت دیگر سرریزها وجود دارد و بیشتر در سدهای خاکی درون مخزن و جدای از بدنه سد احداث می شود که موجب کاهش ریسک آبشستگی و اشباع شدن پوسته پایین دست سد می گردد [۱]. مطابق شکل ۱ این سرریزها از چند قسمت تاج بتنی، تبدیل یا گلوگاه، شفت قائم، زانویی و تونل با شیب کم تشکیل یافته است. در سرریز های نیلوفری هرگاه ارتفاع آب روی تاج سرریز کم باشد، جریان به صورت آزاد و کنترل دبی جریان در تاج سرریز

* نویسنده عهده دار مکاتبات: h-mousavi@sbiau.ac.ir



نیلوفری، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. فاتور و بکچگیا^{۱۱}، شروع وضعیت استغراق را در سرریز نیلوفری بررسی نمودند و نشان دادند که این وضعیت ناپایدار و شدید است و اگر سرریز مستغرق باشد مقدار دبی ۱/۳۴ برابر دبی حالت آزاد می باشد. توانا^{۱۲} و همکاران^{۱۲}، با مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری به مطالعه تاثیر تعداد و ارتفاع تیغه های گرداب شکن بر ضریب دبی پرداختند و نتیجه گرفتند که تیغه ها موجب افزایش ضریب تخلیه می شود و با افزایش عمق استغراق، ضریب تخلیه سرریز کاهش می یابد. موسوی^{۱۳} و همکاران^{۱۳}، با مدل آزمایشگاهی تاثیر تیغه های گرداب شکن بر مشخصات جریان در آستانه استغراق سرریزهای نیلوفری با مقطع مربعی و دایره ای را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که تاثیر تعداد گرداب شکن تیغه ای در سرریز نیلوفری با مقطع دایره ای بیشتر از مقطع مربعی است و افزایش تعداد تیغه ها تا یک حد مشخص موجب بهبود مشخصات جریان (از جمله در شرایط استغراق) می شوند. کاشکولی^{۱۴} و همکاران^{۱۴}، به وسیله مدل فیزیکی سرریز نیلوفری تاثیر تیغه های گرداب شکن در اشکال مختلف بر ضریب دبی را مطالعه نمودند. نتایج حاصله نشان داد که گرداب شکن ها به ارتفاع ۳/۵ سانتیمتر و ضخامت ۲۰ میلیمتر با آرایش شش تایی، سبب افزایش دبی به میزان ۱۷/۸ درصد می شوند. نوحانی^{۱۵} [۱۵]، با مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری به بررسی تأثیر تعداد و ضخامت تیغه های گرداب شکن بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری پرداخت و نتیجه گرفت که تأثیر توأم افزایش تعداد و ضخامت تیغه ها موجب افزایش ضریب تخلیه سرریز نیلوفری می شود. موسوی جهرمی^{۱۶} و همکاران^{۱۶} [۱۶]، با استفاده از یک مدل فیزیکی سرریز نیلوفری تاثیر تیغه های گرداب شکن زاویه دار در آرایش های مختلف بر ضریب دبی را بررسی نمودند. نتایج حاصله نشان داد که آرایش شش تایی و زاویه ۴۵ درجه تیغه گرداب شکن بیشترین تأثیر را در کاهش ارتفاع آب و افزایش ضریب دبی دارد. موسوی جهرمی و السی^{۱۷} [۱۷]، با استفاده از مدل آزمایشگاهی و انواع تیغه های گرداب شکن به بررسی تاثیر آنها بر هیدرولیک جریان روی سرریز نیلوفری پرداختند. نتایج حاصله نشان



شکل ۱. مقطع عرضی سرریز نیلوفری
Fig. 1. MGS cross section details

C_d ضریب دبی سرریز، L طول تاج سرریز، R شعاع تاج سرریز، A مساحت گلوگاه یا تبدیل سرریز، r شعاع گلوگاه یا تبدیل سرریز، H ارتفاع آب روی تاج سرریز، H_a ارتفاع از سطح آب روی تاج سرریز تا گلوگاه تبدیل با لحاظ افت و g شتاب ثقل می باشد.

مشکل اصلی که معمولاً در سرریزهای نیلوفری اتفاق می افتد، جریان چرخشی^۱ و گرداب^۲ است که در شرایط استغراق افزایش می یابد و باعث کاهش ضریب دبی و کاهش بازده تخلیه سیلاب در مخزن خواهند شد [۳]. انوار^۳ [۴]، نشان داد که دوران گرداب از جمله پارامترهای مهم در مطالعات جریان های گردابی است. کوئیک^۴ [۵]، به بررسی نحوه توزیع سرعت محوری در جریان گردابی پرداخت و نتیجه گرفت که این مؤلفه سرعت بسیار کوچک و اندکی بیشتر از ۱۰ درصد از مؤلفه سرعت مماسی است. زیلینسکی و ویلمونت^۵ [۶]، داگت و کئولگان^۶ [۷]، انوار^۷ و همکاران [۸]، جین^۸ و همکاران [۹] و ادگارد^۹ [۱۰] مطالعات آزمایشگاهی متعددی را برای تاثیر کشش سطحی و لزجت در مدل جریان های گردابی بررسی و محدوده تاثیر هر یک را توصیه نمودند. انجام راهکارهایی نظیر استفاده از انواع مختلف گرداب شکن ها^{۱۰} به منظور افزایش ضریب دبی سرریز های

- 1 -Spiral Flow
- 2 - Vortex
- 3 - Anwar
- 4 - Quick
- 5 - Zielinski & Villemonte
- 6 - Daggett & Keulegan,
- 7 - Anwar et al.
- 8 - Jain et al.
- 9 - Odgaard
- 10 -Vortex Breakers

- 11 - Fattor & Bacchiega
- 12 - Tavana et al.
- 13 - Mousavi et al.
- 14 - Kashkoli et al.
- 15 - Nohani
- 16 - Musavi-Jahromi et al.
- 17 - Musavi-Jahromi & Alašti

جدول ۱. محدوده اعداد رینولدز و وبر برای حذف اثرات لزجت و کشش سطحی
Table 1. Recommended range for negligible impact of the Weber Number and Reynolds Number

عدد وبر (W_e)	عدد رینولدز (Re)	محقق
$\rho V^2 H / \sigma > 100$	$\rho Q / \nu H > 2 \times 10^4$	انوار و همکاران (1978)
$\rho V^2 d / \sigma > 120$	$\rho Q / \nu d > 3 \times 10^4$	داگت و کئولگان (1974)
$\rho V^2 d / \sigma > 600$	$V d / \nu > 7 / 7 \times 10^4$	پادمانابهان و هکر (1984)
$\rho V^2 d / \sigma > 120$	$V d / \nu > 5 \times 10^4$	جین و همکاران (1978)

بالایی از لحاظ سازه ای می باشند. تاکنون اثر گرداب شکن های هرمی در تضعیف گرداب سرریزهای نیلوفری مورد توجه محققین سازه های هیدرولیکی قرار نگرفته است. از اهداف اصلی این تحقیق، به دست آوردن رابطه آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز نیلوفری با نصب گرداب شکن های هرمی و تعیین ابعاد و تعداد گرداب شکن هرمی برتر در بهبود عملکرد ضریب دبی می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- آنالیز ابعادی

در این تحقیق از روش باکینگهام برای آنالیز ابعادی استفاده شده است که ابتدا پارامترهای موثر بر پدیده جریان گردابی و ضریب دبی سرریز نیلوفری استخراج گردید و سپس بی بعد سازی صورت گرفت. رابطه ای به صورت زیر با استفاده از متغیرهای موثر در مساله ایجاد گردید:

$$g(C_d, \rho, \sigma, \mu, g, V, H, D, h, t, b, n) = 0 \quad (3)$$

که C_d ضریب دبی سرریز نیلوفری، ρ جرم مخصوص، σ کشش سطحی، μ لزجت دینامیک، g شتاب ثقل، V سرعت سیال، H ارتفاع آب روی تاج سرریز نیلوفری، D قطر تاج سرریز نیلوفری، h ارتفاع گرداب شکن ها، t ضخامت گرداب شکن ها، b عرض گرداب شکن ها، n تعداد گرداب شکن ها می باشند. پس از آنالیز ابعادی رابطه زیر استخراج گردید:

$$C_d = f(F_r^{-2}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{t}{D}, Re^{-1}, We^{-1}, n) \quad (4)$$

که Re عدد رینولدز، F_r عدد فرود و We عدد وبر برای جریان عبوری از سرریز هستند. در این تحقیق قاعده هرم ها به صورت مربع و مثلث متساوی الاضلاع در نظر گرفته شد، لذا عرض و ضخامت

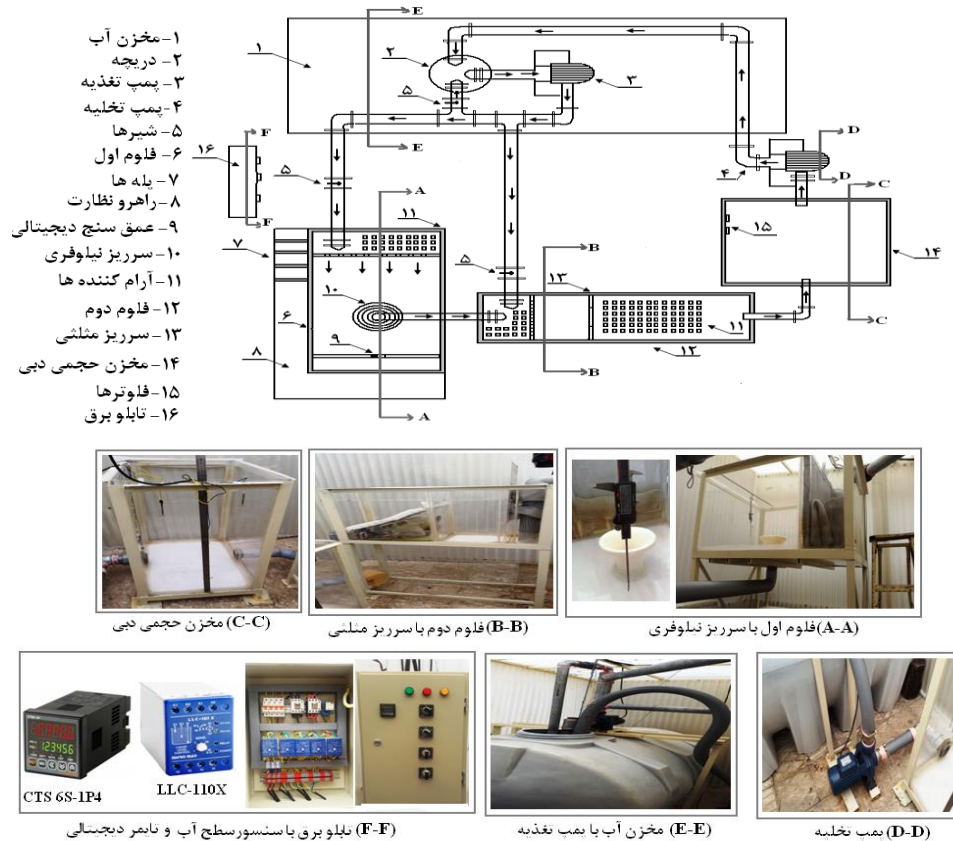
داد که هر چه طول تیغه ها بیشتر گردد ضریب دبی افزایش می یابد. نوحانی و موسوی جهرمی^[۱۸]، با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری تأثیر تعداد و ضخامت تیغه های گرداب شکن را بر قدرت گرداب و بازدهی سیستم تخلیه، مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تیغه ها باعث افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصد ضریب دبی بسته به نوع سرریز نیلوفری (لبه تیز یا لبه پهن) و تعداد تیغه ها، نسبت به حالت عدم استفاده از این نوع تیغه ها می شود. نوحانی و جمالی امام قیس^[۱۹]، با مدل آزمایشگاهی تأثیر تیغه های گرداب شکن در آرایش شش تایی را بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از تیغه ها باعث تاخیر در تشکیل گرداب می شود و تیغه ضد گرداب باله ای نسبت به تیغه مستطیلی تأثیر بیشتری بر افزایش ضریب تخلیه دارد. گرداب شکن تیغه ای مستطیلی نسبت به تیغه مثلثی در استغراق زیاد تأثیر بیشتری در افزایش ضریب دبی دارد و افزایش طول گرداب شکن ها به سمت خارج دهانه سرریز بیشترین تأثیر را بر افزایش راندمان تخلیه سرریز دارد. همچنین تأثیر طول گرداب شکن مستقل از شکل آنها می باشد و تا میزان ۲۰٪ قطر سرریز روند افزایشی دارد و بیشتر از آن روند رو به کاهش می باشد. یکی از مشکلات و خلاء های تحقیقاتی موجود در زمینه سرریزهای نیلوفری، تشکیل گرداب در آنهاست که باعث کاهش ضریب دبی این سرریزها می شود. در این تحقیق مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری، جهت بررسی تأثیر گرداب شکن های هرمی با قاعده مربعی و مثلثی در ابعاد مختلف برای آرایش های سه تایی، چهار تایی و شش تایی بر ضریب دبی سرریز در شرایط استغراق استفاده شد. از لحاظ معماری، در سازه های هرمی انتقال نیروها از نقطه اوج سازه به بخش های تحتانی ساده تر بوده و دارای سطح اتکا بیشتر و پایداری

1 -Nohani & Musavi-Jahromi

2 - Nohani & Jamali-Emamgheis

جدول ۲. محدوده متغیرهای آزمایشگاهی تاثیرگذار تحقیق حاضر بر ضریب دبی سرریز نیلوفری
Table 2. Range of effective parameters in the present study

n	H/D	b/D	h/D	F_r	متغیر
0-3-4-6	0/106-0/622	0/083-0/208	0/068-0/170	1/8 - 3/4	محدوده



شکل ۲. پلان و نمای کلی مدل فیزیکی در آزمایشگاه
Fig. 2. Plan of physical model in the experimental setup

شکل ۲ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، تاثیر ابعاد و تعداد گرداب شکن هرمی با دو قاعده مربعی و مثلثی در حالت کنترل روزنه (شرایط استغراق) بر ضریب دبی سرریز مورد بررسی قرار گرفت و تعداد ۲۰۹ آزمایش در محدوده دبی ۵/۵ الی ۷/۶ لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب روی تاج از ۲۷/۶ میلی متر تا ۱۵۰ میلی متر انجام شد. به طور کلی مدل شامل یک مخزن آبیگری، فلوم اول (شامل سرریز نیلوفری)، فلوم دوم (شامل سرریز مثلثی)، یک مخزن اندازه گیری دبی به روش حجمی، سرریز نیلوفری، سرریز مثلثی، پمپ ها، تجهیزات انتقال آب، تجهیزات بای پس آب، تجهیزات اندازه گیری و گرداب شکن ها در نظر گرفته شد. مخزن آبیگری از جنس پلی اتیلن سه لایه به حجم ۳۰۰۰ لیتر، فلوم اول از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۶۰ سانتی متر، عرض ۱۲۰

در قاعده باهم برابر می باشند. بر اساس محدوده توصیه شده اعداد ویر و رینولدز توسط محققین (جدول ۱) و شرایط دبی مینیمم آزمایشگاهی (Q) این تحقیق برابر ۵/۲۲۴ لیتر بر ثانیه و قطر تونل سرریز نیلوفری (d) برابر ۸/۵ سانتیمتر، از اعداد ویر و رینولدز به دلیل تاثیر کم در گرداب صرف نظر شد. جدول ۲ محدوده متغیرهای آزمایشگاهی تاثیرگذار در این پژوهش را نشان می دهد. بنابراین معادله نهایی آنالیز ابعادی در این تحقیق به صورت زیر بیان شد:

$$C_d = f \left(F_r^{-2}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b=t}{D}, n \right) \quad (5)$$

۲-۲- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری مطابق

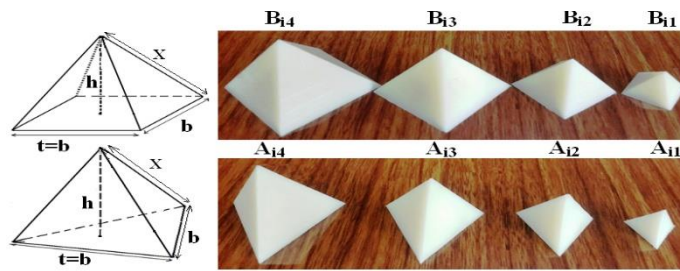
جدول ۳. پارامترهای هندسی گردابشکن‌های هرمی
Table 3. Geometric parameters of pyramidal vortex breakers

علامت	نوع گرداب‌شکن هرمی	h (mm)	t=b (mm)	h/D	b/D	سطح جانبی (mm ²)	مساحت کل (mm ²)	حجم کل (mm ³)	X (mm)
A _{i1}	مثلثی نوع اول	16/3	20	0/068	0/083	173/2	692	941/1	20
	مربعی نوع اول								
A _{i2}	مثلثی نوع دوم	24/5	30	0/102	0/125	389/7	1558/8	3182/2	30
	مربعی نوع دوم								
A _{i3}	مثلثی نوع سوم	32/7	40	0/136	0/167	692/8	2773/6	7551/7	40
	مربعی نوع سوم								
A _{i4}	مثلثی نوع چهارم	40/8	50	0/170	0/208	1082/5	4328/4	14722/4	50
	مربعی نوع چهارم								
B _{i1}						764/9	1164/9	2173/3	21/6
B _{i2}						1723/6	2623/6	7350	32/4
B _{i3}						3066/5	4666/5	17440	43/2
B _{i4}						4785/1	7285/1	34021	54

در مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی مدت زمانی را که سطح آب از یک سر سنسور به ابتدای سنسور دیگر در ارتفاع‌های مشخص می‌رسید، از طریق یک صفحه نمایشگر دیجیتالی به نام کانتر تایمر مدل آتونیکس CTS 6S-1P4 با دقت تا ۶ رقم اعشار روی تابلو برق قرائت شد. با معلوم بودن حجم بین دو سنسور و زمان ثبت شده، دبی حجمی بدست آمد. برای بالا رفتن دقت، اندازه‌گیری‌ها برای ۳ بازه زمانی انجام شد. پس از کالیبره‌سازی مثلثی با ثابت شدن ارتفاع آب روی سرریز نیلوفری در فلوم اول، ارتفاع آب روی تاج سرریز به وسیله عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری و همزمان دبی خروجی از تونل سرریز به وسیله سرریز مثلثی محاسبه شد و به این ترتیب یک نقطه از منحنی دبی-اشل سرریز نیلوفری شاهد (M) محاسبه گردید. در فلوم اول و دوم از توری‌های شبکه ریز آلومینیومی به عنوان آرام‌کننده استفاده شد.

در این تحقیق، گرداب‌شکن هرمی با قاعده مثلثی (A_{ij}) و مربعی (B_{ij}) و آرایش سه تایی (i=3)، چهار تایی (i=4) و شش تایی (i=6) در چهار ابعاد متفاوت (4، 3، 2، 1) برای دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. پارامترهای هندسی گرداب‌شکن‌ها در جدول ۳ و شکل ۳ و تعداد آزمایشات در جدول ۴ نشان داده شده است. مدل سرریز نیلوفری بر اساس ضوابط و معیارهای حاکم که توسط USBR ارائه شده است، طراحی شد. برای ساخت مدل سرریز نیلوفری پس از طراحی، مختصات منحنی سرریز در نرم افزار Catia وارد شد و سپس به فایل‌های قابل تبدیل دستگاه CNC انتقال یافت و مدل سرریز نیلوفری بدست آمد. در شکل ۴ ابعاد شیپوره سرریز نیلوفری

سانتی متر و طول ۱۲۰ سانتی متر، فلوم دوم از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۶۰ سانتی متر، عرض ۵۰ سانتی متر و طول ۱۸۰ سانتی متر و مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی از جنس پلکسی گلاس به حجم ۴۴۰ لیتر احداث گردیدند. طول و عرض فلوم اول و موقعیت سرریز نیلوفری نسبت به دیواره‌های فلوم و جهت جریان ورودی، به گونه‌ای طراحی شد که اثرات منفی دیواره‌ها و جهت جریان ورودی بر جریان گردابی حذف گردد [۲۱ و ۲۰]. برای چرخش آب، از دو پمپ با محدوده دبی ۲۵۰ تا ۱۱۰۰ لیتر بر دقیقه استفاده شد که یکی به نام پمپ تغذیه برای انتقال آب از مخزن آبگیری به فلوم اول و فلوم دوم استفاده شد و دیگری به نام پمپ تخلیه که آب را از مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی به مخزن آبگیری منتقل می‌نمود. تعداد سه شیر که یکی پس از پمپ تغذیه برای تنظیم و کنترل دبی، دیگری بر لوله انتقال آب فلوم اول و یکی بر روی لوله انتقال آب فلوم دوم ساخته شد. ابتدا شیر ورودی به فلوم دوم باز شد و کالیبره‌سازی مثلثی به وسیله مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی انجام گردید و پس از کالیبره‌سازی تا انتهای آزمایشات شیر ورودی فلوم دوم بسته ماند. سپس شیر ورودی فلوم اول باز و دبی خروجی از تونل سرریز نیلوفری توسط سرریز مثلثی (به اضلاع ۲۰ سانتی متر و با زاویه داخلی ۶۰ درجه) اندازه‌گیری شد. برای کالیبره نمودن سرریز مثلثی به دیواره‌های مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی، سنسورهایی که متصل به دستگاه الکترونیکی کنترل سطح مایعات مدل میکرومکس LLC-110X با حساسیت قابل تنظیم از ۱ الی ۲۰ کیلو اهم تعبیه گردید. با استفاده از سنسورهای جداگانه‌ای



شکل ۳. گرداب شکن های هرمی با قاعده مثلثی (A_{ij}) و مربعی (B_{ij})
 Fig. 3. Schematic of pyramidal vortex breakers with triangular (A_{ij}) and square (B_{ij}) bases

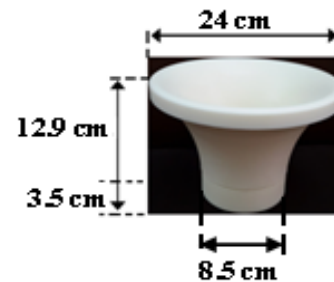
جدول ۴. نام و تعداد آزمایش

Table 4. Definition and number of experimental tests

A_{34}	A_{33}	A_{32}	A_{31}	B_{34}	B_{33}	B_{32}	B_{31}	M (شاهد)	نام آزمایش
10	8	9	9	8	8	8	9	10	تعداد آزمایش
A_{44}	A_{43}	A_{42}	A_{41}	B_{44}	B_{43}	B_{42}	B_{41}	M (شاهد)	نام آزمایش
7	8	9	9	8	8	8	9	10	تعداد آزمایش
A_{64}	A_{63}	A_{62}	A_{61}	B_{64}	B_{63}	B_{62}	B_{61}	M (شاهد)	نام آزمایش
9	7	8	10	6	8	8	8	10	تعداد آزمایش

جریان به صورت نیمه پر سمت دیواره سرریز متمایل شد و جریان آزاد و کنترل جریان در تاج سرریز برقرار گردید (شکل ۵-الف). با افزایش دبی، ضخامت فواره جریان بیشتر و حالت جوشش ورودی سرریز را اشغال نمود و گرداب‌های کوچک و فرورفتگی جزئی در سطح جریان مشاهده شد و حالت استغراق موقتی در جریان ایجاد گردید (شکل ۵-ب). با افزایش دبی، قسمت کنترل به تبدیل قائم منتقل و جریان مستغرق تشکیل شد و کنترل دبی جریان توسط جریان روزه ای صورت گرفت و گرداب‌های بزرگتر با هسته هوا نمایان شد (شکل ۵-ج).

۳-۲- تاثیر گرداب شکن های هرمی بر منحنی دبی-اشل سرریز
 ابتدا منحنی های دبی-اشل برای سرریز شاهد بدون گرداب شکن (M)، با گرداب شکن هرمی مثلثی (A) و گرداب شکن مربعی (B) در ابعاد متفاوت رای آرایش های سه تایی، چهار تایی و شش تایی در شکل های ۶ الی ۸ ارائه شد. بررسی این نمودارها در برای بخش کنترل روزه (شرایط استغراق) نشان می دهد که به ازای دبی ثابت، وجود گرداب شکن هرمی ارتفاع آب روی تاج سرریز را بین ۱۵ تا ۷۵ درصد کاهش می دهد و به ازای ارتفاع های ثابت آب روی تاج، گرداب شکن هرمی باعث افزایش قابل توجه دبی عبوری می گردد. همچنین نتایج این نمودارها نشان داد که گرداب شکن



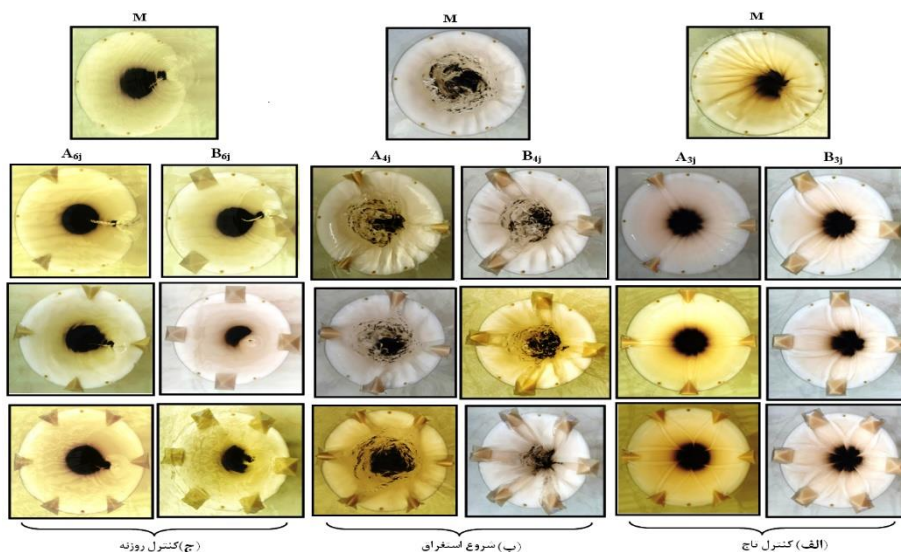
شکل ۴. ابعاد شیبوره سرریز نیلوفری
 Fig. 4. Funnel dimension of MGS

به قطر تاج ۲۴ سانتی متر، طول تاج ۷۵/۴ سانتی متر، گلوگاه سرریز به قطر ۸/۵ سانتی متر در فاصله ۱۲/۹ سانتی متری از تاج سرریز و مجرای تونل آب بر هم قطر با تبدیل طراحی شد. طول تونل آب بر برابر ۱ متر و زانویی ۹۰ درجه و شفت قائم می باشد. برای اتصال بدنه سرریز و مجرای تونل آب بر (از جنس لوله پلیکا به قطر ۳ اینچ)، از یک تبدیل به ارتفاع ۳/۵ سانتی متر استفاده شد. جهت ایجاد سطوح صیقلی از پلی امید صنعتی برای جنس بدنه سرریز، گرداب شکن ها و تبدیل استفاده شد.

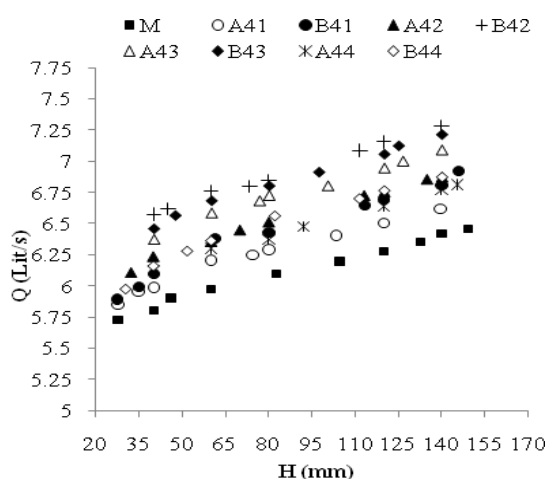
۳-نتایج و بحث

۳-۱-مشاهدات

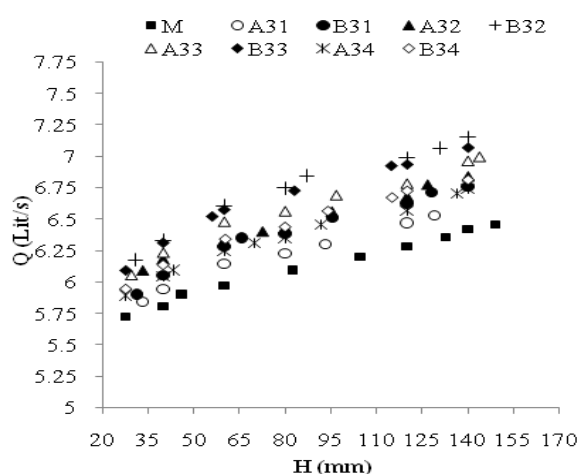
مطابق شکل ۵، در ابتدا که دبی و ارتفاع آب روی سرریز کم است



شکل ۵. مشاهدات با نصب گردابشکنهای هرمی در آرایشهای مختلف
 Fig. 5. Observations by installing pyramidal vortex breakers in different groups



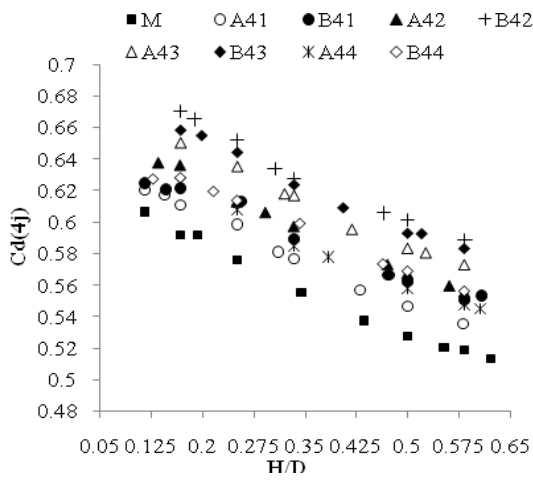
شکل ۷. منحنیهای دبی-اسل با ۴ گردابشکن هرمی
 Fig. 7. Head discharge rating variations for 4 pyramidal vortex breakers



شکل ۶. منحنیهای دبی-اسل با ۳ گردابشکن هرمی
 Fig. 6. Head discharge rating variations for 3 pyramidal vortex breakers

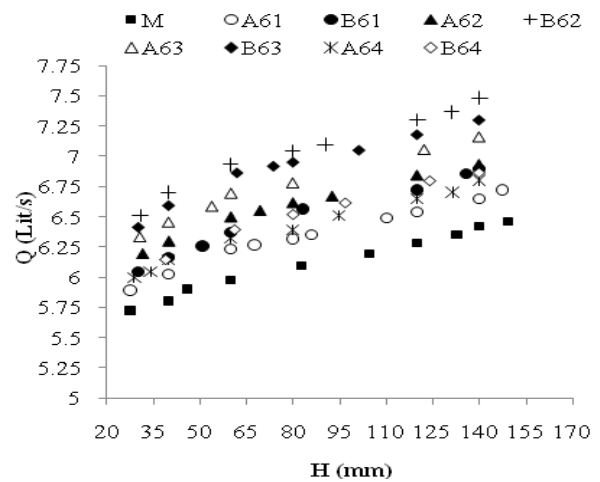
۳-۳- تاثیر عمق استغراق بر ضریب دبی سرریز با گرداب شکن های هرمی در این تحقیق به دلیل شرایط استغراق در حالت کنترل روزنه، ضریب دبی از رابطه ۲ برای هر آزمایش محاسبه شد. نمودارهای ضریب دبی-عمق استغراق در شکل های ۹ الی ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این شکل ها نشان می دهد که روند تغییرات ضریب دبی سرریز در برابر عمق استغراق برای هر سه آرایش گرداب شکن های هرمی، در محدوده آزمایشات نزولی است یعنی با افزایش عمق استغراق، کاهش ضریب دبی مشاهده می شود. با نصب گرداب شکن های هرمی، ضریب دبی سرریز نیلوفری و در نتیجه راندمان جریان خروجی نسبت

هرمی مربعی نوع دوم (B_{12})، گرداب شکن هرمی مربعی نوع سوم (B_{13}) و گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A_{13}) در آرایش های سه تایی، چهار تایی و شش تایی بر افزایش دبی عبوری سرریز بیش از بقیه گرداب شکن های هرمی تاثیر دارند. مطابق جدول ۳، علت تاثیر بیشتر گرداب شکن هرمی مربعی در تعداد و اندازه یال ها (X)، تعداد و مساحت وجه های جانبی آن بوده که در هرم مربعی وجه ها و یال های جانبی چهار تا و برای مثلثی سه عدد می باشد. لذا گرداب شکن هرمی مربعی باعث شکست بیشتر خطوط جریان گردابی و در نتیجه افزایش دبی عبوری خواهد شد.



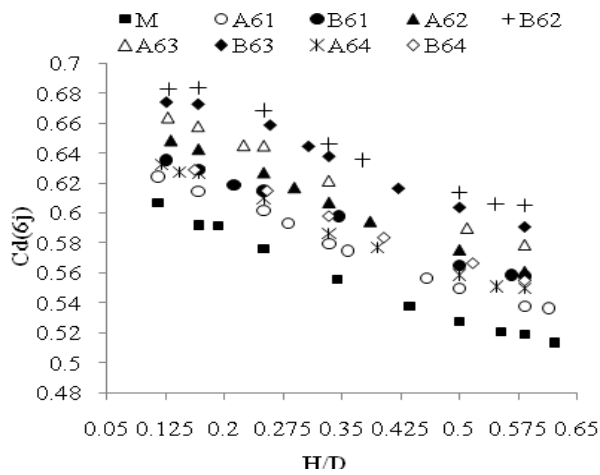
شکل ۱۰. تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق با ۴ گردابشکن هرمی

Fig. 10. Variation of discharge coefficient versus submergence depth for 4 pyramidal vortex breakers



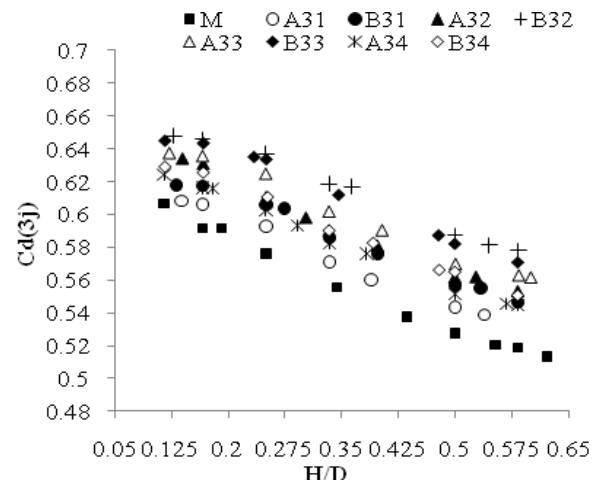
شکل ۸. منحنیهای دبی-اشل با ۶ گردابشکن هرمی

Fig. 8. Head discharge rating variations for 6 pyramidal vortex breakers



شکل ۱۱. تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق با ۶ گردابشکن هرمی

Fig. 11. Variation of discharge coefficient versus submergence depth for 6 pyramidal vortex breakers



شکل ۹. تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق با ۳ گردابشکن هرمی

Fig. 9. Variation of discharge coefficient versus submergence depth for 3 pyramidal vortex breakers

بیشترین تاثیر را در کاهش گرداب و افزایش ضریب دبی عبوری سرریز را بر عهده دارند، پیشنهاد می شود. با توجه به مشخصات جدول ۳، به دلیل اینکه تعداد وجه جانبی هرم مربعی چهار تا و برای مثلثی سه عدد می باشد لذا مساحت کل، مساحت جانبی و حجم کل هرم مربعی بیشتر از هرم مثلثی است و در نتیجه هرم مربعی نقش بیشتری در اصلاح مسیر جریان گردابی، شکست خطوط جریان گردابی و افزایش ضریب دبی دارد.

۳-۴- تاثیر تعداد گرداب شکن هرمی بر ضریب دبی سرریز

نمودارهای ضریب دبی-تعداد گرداب شکن با عمق استغراق های

به حالت بدون گرداب شکن افزایش یافت و گرداب شکن هرمی مربعی نوع دوم (B_{12}) با اولویت اول، گرداب شکن هرمی مربعی نوع سوم (B_{13}) با اولویت دوم و گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A_{13}) با اولویت سوم در آرایش های سه تایی، چهارتایی و شش تایی بر افزایش ضریب دبی سرریز بیشترین تاثیر را در مقایسه با بقیه گرداب شکن ها از خود نشان دادند. بنابراین برای بخش کنترل روزنه (شرایط استغراق)، گرداب شکن هرمی مثلثی به ضخامت $b=0/D167$ و ارتفاع $h=0/D136$ و گرداب شکن هرمی مربعی به ضخامت $0/125D \leq b \leq 0/167D$ و ارتفاع $0/102D \leq h \leq 0/136D$ که

جدول ۵. محدوده ضریب دبی گردابشکنهای هرمی منتخبی
Table 5. Range of discharge coefficient for selected pyramidal vortex breakers

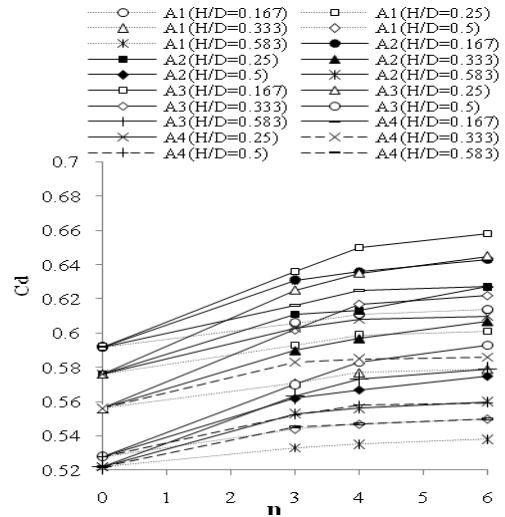
محدوده ضریب دبی (C _d)	آزمایش	
0/519 ≤ C _d ≤ 0/592	M	سرریز شاهد
0/578 ≤ C _d ≤ 0/646	B ₂	
0/571 ≤ C _d ≤ 0/644	B ₃	با آرایش سه تایی
0/563 ≤ C _d ≤ 0/636	A ₃	
0/588 ≤ C _d ≤ 0/671	B ₂	
0/583 ≤ C _d ≤ 0/659	B ₃	با آرایش چهار تایی
0/573 ≤ C _d ≤ 0/650	A ₃	
0/605 ≤ C _d ≤ 0/684	B ₂	
0/590 ≤ C _d ≤ 0/673	B ₃	با آرایش شش تایی
0/579 ≤ C _d ≤ 0/658	A ₃	

مقایسه با آرایش های سه تایی و چهار تایی نسبت به سرریز شاهد (M) دارند. علت این است که در آرایش شش تایی تعداد پال ها و سطوح جانبی برخورد با جریان بیشتر از آرایش چهار تایی و سه تایی بوده و آرایش شش تایی در افزایش ضریب دبی و کاهش اثر گردابی تاثیر زیادی دارند.

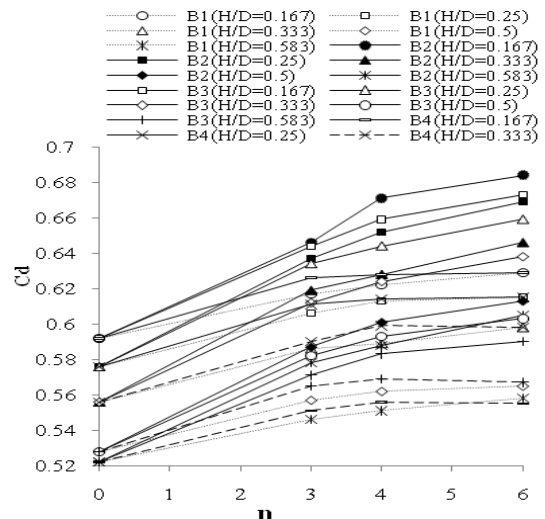
به منظور یافتن بهترین تعداد و ابعاد گرداب شکن های هرمی در این تحقیق، میانگین عملکرد سرریز (P %) برای ضریب دبی طبق رابطه ۶ برای عمق استغراق های یکسان در حالت کنترل روزه محاسبه گردید و در شکل ۱۴ با نمودارهای ستونی نشان داده شده است:

$$\% P = \frac{1}{n} \sum \frac{C_{d(i,j)} - C_{d(M)}}{C_{d(M)}} \times 100 \quad (6)$$

که C_{d(M)} ضریب دبی سرریز شاهد و C_{d(i,j)} ضریب دبی با گرداب شکن های هرمی می باشد. نتایج شکل ۱۴ نشان می دهد که گرداب شکن هرمی مربعی نوع دوم (B₂)، گرداب شکن هرمی مربعی نوع سوم (B₃) و گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A₃) در آرایش های سه تایی با میانگین عملکرد سرریز به ترتیب برابر ۱۰/۷۶، ۹/۹۰، ۸/۱۶ درصد و در آرایش چهار تایی با میانگین عملکرد سرریز به ترتیب برابر ۱۳/۳۴، ۱۲/۰۱، ۱۰/۴۱ درصد و در آرایش شش تایی با میانگین عملکرد سرریز به ترتیب برابر ۱۶/۱۳، ۱۴/۲۰ و ۱۱/۸۰ درصد بر افزایش درصد رشد ضریب دبی عبوری سرریز بیش از بقیه



شکل ۱۲. تغییرات ضریب دبی نسبت به تعداد گردابشکن هرمی مثلثی
Fig. 12. Variation of discharge coefficient versus number of triangular pyramidal vortex breaker



شکل ۱۳. تغییرات ضریب دبی نسبت به تعداد گردابشکن هرمی مربعی
Fig. 13. Variation of discharge coefficient versus number of square pyramidal vortex breaker

یکسان در محدوده 0/167 ≤ H/D ≤ 0/583 برای گرداب شکن هرمی مثلثی و مربعی، به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان می دهد که هر چه تعداد گرداب شکن های هرمی از ۳ به ۶ افزایش می یابد، ضریب دبی افزایش خواهد یافت. برای مقایسه بیشتر مطابق جدول ۵، در عمق استغراق های یکسان آرایش شش تایی نشان می دهد که گرداب شکن هرمی مربعی نوع دوم (B₂)، گرداب شکن هرمی مربعی نوع سوم (B₃) و گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A₃) با محدوده ضریب دبی به ترتیب 0/605 ≤ C_d ≤ 0/684، 0/590 ≤ C_d ≤ 0/673 و 0/579 ≤ C_d ≤ 0/658 بیشترین محدوده افزایش ضریب دبی را در

مانعی در ورودی سرریز موجب ایجاد افت در مسیر جریان می شوند و اثر این افت بیش از اثر اصلاحی گرداب شکن ها است و خود را به صورت افزایش ارتفاع آب روی سرریز، کاهش دبی و ضریب دبی نشان می دهد. بنابراین در این تحقیق افزایش در ابعاد گرداب شکن هرمی از یک حد مشخص به بعد، توصیه نمی شود.

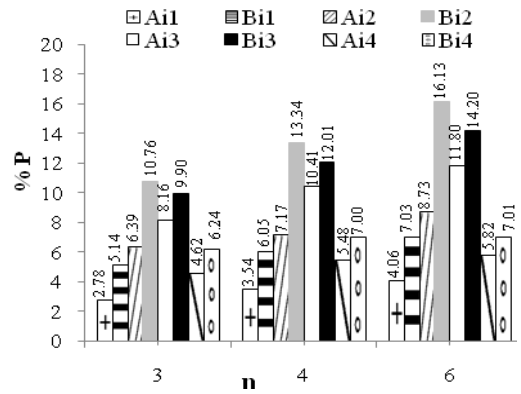
۳-۵- تاثیر عدد فرود بر ضریب دبی سرریز با گرداب شکن های هرمی
تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود [۲۱ و ۲۲]، در شکل های ۱۵ الی ۱۷ نشان داده شده است. نتایج این شکل ها نشان می دهد که به ازای عدد فرود یکسان، ضریب دبی سرریز با وجود گراب شکن هرمی بیشتر از حالت بدون گرداب شکن می باشد. همچنین با افزایش عدد فرود، ضریب دبی افزایش می یابد یعنی با کاهش ارتفاع آب روی تاج سرریز (کاهش عمق استغراق)، عدد فرود افزایش می یابد. بنابراین ضریب دبی سرریز در همه حالت ها با عدد فرود رابطه مستقیم دارد. به واسطه ارتباط مستقیم درصد ورود هوا به سرریز نیلوفری با افزایش و کاهش ضریب دبی نسبت به عدد فرود، روند تغییرات عدد فرود با ضریب دبی در کنترل تاج و روزنه با نتایج کبیری سامانی و برقی [۲۱]، سازگاری نشان می دهد.

۳-۶- استخراج معادلات تجربی بهینه ضریب دبی سرریز نیلوفری با گرداب شکن هرمی

در این پژوهش برای انجام تحلیل ها از رگرسیون غیرخطی و با استفاده از نرم افزار آماری SPSS، معادلات تجربی زیر با استفاده از داده های آزمایشگاهی برای برآورد ضریب دبی سرریز نیلوفری با گرداب شکن هرمی مثلثی طبق معادله ۷ و گرداب شکن هرمی طبق معادله ۸ در حالت کنترل روزنه (شرایط استغراق) سرریز استخراج شد:

$$C_d = 0.721 \times \left(\exp\left(\frac{H}{D}\right)\right)^{-2.646} + 45.82 \frac{b}{D} - 56.064 \frac{h}{D} + 0.013(n)^{0.54} + 1.304(F_r)^{-1.138} - 0.279 \quad (7)$$

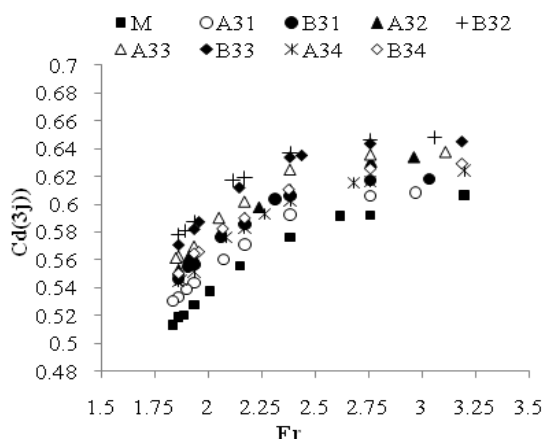
$$C_d = 0.556 \times \left(\exp\left(\frac{H}{D}\right)\right)^{-2.528} + 53.01 \frac{b}{D} - 65 \frac{h}{D} + 0.032(n)^{0.417} + 1.024(F_r)^{-0.729} - 0.26 \quad (8)$$



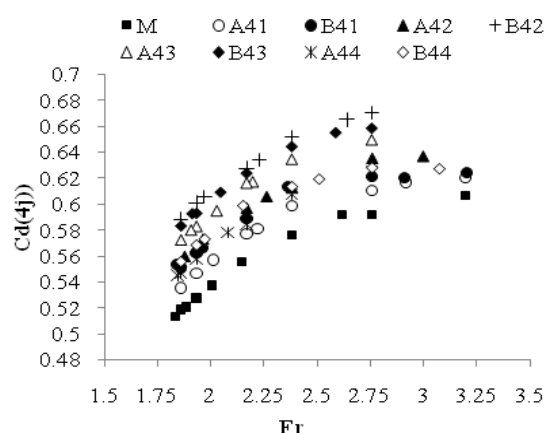
شکل ۱۴. تغییرات میانگین عملکرد سرریز نسبت به تعداد گردابشکن هرمی مربعی و مثلثی

Fig. 14. Variation of discharge coefficient performance versus number of square and triangular pyramidal vortex breaker

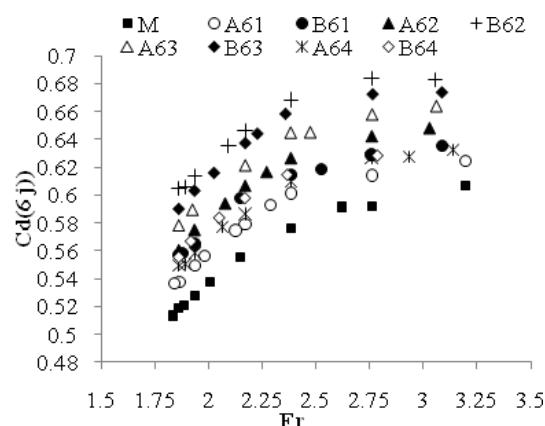
گرداب شکن های هرمی تاثیر دارند. برای شرایط استغراق با آرایش شش تایی، گرداب شکن های هرمی مربعی به دلیل شرایط هندسی باعث شکست بیشتر خطوط جریان، انحراف آنها به صورت مسیر مستقیم به سمت خروجی، کاهش اثر گردابه ها و ایجاد گرداب های نسبتا ماندگار در مقایسه با بقیه آرایش ها می شود. لذا نتایج ضریب دبی در عمق استغراق های یکسان آرایش شش تایی نشان داد که میانگین عملکرد سرریز برای گرداب شکن هرمی مربعی به ابعاد $h/D=0/102$ و $b/D=0/125$ برابر $16/13\%$ و برای گرداب شکن های هرمی مربعی و مثلثی به ابعاد $h/D=0/136$ و $b/D=0/167$ به ترتیب برابر $14/20\%$ و $11/80\%$ درصد بوده و بیشترین محدوده افزایش ضریب دبی را در مقایسه با آرایش های سه تایی و چهار تایی نسبت به سرریز شاهد از خود نشان دادند. از طرفی در شرایط استغراق، افزایش ابعاد گرداب شکن هرمی تا محدوده ای تاثیر بسزایی در افزایش ضریب دبی دارد. این تاثیر در ابعاد بزرگتر گرداب شکن های هرمی مربعی و مثلثی کمتر شده، طوریکه میانگین عملکرد سرریز در گرداب شکن هرمی مربعی و مثلثی به ابعاد $h/D=0/170$ و $b/D=0/208$ برابر $4/6\%$ الی 7% در هر سه نوع آرایش می شود و افزایش ابعاد گرداب شکن هرمی در مقایسه با افزایش تعداد آن مانع از تاثیر آن بر افزایش ضریب دبی خواهد شد. همچنین در این ابعاد، آرایش شش تایی در مقایسه با آرایش چهارتایی رویکرد یکسانی نشان داد. بنابراین افزایش ابعاد گرداب شکن های هرمی مربعی و مثلثی از یک حد به بعد در آرایش شش تایی، با وجود اصلاح جریان در شرایط استغراق خود به صورت



شکل ۱۵. تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود با ۳ گردابشکن هرمی
 Fig. 15. Variation of discharge coefficient versus Froude Number for 3 pyramidal vortex breaker



شکل ۱۶. تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود با ۴ گردابشکن هرمی
 Fig. 16. Variation of discharge coefficient versus Froude Number for 4 pyramidal vortex breaker



شکل ۱۷. تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود با ۶ گردابشکن هرمی
 Fig. 17. Variation of discharge coefficient versus Froude Number for 6 pyramidal vortex breaker

که این معادلات برای $0/068 \leq h/D \leq 0/17$ و $0/083 \leq b/D \leq 0/208$ و $0/115 \leq H/D \leq 0/621$ معتبر است. به منظور بررسی خطا و دقت هر یک از معادلات مذکور علاوه بر محاسبه ضریب تبیین^۱ (R^2)، از مقادیر مجذور میانگین خطا^۲ (MSE)، میانگین خطای مطلق^۳ (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE)، مجموع مجذور باقیمانده ها^۵ (NRMSE) و خطای مطلق نسبی^۶ (RAE) طبق معادلات ۹ الی ۱۴ برای گرداب شکن هرمی مثلثی و مربعی در جدول ۶ محاسبه شد که نتایج جدول نشان دهنده دقت مناسب و خطای بسیار کم برای معادلات مذکور است. همچنین، نتایج ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی در شکل های ۱۸ و ۱۹ برای گرداب شکن هرمی مربعی و مثلثی ارائه شد. همانطور که مشخص است مقادیر ضرایب دبی محاسباتی در برابر ضرایب دبی مشاهداتی با سطح اطمینان ۹۵٪ برای گرداب شکن هرمی مربعی و مثلثی در محدوده تغییرات $\pm 10\%$ درصد قرار دارند و معادلات به دست آمده محدوده وسیعی از داده های مشاهداتی را دربر می گیرند. در جدول ۷ و شکل ۲۰، مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات قبلی ارائه شد. مقایسه منحنی دبی-اشل تحقیق حاضر با پژوهش های کشکولی و همکاران [۱۴] و موسوی جهرمی و همکاران [۱۶] در بخش کنترل روزنه با آرایش شش تایی، نشان می دهد که گرداب شکن های هرمی در افزایش دبی عبوری موثر تر از گرداب شکن های منشوری و منشوری زاویه دار می باشد. همچنین مطابق جدول ۶ از مقایسه محدوده ضریب دبی کشکولی و همکاران [۱۴]، موسوی جهرمی و همکاران [۱۶] و نوحانی و جمالی امام قیس و نوحانی [۲۰]، می توان به وسیع تر بودن محدوده عمق استغراق و ضریب دبی پژوهش حاضر اشاره نمود که دلیل آن نقش بیشتر گرداب شکن های هرمی در اصلاح مسیر جریان گردابی و افزایش ضریب دبی در مقایسه با گرداب شکن های منشوری می باشد.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{d(measured)} - C_{d(estimated)})^2 \quad (9)$$

- 1 - R-Squared
- 2 - Mean Square Error
- 3 - Mean absolute Error
- 4 - Root Mean Square Error
- 5 - Normal Root Mean Square Error
- 6 - Residual Sum of Squares
- 7 - Relative Absolute Error

جدول ۶. مقادیر خطای معادلات تجربی ارائه شده برای گردابشکن هرمی مثلثی و مربعی
Table 6. Errors analysis of the developed equations for triangular and square pyramidal vortex breaker

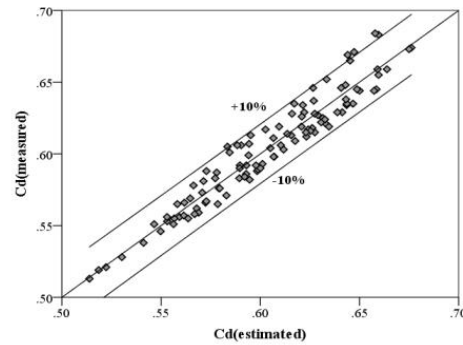
	MSE	MAE	RMSE	NRMSE	RSS	RAE	R ²
معادله ۷ (گردابشکن هرمی مثلثی)	0/00001186	0/0027	0/0034	0/001	0/006	0/005	0/99
معادله ۸ (گردابشکن هرمی مربعی)	0/0001	0/0084	0/0103	0/011	0/017	0/014	0/926

۳-۷- تحلیل حساسیت معادلات تجربی ضریب دبی سرریز نیلوفری با گرداب شکن هرمی

برای بررسی حساسیت ضریب دبی نسبت به هر یک از عوامل بی بعد موثر و ارزیابی اینکه کدام یک در برآورد ضریب دبی سرریز دارای اولویت بیشتری هستند، تحلیل حساسیت با استفاده از نرم افزار آماری SPSS انجام شد. در هر مرحله با حذف تک تک عوامل بی بعد F_r و n ، h/D ، b/D ، H/D از معادلات تجربی ۷ و ۸، کمیت های آماری MAE ، $RMSE$ و $NRMSE$ مطابق جدول ۸ ارزیابی شد. مقادیر MAE ، $RMSE$ و $NRMSE$ نشان می دهد که میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب شکن هرمی مثلثی (معادله ۷) به ترتیب نسبت به عمق استغراق، ضخامت و ارتفاع گرداب شکن هرمی مثلثی، تعداد گرداب شکن و عدد فرود است. همچنین میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب شکن هرمی مربعی (معادله ۸) به ترتیب نسبت به تعداد گرداب شکن، ضخامت و ارتفاع گرداب شکن مربعی، عمق استغراق و عدد فرود می باشد.

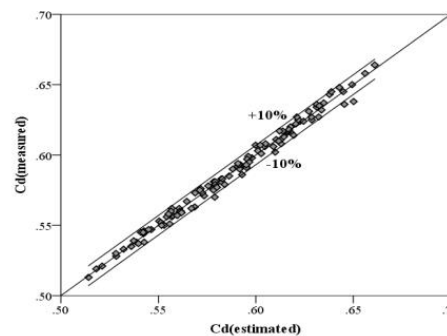
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری، تاثیر گرداب شکن های هرمی در ابعاد و آرایش های مختلف بر ضریب دبی سرریز برای کنترل روزنه (شرایط استغراق)، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که نصب گردابشکن های هرمی مربعی و مثلثی در تاج سرریزهای نیلوفری در مقایسه با حالت بدون گرداب شکن هرمی بر افزایش ضریب دبی بسیار موثر می باشند. نتایج حاصله در آرایش شش تایی نشان داد که میانگین عملکرد سرریز برای گرداب شکن هرمی مربعی به ابعاد $b/D=0/125$ و $h/D=0/102$ برابر $1/13$ و $1/16$ و برای گرداب شکن های هرمی مربعی و مثلثی به ابعاد $b/D=0/167$ و $h/D=0/136$ به ترتیب برابر $1/20$ و $1/18$ درصد بوده و بیشترین محدوده افزایش ضریب دبی را در مقایسه با آرایش های



شکل ۱۸. مقایسه نتایج ضریب دبی مشاهداتی و محاسباتی در گردابشکن هرمی مربعی

Fig. 18. Measured versus estimated data of discharge coefficient for square pyramidal vortex breaker



شکل ۱۹. مقایسه نتایج ضریب دبی مشاهداتی و محاسباتی در گردابشکن هرمی مثلثی

Fig. 19. Measured versus estimated data of discharge coefficient for triangular pyramidal vortex breaker

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{d(measured)} - C_{d(estimated)}| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{d(measured)} - C_{d(estimated)})^2} \quad (11)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{C_{d(measured)}} \quad (12)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (C_{d(measured)} - C_{d(estimated)})^2 \quad (13)$$

جدول ۷. مقایسه محدوده ضریب دبی تحقیق حاضر با پژوهشهای پیشین در آرایش شش تایی
Table 7. Comparing discharge coefficient of the present study in group of six with previous researches

محدوده ضریب دبی	محدوده عمق استغراق	نوع گردابشکن	محقق
$0/03 \leq C_d \leq 0/31$	$0/3 \leq H/D \leq 0/4$	منشوری	کشکولی و همکاران (2013)
$0/511 \leq C_d \leq 0/622$	$0/109 \leq H/D \leq 0/151$	منشوری با زاویه 45 درجه	موسوی جهرمی و همکاران (2016)
$0/48 \leq C_d \leq 0/54$	$0/17 \leq H/D \leq 0/25$	منشوری مستطیلی	نوحانی و جمالی امام قیس (1394)
$0/42 \leq C_d \leq 0/58$	$0/163 \leq H/D \leq 0/363$	منشوری مثلثی	
$0/605 \leq C_d \leq 0/684$	$0/129 \leq H/D \leq 0/583$	هرمی مربعی نوع دوم	تحقیق حاضر
$0/59 \leq C_d \leq 0/674$	$0/126 \leq H/D \leq 0/583$	هرمی مربعی نوع سوم	
$0/579 \leq C_d \leq 0/664$	$0/128 \leq H/D \leq 0/583$	هرمی مثلثی نوع سوم	

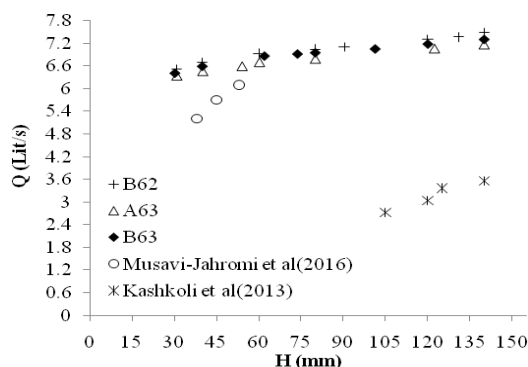
جدول ۸. نتایج تحلیل حساسیت معادلات تجربی ضریب دبی (۷ و ۸) با گردابشکن هرمی مثلثی و مربعی
Table 8. Sensitive analysis of the developed equations of discharge coefficient (7 & 8) for triangular and square pyramidal vortex breaker

هرمی مربعی					هرمی مثلثی					
F_r	n	h/D	b/D	H/D	F_r	n	h/D	b/D	H/D	حذف
0/0086	0/0157	0/0141	0/0141	0/0109	0/0030	0/0068	0/0109	0/0119	0/0128	MAE
0/0105	0/0176	0/0171	0/0171	0/0136	0/0039	0/0082	0/0122	0/0137	0/0161	RMSE
0/0175	0/0291	0/0283	0/0283	0/0225	0/0067	0/0140	0/0210	0/0233	0/0275	NRMSE

با گرداب شکن های هرمی مربعی و مثلثی استخراج شد. حذف هر یک از عوامل تاثیرگذار در این معادلات برای بخش کنترل روزنه نشان داد که میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب شکن هرمی مثلثی به ترتیب برای عمق استغراق، ابعاد گرداب شکن هرمی مثلثی، تعداد گرداب شکن و عدد فرود است. همچنین میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب شکن هرمی مربعی به ترتیب برای تعداد گرداب شکن، ابعاد گرداب شکن هرمی مربعی، عمق استغراق و عدد فرود می باشد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	دبی جریان، Q
m^3/s	Q
ضریب دبی سرریز	C_d
قطر تاج سرریز، شعاع تاج سرریز، طول تاج سرریز، m	L, R, D
شعاع تبدیل سرریز، قطر تبدیل سرریز، m	d, r
مساحت تبدیل سرریز، m^2	A
ارتفاع آب روی تاج، m	H
ارتفاع از سطح آب روی تاج تا تبدیل، m	H_a
شتاب ثقل، m^2/s	g
سرعت، m/s	V
یال، ارتفاع، ضخامت و عرض گرداب شکن، m	b, t, h, X
تعداد گرداب شکن	n
عدد رینولدز، عدد وبر، عدد فرود	F_r, W_e, R_e
مجدور میانگین خطا	MSE
میانگین خطای مطلق	MAE
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE$



شکل ۲۰. مقایسه منحنی دبی- انشل تحقیق حاضر با پژوهشهای پیشین در آرایش شش تایی

Fig. 20. Comparing head discharge rating variations of the present study in group of six with previous researches

سه تایی و چهار تایی نسبت به سرریز شاهد از خود نشان دادند. در شرایط استغراق، افزایش ابعاد گرداب شکن هرمی تا محدوده ای تاثیر بسزایی در افزایش ضریب دبی دارد، طوریکه میانگین عملکرد سرریز در گرداب شکن هرمی مربعی و مثلثی به ابعاد $b/D=0/208$ و $h/D=0/170$ برابر $4/6\%$ الی 7% در هر سه نوع آرایش می شود و افزایش ابعاد گرداب شکن هرمی در مقایسه با افزایش تعداد آن مانع از تاثیر آن بر افزایش ضریب دبی خواهد شد.

در نهایت معادلات تجربی بهینه برای ضریب دبی سرریز نیلوفری

Hydraulic Engineering, 112(7) (1986) 610-620.

- [11] C.A. Fattor, J.D. Bacchiega, Analysis of instabilities in the change of regime in morning-glory spillways, in: PROCEEDINGS OF THE CONGRESS-INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 2001, pp. 656-662.
- [12] M. Tavana, S. Moosavi-Jahromi, M. Shafai-Bajestan, A. Masjedi, H. Sedghi, Optimazation of number and direction of vortex breakers in the morning glory spillway using physical mode, Ecology, Enviroment and Conservation Journal (Eco. Env. & Cons.), 17(2) (2011) 435-440.
- [13] S.R. Mousavi, A.A. Kamanbedast, H. Fathian, Experimental investigation of the effect of number of anti-vortex piers on submergence threshold in morning glory spillway with square inlet, Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(24) (2013) 3534-3540.
- [14] H. Kashkoli, H. Sedghi, H.M. Jahromi, R. Aghamajidi, Simultaneous Study Effect of Guide Pier and Stepped Chamber on Hydraulic Behavior of Morning Glory Spill Way, World Applied Sciences Journal, 21(4) (2013) 548-557.
- [15] E. Nohani, An Experimental Study on the Effect of Vortex Breakers on Discharge Coefficient for the Shaft Spillways with Sharp Edge and Wide Edge, Journal of Civil Engineering and Urbanism, 4(5) (2014) 546-549.
- [16] S.H. Musavi-Jahromi, G. Hajipour, M. Eghdam, Discharge coefficient in the morning glory spillways due to longitudinal angles of vortex breakers, Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 5(5) (2016) 34-41.
- [17] S.H. Musavi-Jahromi, K. Alasti, Effect of Vortex Breakers on Flow Regime of Morning Glory Spillway, in: 1st Irrigation and Drainage Network Management National Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, 2006, pp. 1-6 (In persian).
- [18] E. Nohani, S.H. Musavi-Jahromi, Effect of Number and Thickness of Vortex Breaker Blades on the Coefficient Discharge of the Morning Glory Spillway, in: National

جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده
مجموع مجذور باقیمانده ها
خطای مطلق نسبی
ضریب تبیین

$NRMSE$
 RSS
 RAE
 R^2

علائم یونانی

چگالی، kg/m^3 ρ
کشش سطحی، N/m σ
لزجت دینامیکی، $N.s/m^2$ μ

زیرنویس

\bar{z} اندیس گرداب شکن ها

بالانویس

* شرایط نویسندگان

مراجع

- [1] A. Afshar, G.R. Niksefat, Design of Hydraulic Structures of Small Dams, Iran University of Science and Technology, Tehran 1994 (In persian).
- [2] U.S.B.o. Reclamation, Design of small dams, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington D.C, 1987.
- [3] G. Christodoulou, A. Mavrommatis, T. Papathanassiadis, Experimental study on the effect of piers and boundary proximity on the discharge capacity of a morning glory spillway, in: 1st IAHR European Congress, Edinburgh, Scotland, Edinburgh, Scotland, 2010.
- [4] H.O. Anwar, Formation of a weak vortex, Journal of Hydraulic Research, 4(1) (1966) 1-16.
- [5] M.C. Quick, Efficiency of air-entraining vortex formation at water intake, Journal of the Hydraulics Division, 96(7) (1970) 1403-1416.
- [6] P.B. Zielinski, Effect of viscosity on vortex orifice flow, Journal of the Hydraulics Division, 94(3) (1968) 745-752.
- [7] L.L. Daggett, G.H. Keulegan, Similitude conditions in free-surface vortex formations, Journal of Hydraulics Division, 100(11) (1974) 1565-1581.
- [8] H.O. Anwar, J.A. Weller, M.B. Amphlett, Similarity of free-vortex at horizontal intake, Journal of Hydraulic Research, 16(2) (1978) 95-105.
- [9] A.K. Jain, R.J. Garde, K.G. Ranga Raju, Vortex formation at vertical pipe intakes, Journal of the Hydraulics Division, 104(10) (1978) 1429-1445.
- [10] A.J. Odgaard, Free-surface air core vortex, Journal of

- Geometry of Headrace Channel on Vortex and Discharge coefficient. Iranian, J. Agricultural Sci., , 35(3) (2004) 10 (In persian).
- [21] A. Kabiri-Samani, S. Borghei, Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex, Scientia Iranica, 20(2) (2013) 251-258.
- [22] R. Shemshi, A. Kabiri-Samani, Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets, Journal of Hydraulic Research, 55(2) (2017) 248-258.
- Conference on Water, Soil, Plant and Mechanization of Agriculture, Islamic Azad University, Dezful Branch, 2010 pp. 1-7 (In persian).
- [19] E. Nohani, R. Jamali-Emamgheis, Experimental Investigation the Effect of Vortex Breakers Shape on Discharge Efficiency for the Morning Glory Spillways, Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 9(5) (2015) 741-749 (In persian).
- [20] M. Zomorredian, M. Shojaeian, Effect of the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Sayadzadeh, S.H. Musavi-Jahromi, H. Sedghi, A. Khosrojerdi, *Experimental Study of Pyramid Vortex Breakers Effect on the Discharge Coefficient of Submerged Morning Glory Spillway*, Amirkabir J. Civil Eng., 52(5) (2020) 1093-1108.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15213.5853](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15213.5853)



