

## بررسی ضریب دبی در سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن‌های هرمی با استفاده از مدل فیزیکی

فرزانه صیادزاده<sup>۱</sup>، سیدحبیب موسوی جهرمی<sup>۲\*</sup>، حسین صدقی<sup>۳</sup> و امیر خسرو جردی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۲</sup> استاد گروه عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(دریافت: ۹۷/۸/۱۸، پذیرش: ۹۸/۴/۲۳، نشر آنلاین: ۹۸/۴/۲۳)

### چکیده

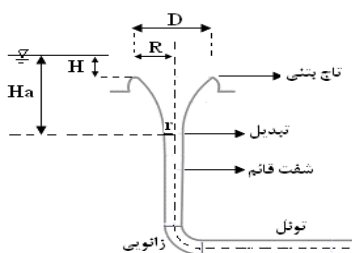
یکی از راهکارها جهت کاهش گرداب در سرریزهای نیلوفری و در نتیجه افزایش ضریب دبی سرریز، استفاده از گرداب‌شکن‌ها می‌باشد. در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری، تأثیر ابعاد و تعداد گرداب‌شکن‌های هرمی بر ضریب دبی سرریز مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصله و بهره‌گیری از رگرسیون غیر خطی، معادلات تجربی جهت تعیین ضریب دبی جریان سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن‌های هرمی به دست آمد. با مقایسه آماری نتایج روابط به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی، ضریب تعیین برای گرداب‌شکن هرمی مثلی در بخش کنترل تاج و روزنه به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۹ حاصل شد. به منظور بررسی تأثیر هر یک از عوامل تأثیرگذار بر ضریب دبی جریان سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن هرمی، آنالیز حساسیت نیز انجام گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که در کنترل تاج، حذف تعداد گرداب‌شکن هرمی و در کنترل روزنه حذف عمق استغراق از معادله تجربی ضریب دبی خطای بیشتری را موجب می‌شوند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که گرداب‌شکن هرمی مثلی با آرایش شش‌تایی در بخش کنترل تاج و روزنه به ترتیب با میانگین عملکرد ۵۰/۹۷ درصد و ۱۱/۸۰ درصد سبب افزایش ضریب دبی نسبت به سرریز شاهد می‌شوند.

**کلیدواژه‌ها:** سرریز نیلوفری، گرداب، ضریب دبی، هرمی، گرداب‌شکن.

### ۱- مقدمه

جریان‌های چرخشی و گرداب‌ها مشکل اصلی در آبگیرهای قائم و سرریزهای نیلوفری است که باعث کاهش ضریب دبی و کاهش بازده تخلیه جریان در این سیستم‌های هیدرولیکی خواهند شد (Shemshi و Kabiri-Samani, ۲۰۱۷).

مطابق شکل (۱) سرریز نیلوفری از چند قسمت تاج بتنی، تبدیل یا گلوگاه، شفت قائم، زانویی و تونل با شیب کم تشکیل یافته است. هرگاه ارتفاع آب روی تاج سرریز کم باشد، جریان آزاد و کنترل دبی جریان در تاج سرریز خواهد بود. با افزایش ارتفاع آب روی تاج سرریز، جریان نیمه‌مستغرق و به حالت روزنه عمل می‌کند و کنترل دبی در تبدیل اتفاق می‌افتد. با ادامه افزایش ارتفاع آب روی تاج، استغراق کامل سرریز و جریان مجاری تحت فشار حاکم می‌شود و دبی جریان توسط تونل پر کنترل می‌شود (USB, ۱۹۸۷).



شکل ۱- مقطع عرضی سرریز نیلوفری

رابطه دبی در حالت کنترل تاج مطابق رابطه (۱) و برای کنترل روزنه طبق رابطه (۲) برای سرریزهای نیلوفری به صورت زیر است: (USB, ۱۹۸۷; Christodoulou و همکاران, ۲۰۱۰):

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

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2gH}{a}} \quad (A = \pi r^2) \quad (2)$$

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۷۱۲۶۵۱۳

است. همچنین افزایش تعداد تیغه‌ها تا حد مشخصی موجب بهبود مشخصات جریان در شرایط استغراق می‌شود.

Kashkoli و همکاران (۲۰۱۳)، به وسیله مدل فیزیکی سرریز نیلوفری تأثیر تیغه‌های گرداب‌شکن در اشکال مختلف را بر ضریب دبی بررسی نمودند. نتایج حاصله نشان داد که عملکرد سرریز با آرایش شش‌تایی گرداب‌شکن‌های تیغه‌ای، دارای بازده و راندمان بالاتری است.

Musavi-Jahromi و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از مدل فیزیکی سرریز نیلوفری تأثیر گرداب‌شکن‌های زاویه‌دار را بر ضریب دبی مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که آرایش شش‌تایی گرداب-شکن با زاویه ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را در کاهش ارتفاع آب و افزایش ضریب دبی دارد.

Shemshi و Kabiri-Samani (۲۰۱۷)، با ساخت مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری تأثیر هندسه ورودی کلید پیانویی در تاج سرریز را بر آستانه استغراق و ضریب دبی مورد ارزیابی قرار دادند و با توجه به سناریوهای بررسی شده، نقش ورودی کلید پیانویی را در کاهش قدرت گرداب و افزایش ضریب دبی عبوری سرریزهای نیلوفری مناسب معرفی نمودند.

نوحانی و موسوی جهرمی (۱۳۸۸)، با مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری تأثیر تعداد و ضخامت تیغه‌های گرداب‌شکن را بر قدرت گرداب حلزونی و بازدهی سیستم تخلیه، مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از تیغه‌ها باعث افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصد ضریب دبی بسته به نوع سرریز نیلوفری (لبه تیز یا لبه پهن) خواهد شد.

جمالی امام‌قیس و نوحانی (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴)، با مدل آزمایشگاهی تأثیر گرداب‌شکن‌های تیغه‌ای با اشکال مختلف در آرایش شش‌تایی را بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از تیغه‌های ضد گرداب باعث به تعویق افتادن تشکیل گرداب نسبت به سرریز شاهد می‌شود و در حالت کلی تیغه ضد گرداب باله‌ای نسبت به تیغه ضد گرداب مستطیلی تأثیر بیشتری بر افزایش ضریب تخلیه دارد.

در این تحقیق مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری جهت بررسی تأثیر گرداب‌شکن هرمی با قاعده مثلثی، در ابعاد مختلف برای آرایش‌های سه‌تایی، چهارتایی و شش‌تایی بر ضریب دبی سرریز استفاده شد. از لحاظ معماری، در سازه‌های هرمی انتقال نیروها از نقطه اوج سازه به بخش‌های تحتانی ساده‌تر بوده و دارای سطح اتکا بیشتر و پایداری بالایی از لحاظ سازه‌ای می‌باشند. تاکنون اثر گرداب‌شکن‌های هرمی در تضعیف گرداب سرریزهای نیلوفری مورد توجه محققین سازه‌های هیدرولیکی قرار نگرفته است. از اهداف اصلی این تحقیق، به دست آوردن رابطه تجربی ضریب دبی سرریز نیلوفری با نصب گرداب‌شکن هرمی و تعیین ابعاد و تعداد گرداب‌شکن هرمی در بهبود عملکرد ضریب دبی می‌باشد.

که در این روابط  $Q$  دبی عبوری از سرریز نیلوفری،  $C_d$  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 می‌باشند. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی شکل‌گیری جریان‌های چرخشی، قدرت گرداب‌ها و آستانه استغراق در آبگیرهای قائم توسط محققین مختلفی نظیر Anwar (۱۹۶۶)؛ Zielinski و Villemonte (۱۹۶۸)؛ Daggett و Keulegan (۱۹۷۴)؛ Jain و همکاران (۱۹۷۸)؛ Odgaard (۱۹۸۶)؛ Yildirim و Kocabaş (۲۰۰۲)؛ Wang و همکاران (۲۰۱۱)؛ Yang و همکاران (۲۰۱۴)؛ Suerich-Gulick و همکاران (۲۰۱۴)؛ Liu و Sun (۲۰۱۵)، صورت گرفته است. از راهکارهای رایج جهت کاهش قدرت گرداب و افزایش ضریب دبی عبوری در آبگیرهای قائم و سرریزهای نیلوفری، نصب سازه‌های متنوع ضد گرداب در دهانه آبگیرهای قائم و در تاج سرریزهای نیلوفری می‌باشد (Nohani, ۲۰۱۴).

Fattor و Bacchiega (۲۰۰۱)، با مطالعه شروع وضعیت استغراق در سرریز نیلوفری نشان دادند که این وضعیت ناپایدار و شدید است و اگر سرریز مستغرق باشد مقدار دبی ۱/۳۴ برابر دبی حالت آزاد می‌باشد.

Christodoulou و همکاران (۲۰۱۰)، با مدل آزمایشگاهی سرریز نیلوفری تأثیر نصب پایه‌ها در تاج سرریز را بر دبی عبوری مطالعه نمودند و نتیجه گرفتند که موقعیت پایه‌ها بر روی تاج سرریز، تأثیر منفی گرداب را در دبی‌های زیاد کاهش خواهد داد. Tavana و همکاران (۲۰۱۱)، با ساخت مدل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر تعداد و ارتفاع پره‌های گرداب‌شکن بر ضریب دبی سرریز نیلوفری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نصب گرداب‌شکن‌های پره‌ای بلند در آرایش شش‌تایی و هشت‌تایی موجب افزایش ضریب تخلیه سرریز می‌شود و با افزایش عمق استغراق، ضریب تخلیه سرریز کاهش می‌یابد.

Kabiri-Samani و Borghei (۲۰۱۳)، تأثیر نصب صفحات گرداب‌شکن مستطیلی در رأس ورودی مدل آزمایشگاهی لوله آبگیر قائم را بر قدرت گرداب مطالعه نمودند. نتایج حاصله نشان داد که هرگونه عدم تقارن در قرارگیری صفحات گرداب‌شکن، درصد هوای موجود در گرداب را افزایش می‌دهد و در نتیجه دبی عبوری کاهش می‌یابد.

Mousavi و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تیغه‌های گرداب‌شکن بر مشخصات جریان در آستانه استغراق سرریزهای نیلوفری با مقطع مربعی و دایره‌ای پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه، تأثیر تعداد گرداب‌شکن تیغه‌ای بر افزایش ضریب دبی سرریز نیلوفری با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مربعی

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- آنالیز ابعادی

در این تحقیق از قضیه پی باکینگهام برای آنالیز ابعادی استفاده شد که ابتدا پارامترهای مؤثر بر پدیده جریان گردابی و ضریب دبی سرریز نیلوفری استخراج گردید و سپس بی‌بعدسازی صورت گرفت. رابطه زیر با استفاده از متغیرهای مؤثر در مسأله ایجاد گردید:

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

که  $C_d$  ضریب دبی سرریز نیلوفری،  $\rho$  جرم مخصوص،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $g$  شتاب ثقل،  $V$  سرعت سیال،  $H$  ارتفاع آب روی تاج سرریز نیلوفری،  $D$  قطر تاج سرریز نیلوفری،  $h$  ارتفاع گرداب‌شکن‌ها،  $t$  ضخامت گرداب‌شکن‌ها،  $b$  عرض گرداب‌شکن‌ها،  $n$  تعداد گرداب‌شکن‌ها می‌باشند. پس از آنالیز ابعادی رابطه زیر استخراج گردید:

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

که  $Re_e$  عدد رینولدز،  $F_r$  عدد فرود و  $We_e$  عدد وبر هستند. به دلیل این که در این تحقیق هرم‌ها به صورت مثلث متساوی‌الاضلاع در نظر گرفته شد، لذا عرض و ضخامت در قاعده باهم برابر می‌باشند.

بر اساس محدوده توصیه شده برای عدد وبر و عدد رینولدز توسط محققینی که در جدول (۱) اشاره شده است و شرایط دبی آزمایشگاهی این تحقیق، از اعداد وبر و رینولدز به دلیل تأثیر کم در گرداب صرف‌نظر شد.

جدول (۲) محدوده تغییرات پارامترهای مستقل تأثیرگذار در این پژوهش را نشان می‌دهد. بنابراین معادله نهایی آنالیز ابعادی در این تحقیق به صورت زیر بیان شد:

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

## جدول ۱- محدوده اعداد رینولدز و وبر برای حذف لزجت و

## کشش سطحی

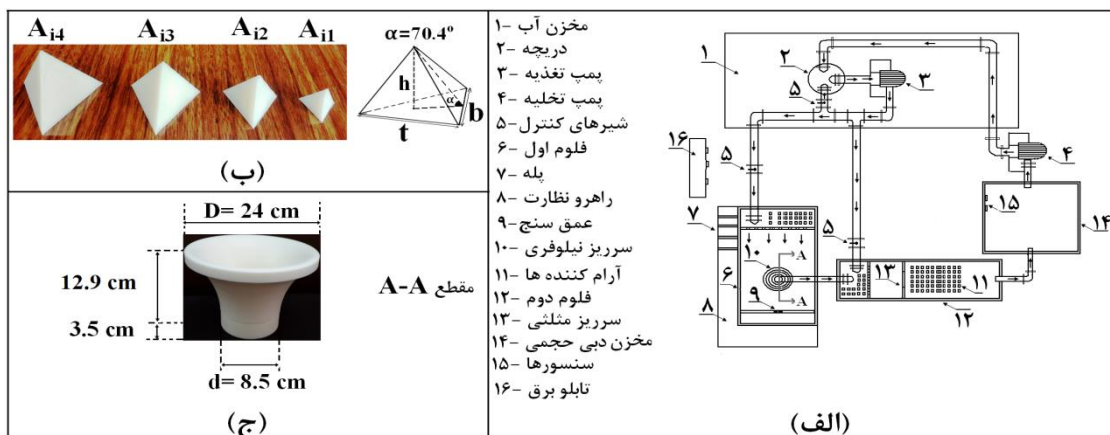
محقق	$Re$	$We$
Anwar و همکاران (۱۹۷۸)	$Re > 2 \times 10^4$	$We > 100$
Daggett و Keulegan (۱۹۷۴)	$Re > 3 \times 10^4$	$We > 120$
Jain و همکاران (۱۹۷۸)	$Re > 5 \times 10^4$	$We > 120$

## جدول ۲- محدوده متغیرهای آزمایشگاهی تحقیق حاضر

متغیر	محدوده
$F_r$	۳/۱۹۶ - ۰/۳۰۷
$h/D$	۰/۱۷۰ - ۰/۰۶۸
$b/D$	۰/۲۰۸ - ۰/۰۸۳
$H/D$	۰/۶۲۲ - ۰/۰۵
$n$	۶ - ۰

## ۲-۲- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری مطابق شکل (۲-الف) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران، تأثیر ابعاد و تعداد گرداب‌شکن هرمی با قاعده مثلثی در ابعاد و آرایش‌های مختلف بر ضریب دبی سرریز مورد بررسی قرار گرفت و تعداد ۱۶۵ آزمایش در محدوده دبی ۱/۷ تا ۷/۵ لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب روی تاج از ۱۲ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر انجام شد. به طور کلی مدل شامل یک مخزن آبیگری (از جنس پلی‌اتیلن سه لایه به حجم ۳۰۰۰ لیتر)، فلوم اول (از جنس پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، عرض ۱۲۰ سانتی‌متر و طول ۱۲۰ سانتی‌متر)، فلوم دوم (از جنس پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر و طول ۱۸۰ سانتی‌متر) و یک مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی (از جنس پلکسی‌گلاس به حجم ۴۴۰ لیتر)، سرریز نیلوفری، سرریز مثلثی، پمپ‌ها، تجهیزات انتقال آب، تجهیزات بای‌پس آب، وسایل اندازه‌گیری سطح آب و گرداب‌شکن‌ها در نظر گرفته شد. برای چرخش آب در آزمایشگاه، از دو سری پمپ با محدوده دبی ۲۵۰ تا ۱۱۰۰ لیتر بر دقیقه استفاده شد که به نام پمپ تغذیه برای انتقال آب از مخزن آبیگری 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 آبیگری منتقل می‌نمود. سه شیر برای تنظیم دبی جریان در نظر گرفته شد. ابتدا واسنجی سرریز مثلثی توسط مخزن اندازه‌گیری دبی به روش حجمی و سنسورهای متصل به دو دستگاه الکترونیکی کنترل سطح مایعات مدل میکرومکس LLC-110X با حساسیت قابل تنظیم از ۱ الی ۲۰ کیلوهاجم و نمایشگر دیجیتالی کانتر تایمر مدل آتونیکس CTS 6S-1P4 با دقت تا ۶ رقم انجام شد. ارتفاع آب روی تاج سرریز نیلوفری شاهد به وسیله عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و هم‌زمان دبی خروجی از تونل آب‌بر سرریز نیلوفری با سرریز مثلثی واسنجی شده برداشت شد یک نقطه از منحنی دبی-اشل سرریز نیلوفری شاهد ( $M$ ) محاسبه گردید. گرداب‌شکن هرمی با قاعده مثلثی ( $A_{ij}$ ) در حالت قائم بر دهانه سرریز و آرایش‌های سه‌تایی ( $i=3$ )، چهار-تایی ( $i=4$ ) و شش‌تایی ( $i=6$ ) در ابعاد متفاوت (۲، ۳، ۴، ۱) برای دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند.

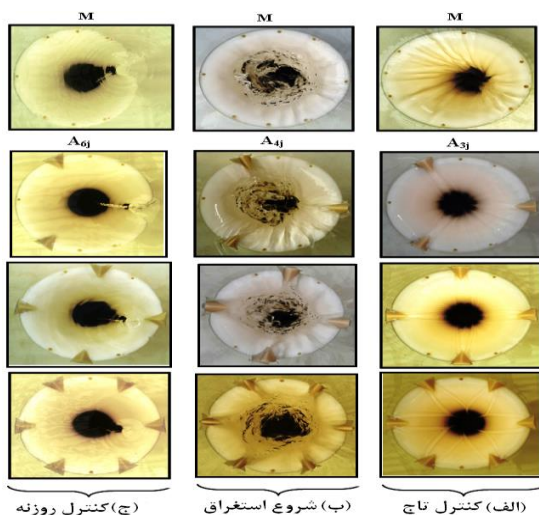


شکل ۲- پلان و نمای کلی مدل فیزیکی در آزمایشگاه

۳- نتایج و بحث

۱-۳- مشاهدات

مطابق شکل (۳-الف)، مشاهده شد که در دبی کم و ارتفاع کم آب روی تاج سرریز، جریان به صورت نیمه پر سمت دیواره سرریز متمایل شد و جریان آزاد و کنترل جریان در تاج سرریز برقرار گردید. با افزایش دبی، ضخامت فواره جریان بیشتر شد و حالت جوش و ورودی سرریز را اشغال نمود و گرداب‌های کوچک و فرورفتگی جزئی در سطح جریان نمایان شد و یک حالت استغراق موقتی در جریان ایجاد گردید (۳-ب). با ادامه افزایش دبی، قسمت کنترل به تبدیل قائم منتقل گردید و جریان مستغرق و دبی جریان توسط جریان روزه‌ای کنترل شد که گرداب‌های بزرگتر با هسته هوا تشکیل شد (۵-ج).



شکل ۳- مشاهدات با نصب گرداب‌شکن‌های هرمی در آرایش‌های مختلف

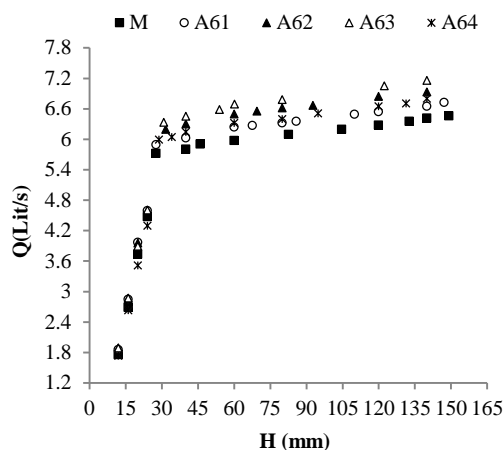
پارامترهای هندسی گرداب‌شکن‌ها در جدول (۳) و شکل (۲-ب) نمایش داده شده است. همچنین تعداد و نام آزمایشات نیز در جدول (۴) نشان داده شد. برای ساخت مدل سرریز نیلوفری پس از طراحی (USBR، ۱۹۸۷)، مختصات منحنی سرریز در نرم-افزار Catia وارد شد و سپس به فایل‌های قابل تبدیل دستگاه CNC انتقال یافت و نهایتاً توسط دستگاه تراش CNC مدل سرریز نیلوفری به دست آمد. در شکل (۲-ج) بدنه سرریز نیلوفری به قطر تاج ۲۴ سانتی‌متر، قطر گلوگاه سرریز به قطر ۸/۵ سانتی‌متر در فاصله ۱۲/۹ سانتی‌متری از تاج سرریز و مجرای تونل آب‌بر هم قطر با تبدیل طراحی شد. طول تونل آب‌بر برابر ۱ متر با زانویی ۹۰ درجه و شفت قائم می‌باشد. برای اتصال بدنه سرریز و مجرای تونل آب‌بر (از جنس لوله پلیکا به قطر ۳ اینچ)، از یک مبدل به ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر استفاده شد. جهت ایجاد سطوح کاملاً صیقلی از پلی آمید صنعتی برای قیف سرریز، گرداب‌شکن‌ها و تبدیل استفاده شد.

جدول ۳- پارامترهای هندسی گرداب‌شکن‌های هرمی

علامت	نام گرداب‌شکن هرمی مثلثی	h (mm)	b=t (mm)	h/D	b/D
M	شاهد	—	—	—	—
A <sub>i1</sub>	نوع اول	۱۶/۳	۲۰	۰/۰۶۸	۰/۰۸۳
A <sub>i2</sub>	نوع دوم	۲۴/۵	۳۰	۰/۱۰۲	۰/۱۲۵
A <sub>i3</sub>	نوع سوم	۳۲/۷	۴۰	۰/۱۳۶	۰/۱۶۷
A <sub>i4</sub>	نوع چهارم	۴۰/۸	۵۰	۰/۱۷۰	۰/۲۰۸

جدول ۴- نام و تعداد آزمایش

A <sub>34</sub>	A <sub>33</sub>	A <sub>32</sub>	A <sub>31</sub>	M	نام آزمایش
۱۴	۱۲	۱۳	۱۳	۱۴	تعداد آزمایش
A <sub>44</sub>	A <sub>43</sub>	A <sub>42</sub>	A <sub>41</sub>	M	نام آزمایش
۱۱	۱۲	۱۳	۱۳	۱۴	تعداد آزمایش
A <sub>64</sub>	A <sub>63</sub>	A <sub>62</sub>	A <sub>61</sub>	M	نام آزمایش
۱۳	۱۱	۱۲	۱۴	۱۴	تعداد آزمایش



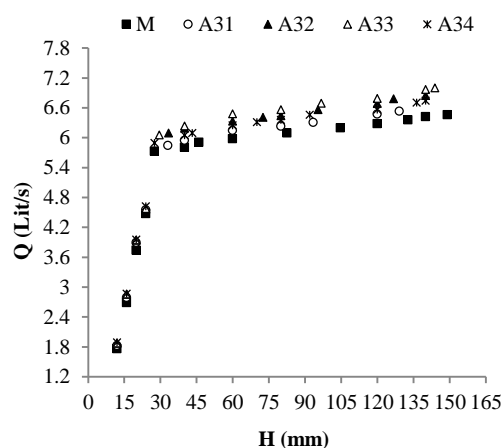
شکل ۶- تغییرات دبی- اشل با ۶ گرداب شکن هرمی

۳-۳- تأثیر گرداب شکن هرمی بر ضریب دبی سرریز

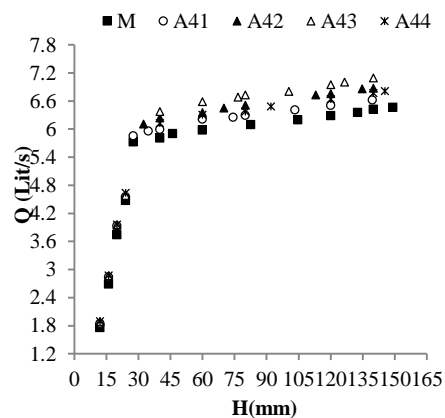
در این تحقیق، برای محاسبه ضریب دبی در بخش کنترل تاج از رابطه (۱) و در بخش کنترل روزنه برای شرایط استغراق از رابطه (۲) برای هر آزمایش استفاده شد. نمودارهای ضریب دبی- عمق استغراقی برای سرریز شاهد (M) و با گرداب شکن هرمی مثلثی (A) برای کنترل تاج در شکل های (۷) تا (۹) و برای کنترل روزنه در شکل های (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده است. نتایج این شکل ها نشان می دهد که روند تغییرات عمق استغراقی در برابر ضریب دبی سرریز در بخش تاج و روزنه برای هر سه آرایش گرداب شکن هرمی مثلثی، در محدوده آزمایشات نزولی است و با افزایش عمق استغراقی، کاهش ضریب دبی مشاهده شد و با نصب گرداب شکن های هرمی مثلثی، ضریب دبی سرریز نیلوفری نسبت به حالت بدون گرداب شکن افزایش یافت. نتایج شکل های (۶) و (۷) نشان می دهد که در بخش کنترل تاج با آرایش سه تایی و چهار تایی، ضریب دبی گرداب شکن هرمی مثلثی نوع چهارم (A44 و A34) به ابعاد  $b/D=0/208$  و  $h/D=0/170$  در مقایسه با بقیه ابعاد باعث افزایش ضریب دبی می شود. اما نتایج شکل (۱۰) نشان می دهد که در بخش کنترل تاج با آرایش شش تایی، گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A63) به ابعاد  $b/D=0/167$  و  $h/D=0/136$  بیشترین ضریب دبی را در مقایسه با بقیه دارد. علت این است که در بخش کنترل تاج با افزایش تعداد و ابعاد گرداب شکن هرمی، محیط مؤثر تاج برای عبور جریان آزاد به داخل شفت سرریز کاهش می یابد و خطوط جریان به هم نزدیک تر و آشفتگی جریان اتفاق می افتد. بنابراین برای آرایش شش تایی کنترل تاج، ضریب دبی گرداب شکن هرمی مثلثی نوع چهارم کمتر از نوع سوم خواهد شد. اما برای شرایط استغراقی نتایج شکل های (۱۰) تا (۱۲) در کنترل روزنه نشان می دهد که گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A۱۳) در آرایش شش تایی تأثیر بیشتری بر افزایش ضریب دبی سرریز دارد.

۳-۲- تأثیر گرداب شکن هرمی بر دبی- اشل سرریز

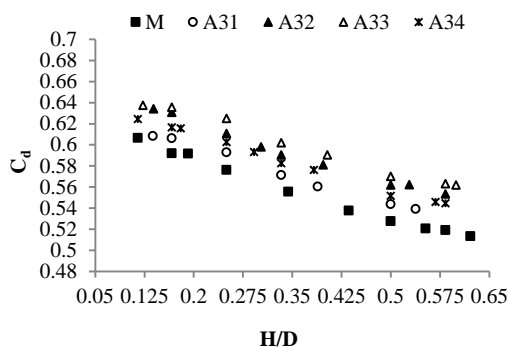
ابتدا نمودارهای دبی- اشل برای سرریز شاهد بدون گرداب شکن (M) و با گرداب شکن هرمی مثلثی (A) در ابعاد متفاوت برای آرایش های سه تایی، چهار تایی و شش تایی در شکل های (۴) الی (۶) ارائه شد. مشاهده شد که برای دبی های کم، منحنی ها در بخش کنترل تاج بر هم منطبق می شوند و با افزایش دبی در بخش کنترل روزنه، منحنی ها از هم جدا می شوند. به ازای دبی ثابت در کنترل روزنه (شرایط استغراق) وجود گرداب شکن هرمی، ارتفاع آب روی تاج سرریز را بین ۱۵ تا ۷۰ درصد کاهش می دهد و به ازای ارتفاع های ثابت آب روی تاج، گرداب شکن هرمی باعث افزایش دبی و افزایش راندمان عملکرد سرریز می گردد. همچنین نتایج این نمودارها در بخش کنترل روزنه نشان داد که گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم (A۱۳) در آرایش سه تایی، چهار تایی و شش تایی بیشترین تأثیر را بر افزایش دبی عبوری سرریز دارد و باعث انحراف بیشتر خطوط جریان گردابی به سمت خروجی شفت سرریز و در نتیجه افزایش راندمان جریان عبوری خواهد شد.



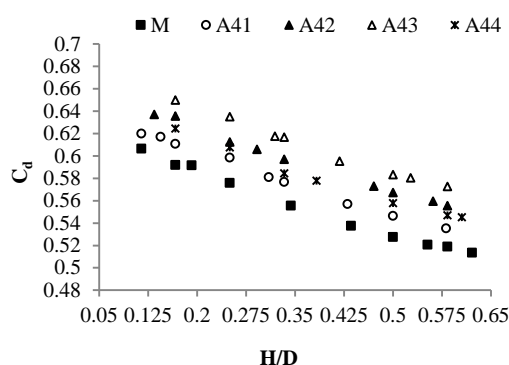
شکل ۴- تغییرات دبی- اشل با ۳ گرداب شکن هرمی



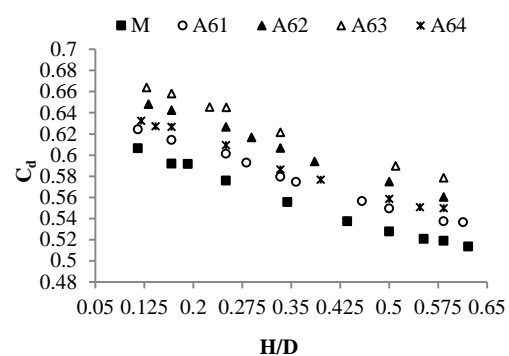
شکل ۵- تغییرات دبی- اشل با ۴ گرداب شکن هرمی



شکل ۱۰- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل روزنه با ۳ گرداب شکن هرمی مثلثی



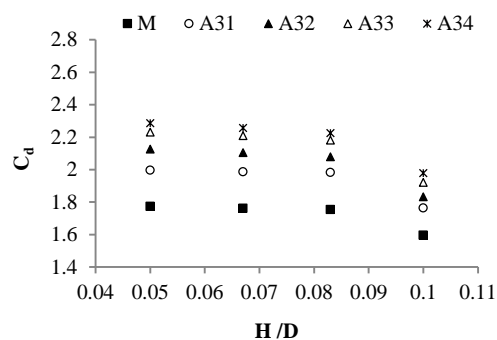
شکل ۱۱- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل روزنه با ۴ گرداب شکن هرمی مثلثی



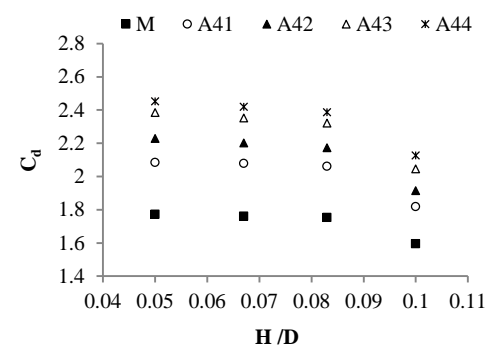
شکل ۱۲- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل روزنه با ۶ گرداب شکن هرمی مثلثی

همچنین در این تحقیق، نمودارهای ضریب دبی- تعداد گرداب شکن برای عمق استغراق های یکسان در شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب در کنترل تاج و کنترل روزنه بررسی شد. نتایج نشان می دهد که هر چه تعداد گرداب شکن های هرمی مثلثی از ۳ به ۶ افزایش می یابد، به تبع آن ضریب دبی افزایش خواهد یافت. علت این است که در آرایش شش تایی تعداد یال ها و سطوح جانبی

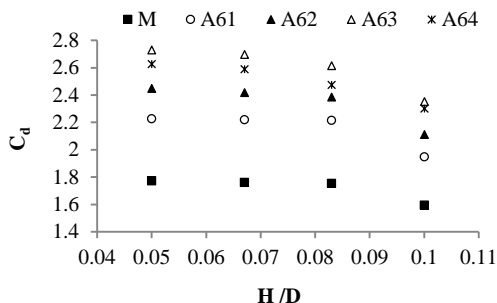
بنابر این گرداب شکن هرمی مثلثی به ابعاد  $b/D=0/167$  و  $h/D=0/136$  در کنترل تاج و روزنه با آرایش شش تایی که بیشترین تأثیر را در افزایش ضریب دبی عبوری سرریز را بر عهده دارد، پیشنهاد می شود و در نتیجه گرداب شکن هرمی مثلثی نوع سوم نقش بیشتری در اصلاح مسیر جریان گردابی و افزایش ضریب دبی دارد.



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل تاج با ۳ گرداب شکن هرمی مثلثی



شکل ۸- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل تاج با ۴ گرداب شکن هرمی مثلثی



شکل ۹- تغییرات ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در بخش کنترل تاج با ۶ گرداب شکن هرمی مثلثی



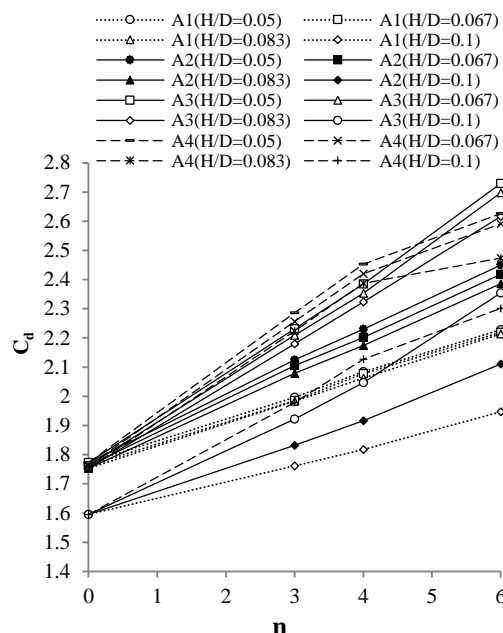
همچنین به منظور یافتن بهترین تعداد و ابعاد گرداب‌شکن‌های هرمی، ضریب دبی حاصل از هر آزمایش را بر ضریب دبی سرریز شاهد تقسیم شد و بنام شاخص ضریب دبی ( $C_d$  (Index)) طبق رابطه (۶) در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) برای عمق استغراق‌های نظیر یکسان به ترتیب در کنترل تاج و کنترل روزنه ارائه شد. میانگین درصد عملکرد ضریب دبی ( $P$  (Average) %) طبق رابطه (۷) در شکل (۱۷) برای کنترل تاج و شکل (۱۸) برای کنترل روزنه نشان داده شد:

$$C_d(\text{Index}) = \frac{C_d(i,j)}{C_d(M)} \quad (6)$$

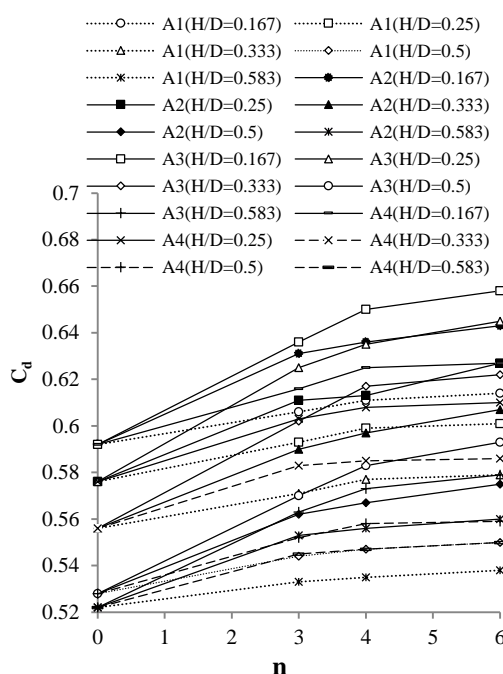
$$\% P_{(\text{Average})} = \left( \frac{1}{n} \sum \frac{C_d(i,j) - C_d(M)}{C_d(M)} \right) \times 100 \quad (7)$$

که در روابط مذکور،  $C_d(M)$  ضریب دبی سرریز شاهد بدون گرداب‌شکن و  $C_d(i,j)$  ضریب دبی با گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی می‌باشد. نتایج شکل (۱۵) تا (۱۸) نشان می‌دهد که در آرایش شش‌تایی گرداب‌شکن هرمی مثلثی نوع سوم ( $A_{i3}$ ) به ابعاد برابر  $h/D=0.136$  و  $b/D=0.167$  با میانگین درصد عملکرد ضریب دبی برابر  $50.97\%$  در کنترل تاج و  $11.80\%$  در کنترل روزنه بیشترین تأثیر را در افزایش ضریب دبی نسبت به شاهد دارد. برای شرایط استغراق با آرایش شش‌تایی، گرداب‌شکن هرمی مثلثی نوع سوم باعث شکست بیشتر خطوط جریان و انحراف آنها به صورت مسیر مستقیم به سمت خروجی می‌شود و باعث کاهش سرعت مماسی در گرداب، کاهش اثر گردابه‌ها و ایجاد گرداب‌های نسبتاً ماندگار در مقایسه با بقیه آرایش‌ها می‌شود. از طرفی در شرایط استغراق، افزایش ابعاد گرداب‌شکن هرمی تا محدوده‌ای تأثیر بسزایی در افزایش ضریب دبی دارد. مطابق شکل (۱۶) و (۱۸)، این تأثیر در ابعاد بزرگتر گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی کم‌تر می‌شود، طوری که گرداب‌شکن هرمی مثلثی نوع چهارم در شرایط استغراق به ابعاد  $h/D=0.170$  و  $b/D=0.208$  مقدار  $4.4\%$  الی  $5.8\%$  سبب افزایش میانگین درصد عملکرد ضریب دبی در هر سه نوع آرایش می‌شود و افزایش ابعاد گرداب‌شکن هرمی نوع چهارم در مقایسه با افزایش تعداد آن مانع از تأثیر آن بر افزایش ضریب دبی خواهد شد. همچنین آرایش شش‌تایی نسبت به آرایش چهارتایی این نوع گرداب‌شکن هیچ برتری در افزایش ضریب دبی نسبت به یکدیگر ندارند. بنابراین افزایش ابعاد گرداب‌شکن هرمی مثلثی بیش از مقدار معینی، با وجود اصلاح جریان در شرایط استغراق خود به صورت مانعی در ورودی سرریز موجب ایجاد افت در مسیر جریان می‌شود و اثر این افت بیش از اثر اصلاحی گرداب‌شکن‌ها است و خود را به صورت افزایش ارتفاع آب روی سرریز، کاهش دبی و کاهش ضریب دبی در مقایسه با بقیه ابعاد گرداب‌شکن‌ها نشان می‌دهد. بنابراین در این تحقیق افزایش در ابعاد گرداب‌شکن هرمی مثلثی از یک حد مشخص به بعد، توصیه نمی‌شود.

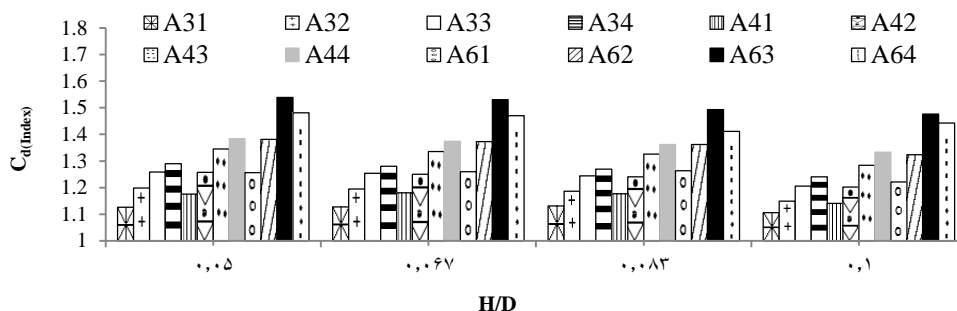
برخورد با جریان بیشتر از آرایش چهارتایی و سه‌تایی است و نتیجه موجب شکست خطوط جریان، کاهش اثر گردابی و افزایش ضریب دبی سرریز خواهد شد.



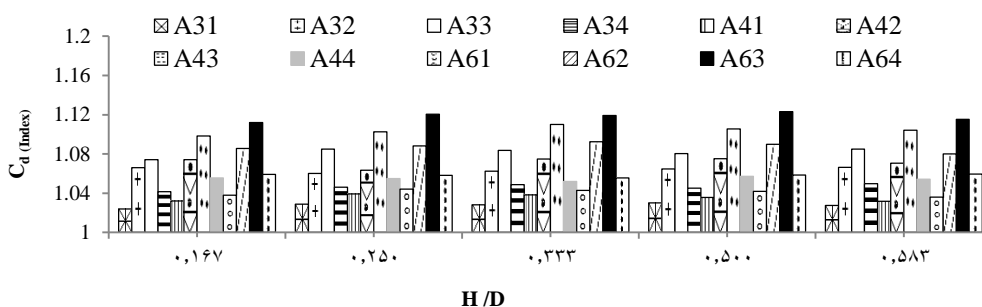
شکل ۱۳- تغییرات ضریب دبی نسبت به تعداد گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل تاج



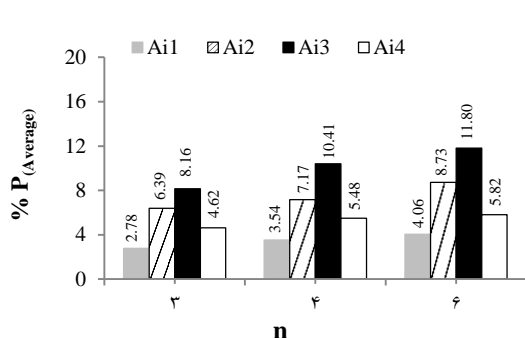
شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی نسبت به تعداد گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل روزنه



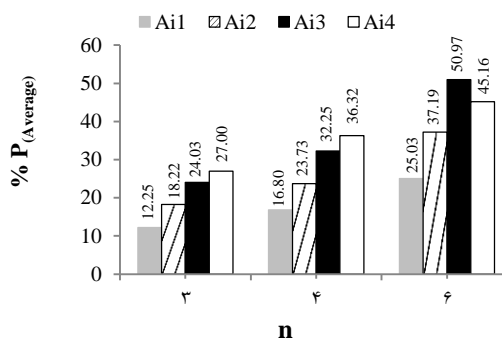
شکل ۱۵- تغییرات شاخص ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در کنترل تاج برای آرایش‌های سه‌تایی، چهارتایی و شش‌تایی



شکل ۱۶- تغییرات شاخص ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در کنترل روزنه برای آرایش‌های سه‌تایی، چهارتایی و شش‌تایی



شکل ۱۸- میانگین درصد عملکرد ضریب دبی نسبت به تعداد گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل روزنه

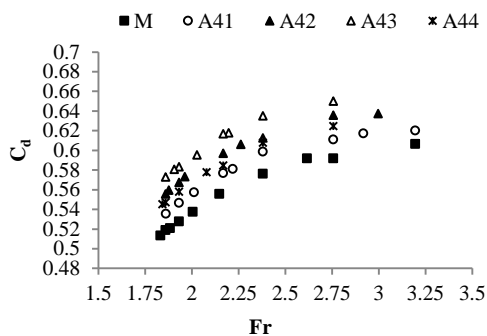


شکل ۱۷- میانگین درصد عملکرد ضریب دبی نسبت به تعداد گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل تاج

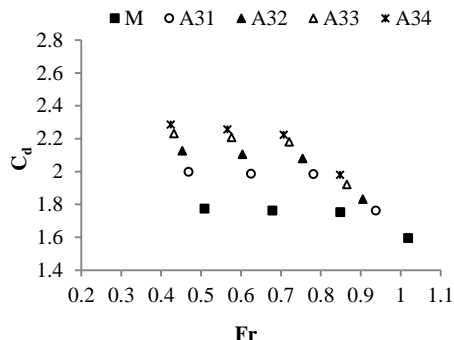
عدد فرود رابطه مستقیم دارد. به واسطه ارتباط مستقیم درصد ورود هوا به سرریز نیلوفری در عددهای فرود بالا که عکس آن در فرودهای پایین اتفاق خواهد افتاد، موجب کاهش و افزایش ضریب دبی سرریز می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روند تغییرات عدد فرود با ضریب دبی در کنترل تاج و روزنه با نتایج Borghei و Kabiri-Samani (۲۰۱۳)، سازگاری نشان می‌دهد.

همچنین تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود برای سرریز شاهد (M) و با گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی (A) در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) برای کنترل تاج و شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) برای کنترل روزنه نشان داده شد. نتایج نشان می‌دهد که به ازای عدد فرود یکسان، ضریب دبی در حالت با گرداب‌شکن هرمی مثلثی بیشتر از بدون گرداب‌شکن می‌باشد. در کنترل تاج با افزایش عدد فرود، ضریب دبی کاهش می‌یابد. در بخش کنترل روزنه با افزایش عدد فرود، ضریب دبی افزایش می‌یابد یعنی با کاهش ارتفاع آب روی تاج عدد فرود افزایش می‌یابد و ضریب دبی در همه حالت‌های گرداب‌شکن با

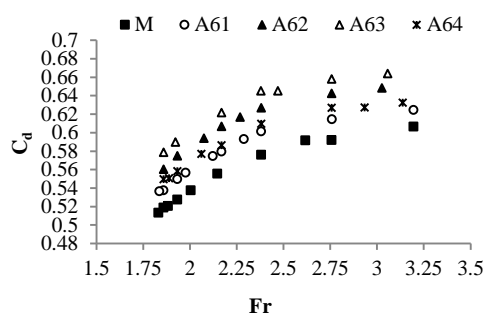




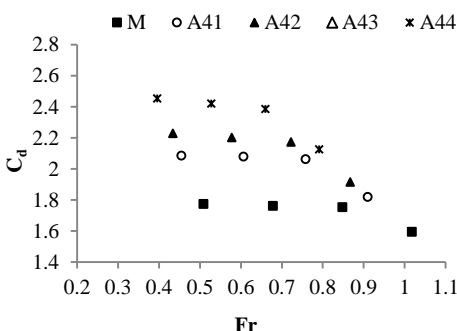
شکل ۲۳- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل روزنه با ۴ گرداب شکن هرمی



شکل ۱۹- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل تاج با ۳ گرداب شکن هرمی



شکل ۲۴- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل روزنه با ۶ گرداب شکن هرمی



شکل ۲۰- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل تاج با ۴ گرداب شکن هرمی

### ۳-۴- استخراج رابطه تجربی برای ضریب دبی سرریز

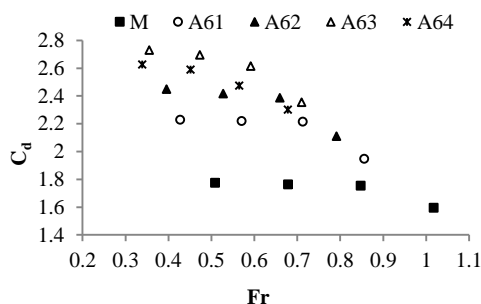
#### نیلوفری با گرداب شکن هرمی و تحلیل حساسیت

در این پژوهش برای انجام تحلیل‌ها از رگرسیون غیرخطی و با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، روابط تجربی زیر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای برآورد ضریب دبی سرریز نیلوفری با گرداب شکن هرمی مثلی استخراج شد که رابطه (۸) و (۹) به ترتیب برای تاج و روزنه مثلی می‌باشد:

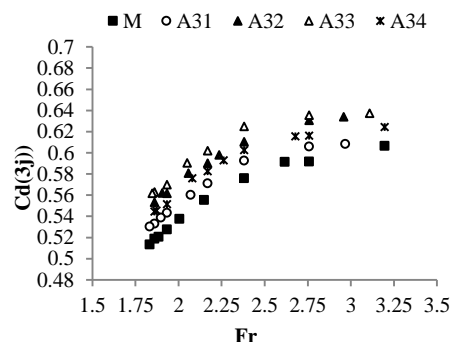
$$C_d = 16.854 \left( \exp\left(\frac{H}{D}\right) \right)^{-0.195} + 138.077 \frac{b}{D} - 166.572 \frac{h}{D} + 0.004(n)^{2.48} - 0.223(F_r)^{3.516} - 14.806 \quad (8)$$

$$C_d = 0.721 \left( \exp\left(\frac{H}{D}\right) \right)^{-2.646} + 45.82 \frac{b}{D} - 56.064 \frac{h}{D} + 0.013(n)^{0.54} + 1.304(F_r)^{-1.138} - 0.279 \quad (9)$$

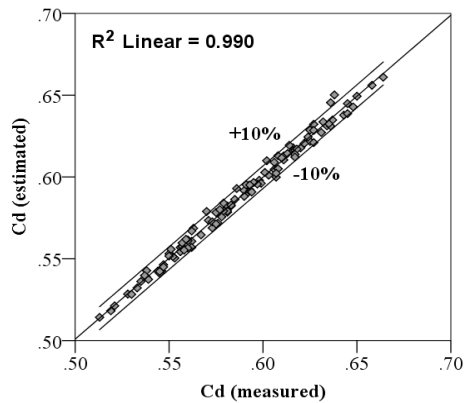
که رابطه (۸) در کنترل تاج برای  $0.17 \leq h/D \leq 0.68$  و  $0.08 \leq b/D \leq 0.13$ ، در کنترل روزنه برای  $0.17 \leq h/D \leq 0.68$  و  $0.08 \leq b/D \leq 0.13$ ،  $0.115 \leq H/D \leq 0.421$  معتبر است. به منظور بررسی خطا و دقت



شکل ۲۱- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل تاج با ۶ گرداب شکن هرمی



شکل ۲۲- تغییرات ضریب دبی نسبت به عدد فرود در بخش کنترل روزنه با ۳ گرداب شکن هرمی



شکل ۲۶- مقایسه نتایج ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسباتی در گرداب‌شکن هرمی مثلثی بخش کنترل روزنه

برای بررسی حساسیت معادلات تجربی ضریب دبی نسبت به هر یک از متغیرهای مؤثر، تحلیل حساسیت با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. در هر مرحله با حذف تک تک عوامل بی‌بعد  $Fr$ ،  $n$ ،  $h/D$ ،  $b/D$ ،  $H/D$  از معادلات تجربی (۷) و (۸)، کمیت‌های آماری MAE، RMSE و NRMSE مطابق جدول (۶) ارزیابی شد. مقادیر MAE، RMSE و NRMSE نشان می‌دهد که میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل تاج (معادله (۷)) به ترتیب نسبت به  $h/D$ ،  $b/D$ ،  $n$ ،  $Fr$  و  $H/D$  است. همچنین میزان حساسیت معادله تجربی ضریب دبی با گرداب‌شکن هرمی مثلثی در کنترل روزنه (معادله (۸)) به ترتیب نسبت به  $H/D$ ،  $b/D$ ،  $h/D$ ،  $n$  و  $Fr$  می‌باشد. بنابراین طبق نتایج آنالیز حساسیت، بیشترین میزان حساسیت روابط تجربی ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در کنترل روزنه و نسبت به تعداد گرداب‌شکن در کنترل تاج می‌باشد.

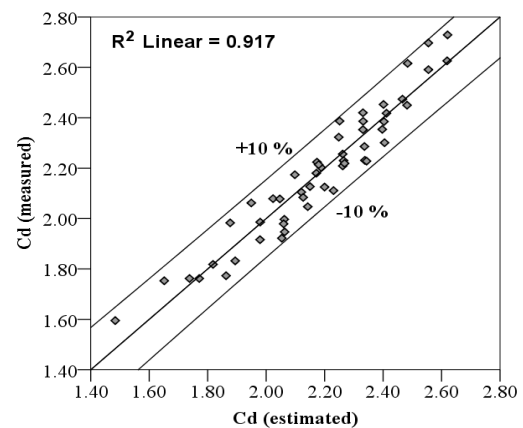
جدول ۶- بررسی حساسیت معادلات تجربی ضریب دبی

معادله (۷)					
حذف	$H/D$	$b/D$	$h/D$	$n$	$Fr$
MAE	۰/۰۵۸	۰/۰۶۷۳	۰/۰۶۷۰	۰/۰۹۹۰	۰/۰۶۳۲
RMSE	۰/۰۸۱۲	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۲۹	۰/۱۱۵۴	۰/۰۷۴۷
NRMSE	۰/۰۳۷۲	۰/۰۳۸۲	۰/۰۳۸۰	۰/۰۵۲۹	۰/۰۳۴۲
معادله (۸)					
حذف	$H/D$	$b/D$	$h/D$	$n$	$Fr$
MAE	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۳۰
RMSE	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۲۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۳۹
NRMSE	۰/۰۲۷۵	۰/۰۲۳۳	۰/۰۲۰۷	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۶۷

هر یک از روابط مذکور علاوه بر محاسبه ضریب تعیین  $(R^2)$ ، از مقادیر میانگین خطای مطلق  $(MAE)$ ، جذر میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$ ، جذر میانگین مربعات خطای نرمال  $(NRMSE)$ ، مجموع مجذور باقی‌مانده‌ها  $(RSS)$  و خطای مطلق نسبی  $(RAE)$  در جدول (۵) استفاده شد که نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب، خطای بسیار کم و ضریب تعیین بالا برای روابط مذکور است. برای بررسی بیشتر، نتایج ضریب دبی محاسباتی و مشاهداتی گرداب‌شکن هرمی مثلثی در شکل‌های (۲۵) و (۲۶) به ترتیب برای کنترل تاج و روزنه ارائه شد. همان‌طور که مشخص است ضرایب دبی محاسباتی در برابر ضرایب دبی مشاهداتی با سطح اطمینان ۹۵٪ برای گرداب‌شکن هرمی مثلثی در محدوده تغییرات  $\pm 10\%$  درصد قرار دارند و روابط به دست آمده محدوده وسیعی از داده‌های مشاهداتی را دربر می‌گیرند.

جدول ۵- خطاهای برآورد شده برای معادلات تجربی (۷) و (۸)

معادله (۷)		معادله (۸)	
MAE	۰/۰۶۲	MAE	۰/۰۲۷
RMSE	۰/۰۷۴	RMSE	۰/۰۳۴
NRMSE	۰/۰۳۴	NRMSE	۰/۰۰۶
RSS	۰/۲۸۷	RSS	۰/۰۰۱
RAE	۰/۰۲۹	RAE	۰/۰۰۵
$R^2$	۰/۹۱۷	$R^2$	۰/۹۹



شکل ۲۵- مقایسه نتایج ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسباتی در گرداب‌شکن هرمی مثلثی بخش کنترل تاج

4. Normal Root Mean Square Error  
5. Residual Sum of Squares  
6. Relative Absolute Error

1. R-Squared  
2. Mean absolute Error  
3. Root Mean Square Error

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با ساخت مدل فیزیکی سرریز نیلوفری، تأثیر گرداب‌شکن‌های هرمی با قاعده مثلثی در ابعاد و آرایش‌های مختلف بر ضریب دبی سرریز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی به ابعاد  $b/D=0.167$  و  $h/D=0.136$  در آرایش شش‌تایی باعث افزایش میانگین درصد عملکرد ضریب دبی برابر  $11/80\%$  در بخش کنترل روزنه و  $50/97\%$  در بخش کنترل تاج می‌شوند. از طرفی در شرایط استغراق، افزایش ابعاد گرداب‌شکن هرمی تا محدوده‌ای تأثیر بسزایی در افزایش ضریب دبی دارد. این تأثیر در ابعاد بزرگ‌تر گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی کمتر می‌شود، طوری که گرداب-شکن هرمی مثلثی به ابعاد  $b/D=0.208$  و  $h/D=0.170$  سبب افزایش میانگین درصد عملکرد ضریب دبی  $4/6\%$  الی  $5/8\%$  در شرایط استغراق می‌شود و افزایش ابعاد گرداب‌شکن هرمی مثلثی در مقایسه با تعداد آن مانع از تأثیر آن بر افزایش ضریب دبی خواهد شد. در نهایت روابط تجربی برای تعیین ضریب دبی سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن‌های هرمی مثلثی پیشنهاد شد. با مقایسه آماری نتایج روابط تجربی به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی، ضریب تعیین برای گرداب‌شکن هرمی مثلثی در بخش کنترل تاج و روزنه به ترتیب برابر  $0.99$  و  $0.917$  حاصل شد. به منظور بررسی تأثیر هر یک از عوامل تأثیرگذار بر ضریب دبی جریان سرریز نیلوفری با گرداب‌شکن هرمی، آنالیز حساسیت نیز انجام گرفت. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که بیش‌ترین میزان حساسیت روابط تجربی ضریب دبی نسبت به عمق استغراق در کنترل روزنه و نسبت به تعداد گرداب‌شکن در کنترل تاج می‌باشد.

## ۵- مراجع

جمالی امام‌قیس ر، نوحانی ا، "تأثیر طول تیغه‌های ضد گرداب بر تشکیل جریان‌های گردابی در سرریزهای نیلوفری"، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران، تهران، ۱۳۹۳، ۸-۱.

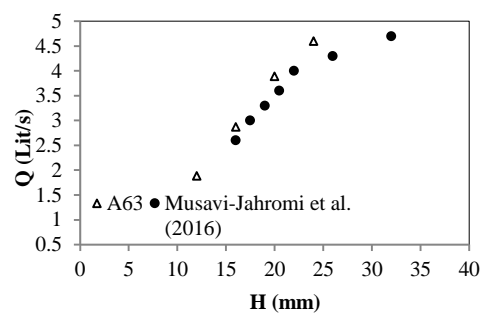
نوحانی ا، موسوی چه‌رمی س ح، "تأثیر تعداد و ضخامت تیغه‌های گرداب‌شکن بر روی ضریب تخلیه سرریز نیلوفری"، مجموعه مقالات همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ۱۱ تا ۱۲ اسفند، ۱۳۸۸، ۷-۱.

نوحانی ا، جمالی امام‌قیس ر، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل تیغه‌های ضد گرداب بر راندمان تخلیه سرریزهای نیلوفری"، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۹۴، ۹ (۵)، ۷۴۹-۷۴۱.

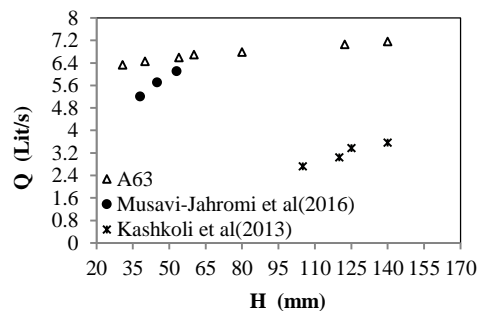
Anwar H, "Formation of a weak vortex", Journal of Hydraulic Research, 1966, 4 (1), 1-16.

Anwar HO, Waller JA, Amphlet MB, "Similarity of free-vortex at horizontal intake", Journal of Hydraulic Research, 1978, 16 (2), 95-105.

مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات قبلی در جدول (۷)، شکل (۲۷) و (۲۸) ارائه شد. مقایسه منحنی دبی-اشل تحقیق حاضر با پژوهش‌های Christodoulou و همکاران (۲۰۱۰)، Kashkoli و همکاران (۲۰۱۳) و Musavi-Jahromi و همکاران (۲۰۱۶) در بخش کنترل تاج و روزنه با آرایش شش‌تایی، نشان می‌دهد که گرداب‌شکن‌های هرمی در افزایش دبی عبوری مؤثرتر از گرداب‌شکن‌های پایه‌ای، تیغه‌ای و زاویه‌دار می‌باشد. همچنین مطابق جدول (۶) از مقایسه محدوده ضریب می‌توان به وسیع‌تر بودن محدوده عمق استغراق و ضریب دبی پژوهش حاضر اشاره نمود که دلیل آن نقش بیشتر گرداب‌شکن هرمی مثلثی در اصلاح مسیر جریان گردابی و افزایش ضریب دبی می‌باشد.



شکل ۲۷- مقایسه دبی-اشل تحقیق حاضر در کنترل تاج



شکل ۲۸- مقایسه دبی-اشل تحقیق حاضر در کنترل روزنه

جدول ۷- مقایسه محدوده ضریب دبی تحقیق حاضر

Cd	کنترل	گرداب-شکن	محققین
$0.125 \leq H/D \leq 0.2$ $0.27 \leq C_d \leq 0.35$	روزنه	پایه‌ای	Christodoulou و همکاران (۲۰۱۰)
$0.3 \leq H/D \leq 0.4$ $0.03 \leq C_d \leq 0.31$	روزنه	تیغه‌ای	Kashkoli و همکاران (۲۰۱۳)
$0.046 \leq H/D \leq 0.091$ $0.861 C_d \leq 1.388$	تاج	زاویه‌دار	Musavi-Jahromi و همکاران (۲۰۱۶)
$0.109 \leq H/D \leq 0.151$ $0.511 \leq C_d \leq 0.622$	روزنه		تحقیق حاضر
$0.05 \leq H/D \leq 0.1$ $2.354 \leq C_d \leq 2.729$	تاج		
$0.128 \leq H/D \leq 0.583$ $0.579 \leq C_d \leq 0.664$	روزنه	A63	

- USBR, "Design of small dams", United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Third Edition, Washington D.C, 1987, 860 p.
- Wang Y, Jiang C, Liang D, "Comparison between empirical formulae of intake vortices", Journal of Hydraulic Research, 2011, 49 (1), 113-116.
- Yang J, Liu T, Bottacin-Busolin A, Lin C, "Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices", Journal of Hydraulic Research, 2014, 52 (4), 523-531.
- Yildirim N, Kocabaş F, "Prediction of critical submergence for an intake pipe", Journal of Hydraulic Research, 2002, 40 (4), 507-518.
- Zielinski PB, "Effect of viscosity on vortex orifice flow", Journal of Hydraulic Division (ASCE), 1968, 94 (3), 745-752.
- Christodoulou A, Mavrommatis A, Papathanassiadis T, "Experimental study on the effect of piers and boundary proximity on the discharge capacity of a morning glory spillway", International 1st IAHR European Congress, Scotland, Edinburgh, 2010, 1-6.
- Daggett LL, Keulegan GH, "Similitude in free-surface vortex formation", Journal of Hydraulics Division (ASCE), 1974, 100 (11), 1565-1581.
- Fattor CA, Bacchiega JD, "Analysis of instabilities in the change of regime in morning glory spillways", The 29<sup>th</sup> International Association of Hydraulic Engineering and Research, Hydraulics of rivers water works and machinery Congress, Theme D, 2001, 1 (1), 656-662.
- Jain AK, Ranga Raju KG, Garde RJ, "Vortex formation at vertical pipe intake", Journal of Hydraulics Division (ASCE), 1978, 104 (10), 1429-1445.
- Kabiri-Samani AR, Borghei S, "Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex", Scientia Iranica A, 2013, 20 (2), 251-258.
- Kashkoli HA, Mousavi-Jahromi SH, Sedghi H, Aghamajidi R, "Simultaneous Study Effect of Guide Pier and Stepped Chamber on Hydraulic Behavior of Morning Glory Spillway", World Applied Sciences Journal, 2013, 21 (4), 548-557.
- Mousavi SR, Kamanbedast AA, Fathian H, "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 (TJEAS), 2013, 3 (24), 3534-3540.
- Musavi-Jahromi SH, Hajipour G, Eghdam M, "Discharge coefficient in the morning glory spillways due to longitudinal angles of vortex breakers", Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences (BEPLS), 2016, 5 (5), 34-41.
- Nohani E, "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, 2014, 4(5), 546-549.
- Odgaard AJ, "Free-surface air core vortex", Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 1986, 112 (7), 610-620.
- Shemshi R, Kabiri-Samani AB, "Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets", Journal of Hydraulic Research, 2017, 55 (2), 248-258.
- Suerich-Gulick F, Gaskin SJ, Villeneuve M, Parkinson É, "Free surface intake vortices: Theoretical model and measurements", Journal of Hydraulic Research, 2014, 52 (4), 502-512.
- Sun H, Liu Y, "Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes", Journal of Hydraulic Research, 2015, 53 (6), 787-796.
- Tavana MH, Moosavi-Jahromi SH, Shafai-Bajestan M, Masjedi AR, Sedghi H, "Optimization of number and direction of vortex breakers in the morning glory spillway using physical mode", Ecology, Environment and Conservation Journal (Eco. Env. & Cons.), 2011, 17 (2), 435-440.

## EXTENDED ABSTRACT

# Empirical Coefficient of Discharge Predictor for Morning Glory Spillway with Pyramidal Vortex Breakers Using Physical Model

Farzaneh Sayadzadeh <sup>a</sup>, Seyed Habib Musavi-Jahromi <sup>b,\*</sup>, Hosein Sedghi <sup>a</sup>, Amir Khosrojerdi <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Agricultural Systems Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Water Resources Engineering and Management, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 09 November 2018; Accepted: 14 July 2019

### Keywords:

Morning glory spillway, vortex, discharge coefficient, pyramidal, vortex breaker.

## 1. Introduction

Morning glory spillway is one of the spillways that convey flood from the dam reservoir to downstream. Vortices and spiral flows affect streamlines not to be formed toward the spillway shaft. As a result, its efficiency is reduced and the spillway discharge coefficient will be decreased. The morning glory spillway is including a crest, a conical transition, a vertical shaft, a bend and an outlet tunnel. Vortex breakers are installed on the morning glory spillways crest and inlet of the vertical intakes as normal attachment to decrease vortex forces and as a result increase the discharge coefficient of the spillway. So far, experimental studies have been carried out to investigate the formation of swirling flows, vortex power and submergence threshold in vertical intakes by various researchers such as Zielinski (1968), Daggett and Keulegan (1974), Jain et al. (1978), Yildirim and Kocabaş (2002) and Wang et al. (2011). Set of researchers including Christodoulou et al. (2010), Tavana et al. (2011), Kashkoli et al. (2013), Kabiri-Samani and Borghai (2013), Musavi-Jahromi et al. (2016) and Shemshi and Kabiri-Samani (2017) were used different vortex breakers to investigate their influences on discharge coefficient of the morning glory spillway. In the present article, a physical study of morning glory spillway was undertaken using pyramidal vortex breakers with triangular base in group of three, four and six pyramids to investigate their influences on discharge coefficient of the morning glory spillway. Studies conducted by hydraulic structure scholars in the field have not yet probed the effect of pyramidal vortex breakers on weakening vortices in the morning glory spillways.

## 2. Methodology

### 2.1. Dimensional Analysis

In the present article, Buckingham Method was used for dimensional analysis and the final equation of dimensional analysis is concluded to be as follows:

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

Where  $C_d$  is the discharge coefficient of morning glory spillway,  $F_r$  is the Froude number,  $H$  is the water level over the crest of spillway,  $D$  is the diameter of the crest,  $h$  is the height of vortex breakers,  $t$  is the thickness of vortex breakers,  $b$  is the width of vortex breakers,  $n$  is the number of vortex breakers. Since the bases of the pyramids in the present study were considered equilateral triangle, the width and thickness become equal at the base.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: sayadzadeh\_f@iau-maragheh.ac.ir (Farzaneh Sayadzadeh), h-mousavi@srbiau.ac.ir (Seyed Habib Musavi-Jahromi), hsedghi@yahoo.com (Hosein Sedghi), khosrojerdi@srbiau.ac.ir (Amir Khosrojerdi).

## 2.2. Experimental study

In the present article, a physical model of morning glory spillway as Fig. 1-a. was stabilized in SRBIAU Hydraulic Laboratory to investigate the effect of characteristics and number of pyramidal vortex breakers with triangular base in group of three, four and six pyramids on discharge coefficient of the spillway. 165 experiments have been conducted in the hydraulic laboratory. However, the flow discharge ranges 1.7 Lit/s up to 7.5 Lit/s. A physical setup including a 3 cubic meter polyethylene tank, a Plexiglas first flume with 60<sup>cm</sup> height× 120<sup>cm</sup> width× 120<sup>cm</sup> length was employed as well. In addition, another Plexiglas flume with height of 60<sup>cm</sup>, width of 50<sup>cm</sup> and a 180<sup>cm</sup> length also was applied in the physical setup. A 440-liters Plexiglas volumetric tank, a morning glory spillway, a triangular weir, pumps, water transfer equipment, bypass, gauging equipment and vortex breakers also were included in the physical setup. Water circulation of the laboratory setup was undertaken using two pumps. The discharge of both pumps was ranged 250 Lit/min up to 1100 Lit/min. Flow discharge was measured frequently and as a result, the triangular weir through volumetric discharge tank was calibrated. However, at the same time, the discharge from model of morning glory spillway was measured by triangular weir at the second flume. Dimensions of vortex breakers are represented in Table 1 and Fig. 2-a. Moreover, details of morning glory spillway physical model demonstrate in Fig. 3-a. As shown, crest diameter 24<sup>cm</sup>, crest length 75.4<sup>cm</sup>, conical transition diameter 8.5<sup>cm</sup> in 12.9<sup>cm</sup> distance from the spillway crest and final part of the model is the outlet tunnel which its diameter is as same as transition diameter.

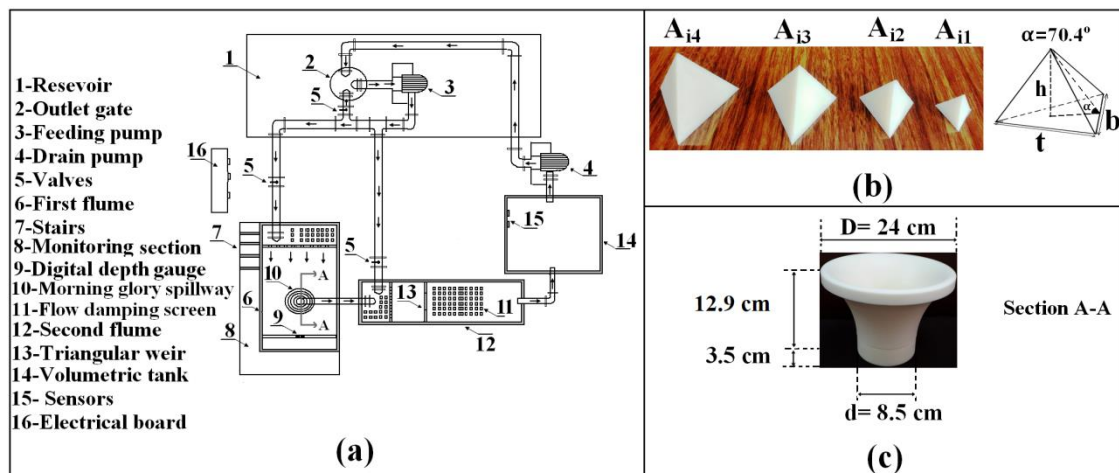


Fig. 1. Plan and overall view of the physical model in laboratory

Table 1. Dimensions of vortex breaker

$b/D$	$h/D$	$t=b$ (mm)	$H$ (mm)	Test
0.083	0.068	20	16.3	$A_{11}$
0.125	0.102	30	24.5	$A_{12}$
0.167	0.136	40	32.7	$A_{13}$
0.208	0.170	50	40.8	$A_{14}$

## 3. Results and discussion

### 3.1. Extraction of Optimal Relationship for Discharge Coefficient of the Morning Glory Spillway with Pyramidal Vortex Breaker

In this research, Applying nonlinear regression analyses using SPSS statistical software, empirical equations were obtained for estimating the discharge coefficient of morning glory spillway with triangular pyramidal vortex breakers. Accordingly, the relations are associated with the triangular pyramid in crest control (Eq. 2) and orifice control (Eq. 3) respectively:

$$C_d = 16.854(\exp(\frac{H}{D}))^{-0.195} + 138.077 \frac{b}{D} - 166.572 \frac{h}{D} + 0.004(n)^{2.48} - 0.223(F_r)^{3.516} - 14.806 \quad (2)$$

$$C_d = 0.721(\exp(\frac{H}{D}))^{-2.646} + 45.82 \frac{b}{D} - 56.064 \frac{h}{D} + 0.013(n)^{0.54} + 1.304(F_r)^{-1.138} - 0.27 \quad (3)$$

Subject to the present test limitations of  $0.083 \leq b/D \leq 0.208$ ,  $0.068 \leq h/D \leq 0.17$  and  $0.05 \leq H/D \leq 0.1$  for Eq. 2 in crest control and limitations of  $0.083 \leq b/D \leq 0.208$ ,  $0.068 \leq h/D \leq 0.17$  and  $0.115 \leq H/D \leq 0.621$  for Eq. 3 in orifice control. Through comparison of results of these new predictors and observed data, the determination coefficients of training and testing data were calculated as 0.917 and 0.99 in the crest and orifice control, respectively.

### 3.2. Sensitivity analysis of discharge coefficient with triangular pyramidal vortex breaker

The sensitivity analysis was also performed to investigate the effect of factors affecting the proposed predictors of the morning glory spillway discharge coefficient. Therefore, by removing each dimensionless parameter from Eqs (2) and (3), sensitivity analysis was performed using SPSS mathematical software. Sensitivity analysis of Eq. (2) showed that it is sensitive to  $n$ ,  $b/D$ ,  $h/D$ ,  $H/D$  and  $F_r$ , respectively. Besides, Eq. (3) is sensitive to  $H/D$ ,  $b/D$ ,  $h/D$ ,  $n$  and  $F_r$ , respectively.

## 4. Conclusions

Findings show that pyramidal vortex breakers in group of six pyramids cause the discharge coefficient to be increased significantly. It is showed that the discharge coefficient due to triangular pyramidal vortex breakers existence on the spillway's crest is increased 50.97% in crest control and 11.80% in orifice control more than the non-vortex breakers in the morning glory spillway. According to the results of this research, the triangular pyramidal vortex breaker with dimension of  $b/D=0.167$  and  $h/D=0.136$  at the crest and orifice control in groups of six pyramids are recommended.

## 5. References

- Christodoulou A, Mavrommatis A, Papathanassiadis T, "Experimental study on the effect of piers and boundary proximity on the discharge capacity of a morning glory spillway", International 1st IAHR European Congress, Scotland, Edinburgh, 2010.
- Daggett LL, Keulegan GH, "Similitude in free-surface vortex formation", Journal of Hydraulics Division (ASCE), 1974, 100 (11), 1565-1581.
- Jain AK, Ranga Raju KG, Garde RJ, "Vortex formation at vertical pipe intake", Journal of Hydraulics Division (ASCE), 1978, 104 (10), 1429-1445.
- Kabiri-Samani AR, Borghei S, "Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex", Scientia Iranica A, 2013, 20 (2), 251-258.
- Kashkoli HA, Mousavi-Jahromi SH, Sedghi H, Aghamajidi R, "Simultaneous Study Effect of Guide Pier and Stepped Chamber on Hydraulic Behavior of Morning Glory Spillway", World Applied Sciences Journal, 2013, 21 (4), 548-557.
- Musavi-Jahromi SH, Hajipour G, Eghdam M, "Discharge coefficient in the morning glory spillways due to longitudinal angles of vortex breakers", Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences (BEPLS), 2016, 5 (5), 34-41.
- Shemshi R, Kabiri-Samani AB, "Swirling flow at vertical shaft spillways with circular piano-key inlets", Journal of Hydraulic Research, 2017, 55 (2), 248-258.
- Tavana MH, Moosavi-Jahromi SH, Shafai-Bajestan M, Masjedi AR, Sedghi H, "Optimization of number and direction of vortex breakers in the morning glory spillway using physical mode", Ecology, Environment and Conservation Journal (Eco. Env. & Cons.), 2011, 17 (2), 435-440.
- Wang Y, Jiang C, Liang D, "Comparison between empirical formulae of intake vortices", Journal of Hydraulic Research, 2011, 49 (1), 113-116.
- Yildirim N, Kocabaş F, "Prediction of critical submergence for an intake pipe", Journal of Hydraulic Research, 2002, 40 (4), 507-518.
- Zielinski PB, "Effect of viscosity on vortex orifice flow", Journal of Hydraulic Division (ASCE), 1968, 94 (3), 745-752.