DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109728

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 9, Issue 2, 2017, Pages 229-238

نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۹، شماره ۲، ۱۳۹۶، صفحات ۲۲۹-۲۳۸

گزارش فنی

بررسی اثر نسبت طول به عرض روزنه‌های مستطیلی بر ضریب دبی

پوریا آسیابان [۱]، منوچهر فتحی‌مقدم*[۲]، سجاد کیانی[۳] و سید احمد حسینی[۴]

[۱ و ۳] دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، [۲] استاد، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز و [۴] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۳۰

چکیده

روزنه‌های مستطیلی از جمله ابزاری هستند که در هیدرولیک به‌عنوان یک وسیله اندازه‌گیری دبی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر نسبت طول به عرض روزنه‌های راست‌گوشه با مساحت یکسان بر ضریب دبی می‌باشد، به‌طوری که یکی از روزنه‌ها با نسبت طول به عرض برابر ۱/۶۱۸ (نسبت طلایی) که در نظام طبیعت به فراوانی مشاهده می‌شود، ساخته شده تا ویژگی آن در تخلیه دبی تحت بار آبی مختلف بررسی شود. بنابراین، آزمایش‌ها بر روی پنج روزنه راست‌گوشه که نسبت طول به عرض آن‌ها بین یک تا ۱۶ متغیر بوده انجام شد. همچنین، مقایسه‌ای بین روزنه‌های مستطیلی با روزنه دایره‌ای شکلِ هم مساحت با روزنه‌های راست‌گوشه انجام پذیرد. در نتیجه، تعداد ۹۴ آزمایش در محدوده دبی ۰/۱۳۶ الی ۰/۶۳۷ لیتر بر ثانیه بر روی روزنه‌ها انجام گرفت. در این پژوهش، رابطه‌ای با عنوان ضریب تصحیح توزیع فشار برای روزنه‌ها ارائه شده است تا تأثیر توزیع غیرهیدرواستاتیک فشار بر ضریب دبی در بارهای آبی کم دیده شود. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت طول به عرض، ضریب دبی روزنه راست‌گوشه به‌طور عمومی افزایش می‌یابد به‌طوری که با تغییر نسبت طول به عرض در بازه مذکور، ضریب دبی روزنه‌ها به مقدار ۱۱/۷ درصد تغییر می‌کند. همچنین، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مستطیل طلایی ویژگی خاصی از نظر تخلیه دبی نداشته و ضریب دبی روزنه دایره‌ای شکل در محدوده انجام آزمایشات تحقیق حاضر برابر با کمترین ضریب دبی در روزنه‌های راست‌گوشه است.

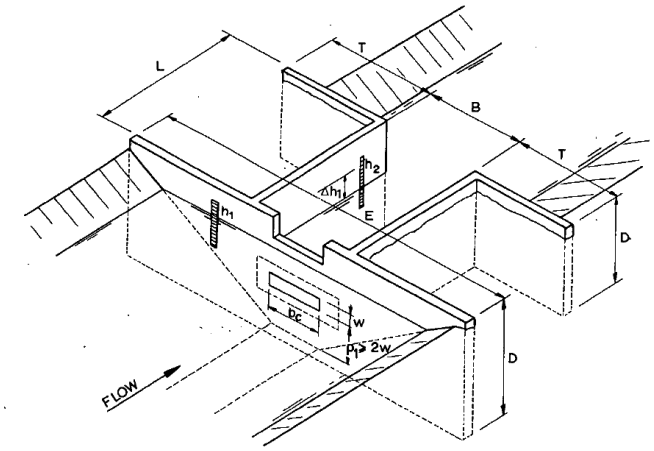
واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری دبی، روزنه دایره‌ای، ضریب تصحیح فشار، نسبت طلایی، هیدرولیک

مقدمه

روزنه از جمله وسایلی است که برای اندازه‌گیری جریان در لوله‌ها و کانال‌های آبیاری و زهکشی از آن استفاده می‌شود و می‌تواند دارای اشکال مختلف دایره‌ای، راست‌گوشه و غیره باشد. زمانی به جریان عبوری از یک سازه، جریان در روزنه گفته می‌شود که بازشدگی مذکور به‌طور کامل مستغرق شود و ارتفاع آب روی لبه بالایی روزنه به حدی باشد که از ورود هوا به‌وسیله گرداب‌ها به روزنه جلوگیری شود (Bos، ۱۹۸۹). روزنه‌ها دامنه کاربرد بسیار گسترده‌ای دارند و تحت شرایط بسیار متنوعی قرار می‌گیرند. در هیدرولیک، از روزنه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان (شکل ۱)، تحویل آب (با کمینه افت انرژی) و

* مسئول مکاتبات: fathi49@gmail.com

استهلاک انرژی (برای مثال در مجاری سیلاب بر (Bahora، ۲۰۰۴) استفاده می‌شود.



شکل ۱- سازه جعبه روزنه برای اندازه‌گیری دبی جریان (Bos، ۱۹۸۹)

برای تعیین دبی جریان روزنه با خروجی آزاد، از قانون بقا انرژی استفاده می‌شود. فرض می‌شود، انرژی بالادست روزنه در قالب ارتفاع آب و در خروجی به‌صورت هد سرعت نمایان می‌شود که در این صورت با دانستن سطح مقطع روزنه، دبی جریان عبوری از روزنه قابل محاسبه می‌باشد. اما فرضیات ذکر شده به‌طور کامل محقق نمی‌شود، به‌طوری که منجر به ظهور ضرایب اصلاحی در معادله نهایی به فرم زیر می‌شود.

$$Q = C_p C_s C_v C_c \sqrt{2gh} \qquad (۱)$$

که در آن، g شتاب گرانش، h ارتفاع آب از مرکز سطح روزنه تا سطح آب است. Cp ضریب تصحیح توزیع فشار می‌باشد. توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک در لحظه تغییر رژیم جریان از حالت سرریز به روزنه رخ می‌دهد و با افزایش بار آبی بالادست روزنه، تأثیر آن کاهش می‌یابد. Cs ضریب تصحیح لزجت است که در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۱۶ به یک میل می‌کند و اثر خود را در اعداد رینولدز بالا از دست می‌دهد (Grose، ۱۹۸۳). Cv، ضریب اصلاحی سرعت بوده که به‌دلیل صرفه نظر کردن از اتلاف انرژی در معادله (۱) نمایان می‌شود. مقدار این ضریب تحت ارتفاع آب بین ۰ تا ۳۰ متر از ۰/۹۵۱ تا ۰/۹۹۳ تغییر می‌کند (Smith و Walker، ۱۹۲۳). ضریب Cc یا ضریب انقباض، به‌دلیل فشردگی جت خروجی از روزنه در معادله (۱) نمایان می‌شود و باعث می‌شود که مساحت واقعی جت از مساحت روزنه کمتر باشد. کمینه مساحت جت در فاصله نصف قطر روزنه در پایین‌دست روزنه به وقوع می‌پیوندد به‌طوری که این پدیده را Vena می‌نامند (Brater و همکاران، ۱۹۹۶). حاصل‌ضرب ضریب سرعت و ضریب انقباض را ضریب دبی نامیده و آن را با Cd نشان می‌دهند.

Johansen (۱۹۳۰) با انجام آزمایش روی روزنه‌های لبه تیز در محدوده رینولدز بین یک تا ۲۵۰۰۰ نتیجه گرفت که از عدد رینولدز یک تا ۱۰ ضریب دبی روزنه افزایش پیدا کرده تا به بیشینه خود می‌رسد، سپس روندی کاهشی طی نموده به‌طوری که در عدد رینولدز ۲۰۰۰ به مقدار ثابتی می‌رسد. Jonse و Bajura (۱۹۹۱) مدل ریاضی برای تعیین ضریب دبی روزنه در جریان‌های پالسی (غیر ماندگار) گسترش دادند و چنین نتیجه گرفتند که در فرکانس‌های کم، ضریب دبی جریان پالسی حول ضریب دبی جریان ماندگار نوسان می‌کند، اما با افزایش فرکانس میانگین زمانی، ضریب دبی کاهش می‌یابد. Prohaska (۲۰۰۸) چنین بیان کرد که نقش تأثیرگذار در ضریب دبی را ضریب انقباض بازی می‌کند و با انحنادار ساختن ورودی روزنه می‌توان انقباض را به حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. Mincks (۲۰۰۲) ضریب دبی روزنه‌های لبه تیز را تابعی از هندسه روزنه و عدد رینولدز دانست. Spencer (۲۰۱۳) شرط عدم تأثیرگذاری دیواره‌های اطراف

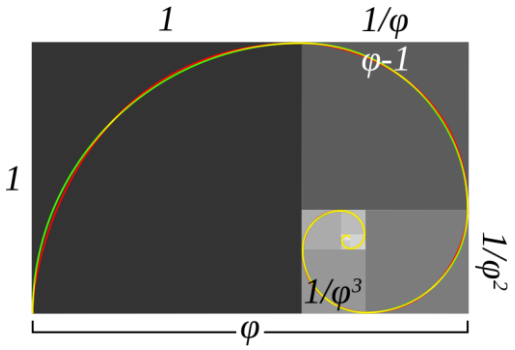
روزنه بر ضریب دبی را وجود کمینه فاصله‌ای بین دیوار و لبه روزنه معادل شعاع روزنه دانست.

نسبت طلایی: اگر پاره‌خطی به دو قسمت کوچک و بزرگ طوری تقسیم شود که نسبت قسمت بزرگ‌تر (a) به قسمت کوچک‌تر (b) برابر با نسبت کل طول پاره‌خط ($a+b$) به طول قسمت بزرگ‌تر باشد، آن را نسبت طلایی گویند. این نسبت اولین‌بار به‌وسیله اقلیدس معرفی شد و به‌طور معمول آن را با φ نشان می‌دهند (Markowsky، ۱۹۹۲). بیان ریاضی توصیف فوق به‌صورت معادله (۲) می‌باشد (Livio، ۲۰۰۲).

$$\varphi = \frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = 1.618 \qquad (۲)$$

که در آن، a طول قسمت بزرگ‌تر پاره‌خط و b طول قسمت کوچک‌تر است. این باور وجود دارد که اشکالی که دارای چنین نسبتی هستند از نظر زیبایی‌شناسی بسیار خوشایند و هارمونیک هستند، لذا، این نسبت در طراحی صنعتی و معماری بسیار پرکاربرد است (Van و Audrey، ۱۹۹۸). فراتر از زیبایی‌شناسی این نسبت در طبیعت مکرراً به چشم می‌خورد. برای مثال این نسبت در الگوی رویدن شاخه‌های گیاه روی ساقه و توسعه رگبرگ‌ها، اسکلت حیوانات و بدن انسان، توسعه رگ‌های خونی و اعصاب در بدن، ساختار ژن‌های انسان و هندسه ترکیبات شیمیایی و کریستال‌ها وجود دارد (Padovan، ۲۰۰۲؛ Perez، ۱۹۹۱). مستطیلی که نسبت طول به عرض آن نسبت طلایی باشد را مستطیل طلایی گویند. این مستطیل خاصیت خودبازسازی[1] دارد یعنی اگر به اندازه عرض از طول مستطیل طلایی جدا شود، یک مربع به وجود می‌آید و مستطیل کوچک‌تر به وجود آمده نیز یک مستطیل طلایی است (شکل ۲). اگر بر مستطیل‌های طلایی تودرتو ایجاد شده با روش ذکر شده یک مارپیچ محاط شود، مارپیچ حاصل شده را مارپیچ طلایی گویند که در طبیعت به فراوان دیده می‌شود (شکل ۳).

وجود نسبت طلایی در علوم گوناگون و طبیعت یکی از انگیزه‌های انجام پژوهش حاضر است به‌نحوی که تأثیر نسبت طول به عرض روزنه‌های مستطیلی مخصوصاً نسبت طلایی را بر ضریب دبی آن‌ها سنجیده شود.



شکل ۲- مستطیل طلایی با خاصیت خودبازسازی

الف- ساختار هندسی برخی گیاهان

ب- بازوهای مارپیچی کهکشانی

ج- غلاف برخی سخت‌پوستان

شکل ۳- مثال‌هایی از مارپیچ طلایی در طبیعت

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ضریب دبی روزنه‌ها انجام شده که تعدادی از آن‌ها در متن حاضر مرور شد، ولی در این میان بررسی اثر نسبت طول به عرض بر ضریب دبی در روزنه‌های مستطیلی به چشم نمی‌خورد. در این پژوهش اثر استفاده از یکی از اصول

[1] Self-Reproducing

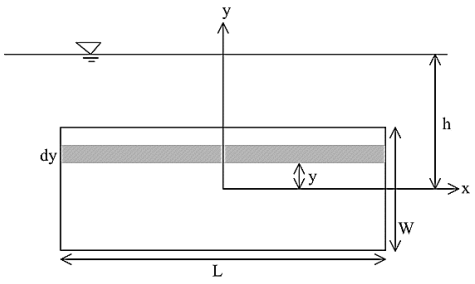
زیبایی‌شناختی و معماری که به‌وسیله طبیعت معرفی شده، یعنی نسبت طلایی، بر عملکرد هیدرولیکی روزنه مستطیلی که یک سازه آبی پرکاربرد است مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

تئوری تحقیق: برای محاسبه دبی روزنه‌ها به‌طور معمول از رابطه شناخته شده زیر استفاده می‌شود (Smith و Walker، ۱۹۲۳).

$$Q = C_d A\sqrt{2gh} \qquad (۳)$$

رابطه بالا بر این فرض استوار است که توزیع فشار بالادست روزنه به‌صورت هیدرو استاتیک باشد. در شرایطی که ارتفاع آب روی روزنه خیلی کم باشد فرض بالا صحیح نبوده و باعث ایجاد خطا در محاسبه می‌شود. در این صورت یک ضریب اصلاحی C_p ظاهر می‌شود که اثر توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک را نشان می‌دهد. با مشخص بودن مقدار این ضریب، مقدار ضریب دبی جریان را می‌توان در بارهای آبی کم در بالادست روزنه با دقت بیشتری برآورد کرد. در مطالعه حاضر، رابطه‌ای برای برآورد این ضریب در روزنه‌های مستطیلی ارائه می‌شود. شکل ۴، یک المان نواری و پارامترهای هندسی روی یک روزنه مستطیلی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- المان نواری و پارامترهای هندسی یک روزنه مستطیلی

دبی عبوری از المان نشان داده شده در شکل فوق را از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$dQ = C_d\sqrt{2g(h-y)}Ldy \qquad (۴)$$

برای محاسبه دبی عبوری از کل روزنه، از معادله فوق انتگرال‌گیری شده به‌طوری که معادله حاصل به‌صورت معادله (۵) به‌دست می‌آید.

$$Q = C_d L\int\sqrt{2gh-2gy}\,dy \qquad (۵)$$

با مقداری عملیات جبری و تعیین حدود انتگرال معادله (۵) را به صورت معادله (۶) بازنویسی می‌شود

$$Q = C_d L\sqrt{2gh}\int_{-W/2}^{W/2}\sqrt{1-\frac{y}{h}}dy \qquad (۶)$$

با اعمال تغییر متغیری $\frac{y}{W}=z$،

$$Q = C_d L\sqrt{2gh}\int_{-1/2}^{1/2}\sqrt{1-\frac{zW}{h}}Wdz \qquad (۷)$$

با ساده‌سازی معادله (۷)، خواهیم داشت.

$$Q = C_d A\sqrt{2gh}\int_{-1/2}^{1/2}\sqrt{1-\frac{zW}{h}}dz \qquad (۸)$$

عبارت قرارگرفته در پشت انتگرال بیانگر رابطه دبی عبوری از روزنه (معادله ۳) می‌باشد، لذا، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تصحیح توزیع فشار برای روزنه مستطیلی به شکل معادله (۹) می‌باشد.

$$C_p = \int_{-1/2}^{1/2}\sqrt{1-\frac{zW}{h}}dz \qquad (۹)$$

با معرفی پارامتر بدون بعد $\frac{h}{W}=\eta$ (نسبت ارتفاع سطح آب از مرکز سطح روزنه به ارتفاع روزنه)، انتگرال فوق به‌صورت معادله (۱۰) خواهد بود.

$$C_p = \int_{-1/2}^{1/2}\sqrt{1-\frac{z}{\eta}}dz \qquad (۱۰)$$

با حل تحلیلی انتگرال بالا، ضریب تصحیح توزیع فشار به‌صورت معادله (۱۱) بیان می‌شود.

$$C_p = -\frac{2}{3}\eta\left(1-\frac{z}{\eta}\right)^{\frac{3}{2}}\overset{yields}{\rightarrow}$$
$$\frac{2}{3}\eta\left[\left(1+\frac{1}{2\eta}\right)^{\frac{3}{2}}-\left(1-\frac{1}{2\eta}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \qquad (۱۱)$$

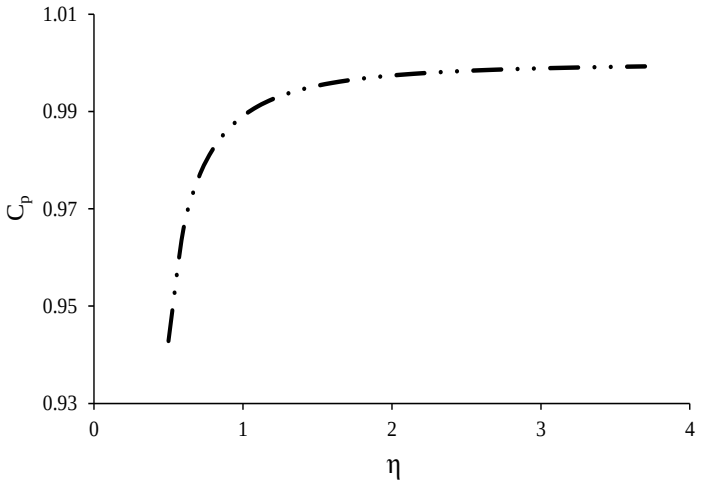
شکل (۵)، تغییرات ضریب تصحیح توزیع فشار را برای یک روزنه مستطیلی از شروع استغراق ($\eta=0.5$) تا حالتی که ارتفاع آب روی توزیع فشار بی‌تأثیر می‌شود را نشان می‌دهد.

در نتیجه، در این پژوهش برای مشخص کردن ضریب دبی از رابطه زیر استفاده شده است.

$$C_d = \frac{Q}{C_p A\sqrt{2gh}} \qquad (۱۲)$$

به‌طوری که ضریب تصحیح توزیع فشار (C_p) از معادله (۱۱) به کمک بار آبی بالادست و ارتفاع روزنه قابل محاسبه می‌باشد. همچنین، مقدار ضریب تصحیح توزیع فشار در روزنه‌های دایره‌ای شکل از معادله

ارائه‌شده به‌وسیله Vatankhah و Bijankhan (۲۰۱۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۵- تغییرات ضریب تصحیح توزیع فشار

$$C_p = 0.7137\sqrt{1+0.1435/\eta}+0.2863\sqrt{1-0.3613/\eta} \quad (۱۳)$$

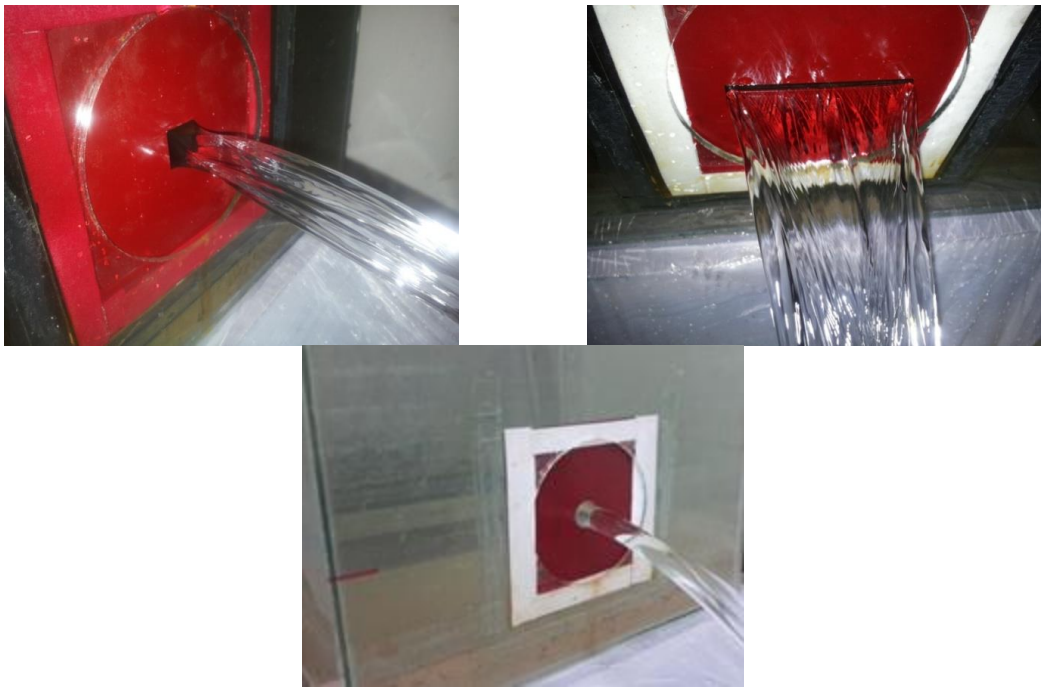
سامانه آزمایشگاهی: به‌منظور بررسی تأثیر نسبت طول به عرض روزنه‌های مستطیلی بر ضریب دبی جریان خروجی، پنج روزنه راست‌گوشه مطابق با جدول ۱، با مساحت چهار سانتی‌متر مربع ساخته شد که نسبت طول به عرض در آن‌ها متغیر می‌باشد. یکی از روزنه‌های یاد شده مربعی و مابقی مستطیلی هستند. هر کدام از روزنه‌های مستطیلی یک بار به‌صورت افقی و یکبار به‌طور عمودی نصب شد تا علاوه بر سنجش تأثیر ابعاد روزنه، اثر چرخش روزنه‌ها نیز بر ضریب دبی جریان بررسی شود. روزنه‌ها روی ورق فولادی به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر ایجاد شده‌اند تا از لبه تیز بودن روزنه اطمینان حاصل شود. برای ایجاد روزنه‌ها بر روی ورق‌های فولادی از ماشین سرو کنترل وایرکات که برش را با دقت صدم میلی‌متر انجام می‌دهد، استفاده شده و برای اطمینان از عدم تغییرات ابعادی بر اثر تغییر درجه حرارت، قبل از انجام هر آزمایش ابعاد روزنه با کولیس دیجیتال کنترل شد.

جدول ۱- مشخصات روزنه‌های راست‌گوشه به کار برده شده در آزمایش‌ها

توضیحات	شعاع هیدرولیکی	نسبت ارتفاع به طول		مساحت	عرض روزنه	طول روزنه
		نصب عمودی	نصب افقی			
مربعی	۰/۵	۱	۱	۴	۲	۲
مستطیلی	۰/۲۳۵۳	۱۶	۰/۰۶۲۵	۴	۰/۵	۸
مستطیلی	۰/۴	۴	۰/۲۵	۴	۱	۴
مستطیلی	۰/۴۸	۱/۷۷۷۳	۰/۵۶۲۶	۴	۱/۵	۲/۶۶۶
مستطیل طلایی	۰/۴۸۵۹	۱/۶۱۸۳	۰/۶۱۷۹	۴	۱/۵۷۲	۲/۵۴۴

همچنین، برای مقایسه عملکرد روزنه مستطیلی و دایره‌ای در تخلیه دبی تحت ارتفاع آب‌های مختلف، روزنه‌ای دایره‌ای با مساحتی برابر مساحت روزنه‌های مستطیلی یعنی چهار سانتی‌متر مربع (به قطر ۲/۲۵۷۳ سانتی‌متر) ایجاد شده و مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از یک مخزن شیشه‌ای به طول و عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده شد. مخزن یاد شده با دارا بودن یک قاب ریلی شکل، قابلیت نصب صفحات روزنه‌ای شکل به‌صورت کشوئی بوده به‌طوری که این قاب به‌صورتی

جانمایی شده بود که از تأثیر دیواره‌ها و کف بر شرایط جریان ورودی به روزنه جلوگیری شود. مخزن دیگری در پایین‌دست مخزن اصلی نصب شد تا جریان خروجی از روزنه را جمع‌آوری کند و به‌وسیله پمپ به مخزن بالادست بازگرداند و یک سامانه بازچرخان را ایجاد کند. جریان بازگردانده شده به مخزن اصلی به‌نحوی از طریق آرام‌کننده وارد مخزن شده که از تلاطم و مواج بودن سطح آب در مخزن جلوگیری شود. دبی ورودی به مخزن اصلی به‌وسیله شیر ورودی تغییر داده می‌شد تا بتوان ضریب دبی هر روزنه را تحت ارتفاع آب‌های مختلف اندازه‌گیری شود. آزمایش‌ها در محدوده دبی ۰/۱۳۶ الی ۰/۶۳۷ لیتر بر ثانیه انجام شد. اندازه‌گیری دبی جریان خروجی از روزنه به روش حجمی و با میانگین‌گیری از سه آزمایش متوالی انجام شد. شکل ۶ تصویری از برخی روزنه‌های به‌کار رفته برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمونه‌ای از روزنه‌های به‌کار رفته برای انجام آزمایش‌ها

نظر به کوچک بودن مقدار تغییرات ضریب دبی برای شرایط مختلف، همچنین اعتماد به مقادیر برداشت شده، فرایندی را برای کنترل صحت و دقت داده‌ها پیش‌بینی شد. Bos (۱۹۸۹)، جدولی مطابق با جدول ۲ برای تعیین ضریب دبی روزنه‌های دایره‌ای ارائه داد. به‌منظور کنترل صحت نتایج و اعتماد به سامانه و روش آزمایش در پژوهش حاضر، روزنه دایره شکلی به قطر دو سانتی‌متر ساخته شد و پیش از آزمایش‌های مربوط به روزنه‌های مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفت. با مقایسه نتیجه اندازه‌گیری شده با ضریب دبی ارائه شده در کتاب Bos می‌توان تخمینی از درجه صحت نتایج برداشت شده داشت.

نتایج و بحث

به‌منظور کنترل صحت فرایند آزمایشگاهی و داده‌های برداشت شده در ابتدا ضریب دبی روزنه دایره‌ای به قطر دو سانتی‌متر تحت هشت ارتفاع آب مختلف (η =۱/۳۵-۹/۲۵) اندازه‌گیری شد. میانگین ضریب دبی این روزنه مقدار ۰/۶۲۳ به‌دست آمد که با مقدار گزارش شده به‌وسیله Bos (۱۹۸۹) که در جدول ۲ نیز آمده است ۲/۱ درصد تفاوت دارد. لذا با توجه به مقدار ناچیز اختلاف می‌توان به صحت داده‌ها اعتماد نمود.

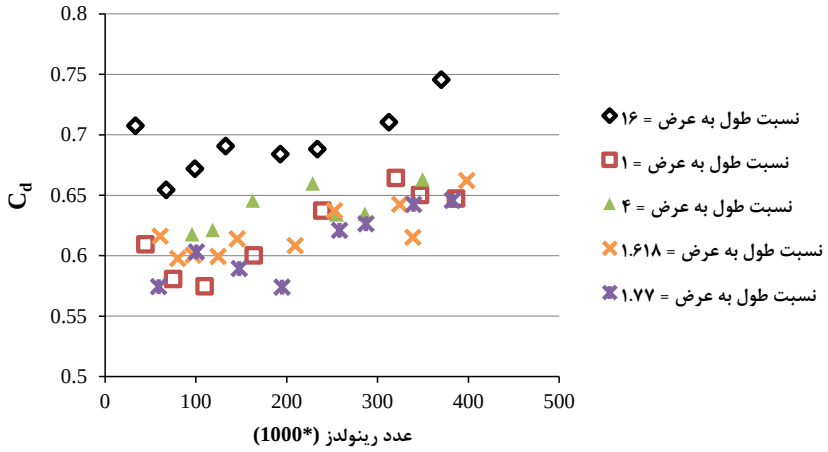
اندازه‌گیری ضریب دبی روزنه‌های راست‌گوشه در حالت‌های نصب افقی و عمودی تفاوت معنی‌داری نشان نداد. بدین صورت که برای هیچ یک از روزنه‌ها اختلاف ضریب دبی در حالت نصب افقی و عمودی

بیشتر از دو درصد نبوده و این اختلاف به‌طور بی‌نظم رخداده، یعنی برای بعضی روزنه‌ها در حالت افقی و بعضی دیگر در حالت عمودی ضریب دبی بیشتر بوده است. با توجه به ناچیز و بی‌نظم بودن اختلاف ضریب دبی در حالت نصب افقی و عمودی نتیجه گرفته می‌شود که برای نصب روزنه مستطیلی تأثیری بر ضریب دبی ندارد.

هر روزنه تحت ارتفاع آب‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت تا اثر این عامل بر ضریب دبی دیده شود. با توجه به شرایط مخزن و ابعاد و روش نصب روزنه‌ها، مقدار η (نسبت ارتفاع آب از مرکز سطح روزنه به ارتفاع روزنه) در مجموع آزمایش‌ها بین ۰/۷۵ تا ۴۶/۵ تغییر می‌کند. عدد رینولدز برای جریان خروجی از روزنه‌ها به‌صورت حاصل‌ضرب سرعت جریان خروجی در ارتفاع آب روی روزنه تقسیم بر لزجت سینماتیک تعریف می‌شود، به‌طوری که با تغییر ارتفاع آب روی روزنه عدد رینولدز جریان نیز تغییر می‌کند. متناسب با روش متداول در منابع مرور شده تغییرات ضریب دبی برای هر روزنه در مقابل تغییرات عدد رینولدز در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲- ضریب دبی روزنه‌های دایره‌ای (Bos، ۱۹۸۹)

ضریب دبی حالت غیرمستغرق	شعاع هیدرولیکی	قطر روزنه
۰/۶۱	۰/۵	۲
۰/۶۲	۰/۶۲۵	۲/۵
۰/۶۴	۰/۸۷۵	۳/۵
۰/۶۳	۱/۱۲۵	۴/۵
۰/۶۲	۱/۲۵	۵
۰/۶۱	۱/۶۲۵	۶/۵
۰/۶۰	>۱/۸۷۵	>۷/۵



شکل ۷- تغییرات ضریب دبی در مقابل عدد رینولدز

از توجه به روند عمومی در شکل بالا چنین استنباط می‌شود که با افزایش عدد رینولدز یعنی با افزایش ارتفاع آب روی روزنه، ضریب دبی به آرامی افزایش می‌یابد. با توجه به تعداد داده‌های برداشت شده برای هر روزنه و همچنین، با توجه به پراکندگی داده‌ها امکان برقراری یک رابطه تجربی بین عدد رینولدز و ضریب دبی وجود ندارد. نکته دیگری که شکل ۷ نشان می‌دهد، نوسان نسبتاً مشابه در ضریب دبی همه روزنه‌ها است. زمانی که از روزنه به‌عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان استفاده می‌شود، تمایل به آن است که با تغییر ارتفاع آب و یا تغییرات عدد رینولدز، ضریب دبی روزنه تغییر نکند تا دقت اندازه‌گیری کم

نشود. شکل ۷ نشان می‌دهد که با تغییر نسبت طول به عرض روزنه‌ها نمی‌توان به حالت بهینه‌ای رسید که در آن، ضریب دبی با تغییر ارتفاع آب ثابت بماند.

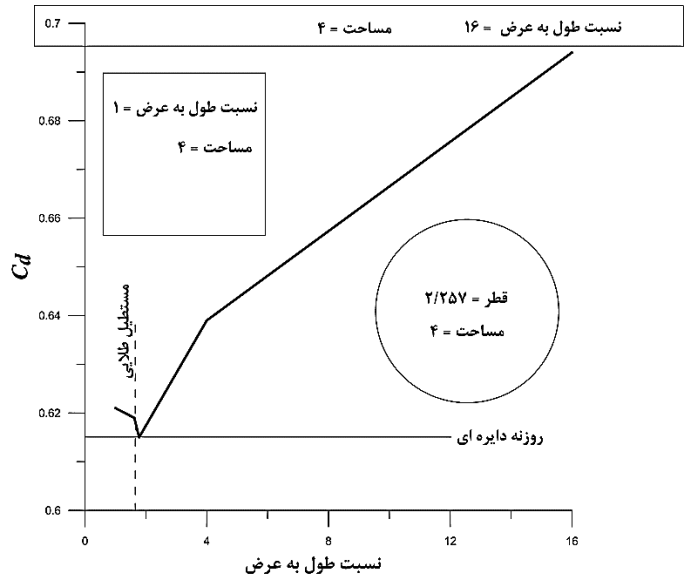
نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در روزنه‌های راست‌گوشه با مساحت ثابت، در صورت گذر از حالت مربعی به سمت کشیده شدن (افزایش نسبت طول به عرض) گام به گام روزنه، در ابتدا ضریب دبی روزنه به‌طور جزئی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. جدول ۳ ضریب دبی روزنه‌های مورد آزمایش با مساحت ثابت و نسبت طول به عرض مختلف را نشان می‌دهد. ضریب دبی ارائه شده برای هر روزنه میانگین ضریب دبی‌های برداشت شده در اعداد رینولدز مختلف برای آن روزنه است.

جدول ۳- ضریب دبی روزنه‌های راست‌گوشه با نسبت طول به عرض مختلف

ضریب دبی (میانگین‌گیری شده)	η	شعاع هیدرولیکی	نسبت طول به عرض
۰/۶۲۱	۳/۲۵-۱۳/۱۵	۰/۵	۱
۰/۶۱۹	۳/۵۴-۱۶/۸۰	۰/۴۸۵	۱/۶۱۸
۰/۶۱۵	۲/۲۰-۱۷/۴۳	۰/۴۸۰	۱/۷۷۷
۰/۶۳۹	۱/۳۷-۲۴/۲۰	۰/۴	۴
۰/۶۹۴	۰/۷۵-۴۶/۵۰	۰/۲۳۵	۱۶

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، با پذیرش مقداری تقریب به‌دلیل خطاهای ناگزیر فرایند آزمایشگاهی مستطیل طلایی با نسبت طول به عرض ۱/۶۱۸ را می‌توان نقطه کمینه شدن ضریب دبی دانست. نکته دیگری که از جدول ۳ استنباط می‌شود، عدم افزایش ضریب دبی با افزایش شعاع هیدرولیکی است. چنین نتیجه‌ای بر خلاف مفهوم بهترین مقطع هیدرولیکی در طراحی کانال‌ها است. دلیل این مساله چنین است که در طراحی بهترین مقطع هیدرولیکی کانال اصل بر کمینه کردن افت طولی است در حالی که در روزنه لبه تیز افت طولی قابل صرف نظر کردن است. از آن‌جا که قبل از انجام آزمایشات چنین نتیجه‌ای انتظار نمی‌رفت، برای اطمینان از صحت این نتیجه آزمایشات با دقت تکرار و بررسی شد. با افزایش شعاع هیدرولیکی افت انرژی ناشی از اصطکاک و آشفتگی در جریان خروجی کم شده و ضریب سرعت افزایش می‌یابد و به یک نزدیک‌تر می‌شود. عدم افزایش ضریب دبی با شعاع هیدرولیکی به این معنی است که ضریب دبی به‌طور غالب به‌وسیله ضریب انقباض کنترل می‌شود و این ضریب با افزایش شعاع هیدرولیکی زیاد نمی‌شود. برای کنترل دقت آزمایش‌ها و داده‌های برداشت شده، روزنه با نسبت طول به عرض چهار به‌طور تصادفی انتخاب شده و مجدداً تحت ارتفاع آب‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار ضریب دبی به دست آمده ۰/۶۳۵ بوده که با مقدار قبلی ۰/۶۳ درصد اختلاف دارد. اختلاف ناچیز نتیجه دو سری آزمایش نشان‌دهنده دقت مناسب داده‌ها می‌باشد.

نتایج آزمایش روی روزنه دایره‌ای با مساحت چهار سانتی‌متر (برابر با مساحت روزنه‌های مستطیلی) تحت بار آبی مختلف نشان می‌دهد که ضریب دبی این روزنه برابر ۰/۶۱۵ می‌باشد. این مقدار دقیقاً مساوی مقدار ضریب دبی روزنه راست‌گوشه با نسبت طول به عرض ۱/۷۷۷ است که کمینه ضریب دبی را در بین روزنه‌های راست‌گوشه دارد. البته نمی‌توان این نتیجه را کلی دانست و ممکن است، در مساحت‌های دیگر ضریب دبی روزنه دایره‌ای از روزنه راست‌گوشه بیشتر باشد. شکل ۸ مقایسه‌ای از وضعیت ضریب دبی روزنه دایره‌ای به مساحت چهار سانتی‌متر مربع را با روزنه‌های راست‌گوشه هم مساحت خود نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقایسه ضریب دبی روزنه دایره‌ای و راست‌گوشه

نتیجه‌گیری

روزنه‌هایی به مساحت ثابت چهار سانتی‌متر مربع به شکل راست‌گوشه با نسبت طول به عرض‌های مختلف به همراه روزنه‌هایی با مقطع دایره شکل برای تعیین ضریب دبی مورد آزمایش قرار گرفت به‌طوری که نسبت طول به عرض روزنه‌های راست‌گوشه از یک تا ۱۶ تغییر می‌یافت. یکی از روزنه‌های راست‌گوشه با نسبت طول به عرض ۱/۶۱۸ ساخته شد که در هندسه به آن نسبت طلایی اطلاق می‌شود و در طبیعت به‌طور فراوان وجود دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضریب دبی با افزایش ارتفاع آب روی روزنه به آرامی افزایش می‌یابد. با کشیده شدن راست‌گوشه از حالت مربعی به‌سمت مستطیلی، ابتدا ضریب دبی کمی کاهش یافته، سپس افزایش پیدا می‌کند، به‌نحوی که بیشترین ضریب دبی در کشیده‌ترین حالت یعنی نسبت طول به عرض ۱۶ مشاهده می‌شود. روزنه راست‌گوشه با نسبت طلایی از نظر مقاومت در مقابل تخلیه جریان بیشترین مقدار را دارد، به‌عبارت دیگر ضریب دبی در این حالت کمینه است و می‌توان از آن در شرایط مقتضی نظیر روزنه ورودی به تانک‌های گیرنده ضربه قوچ استفاده کرد نه مواردی که تخلیه بیشتر آب با انرژی کم مطلوب است. آزمایش‌ها نشان داد که نصب روزنه مستطیلی به‌صورت افقی یا عمودی تأثیری بر ضریب دبی آن نداشت. مقایسه ضریب دبی روزنه راست‌گوشه با دایره‌ای نشان داد که در محدوده انجام آزمایشات تحقیق حاضر ضریب دبی روزنه دایره‌ای معادل کمینه ضریب دبی روزنه‌های راست‌گوشه می‌باشد. اختلاف بین دو سری آزمایش مشابه ۰/۶۳ درصد و اختلاف بین داده‌های حاصل از آزمایش‌های حاضر با یک منبع معتبر ۲/۱ درصد به‌دست آمد که به‌ترتیب نشان‌دهنده دقت و صحت مناسب نتایج ارائه شده است.

منابع مورد استفاده

1. Bahora, L.K. 2004. Flow and pressure drop of highly viscous fluids in small aperture orifices. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 124 pages.
2. Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures, Wageningen, Netherlands. 3rd edition, ILRI.
3. Brater, E.F., H.W. King, J.E. Lindell and C.Y Wei. 1996. Handbook of hydraulics. McGraw-Hill, New York, 43 pages.
4. Grose, R.D. 1983. Orifice flow at low Reynolds number. Journal of Pipelines, 3(3): 207-214.
5. Johansen, F.C. 1930. Flow through pipe orifices at low Reynolds numbers. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 126(801): 231-245.
6. Jones, E.H.J. and R.A. Bajura. 1991. A Numerical analysis of pulsating laminar flow through a pipe orifice. ASME Journal of Fluids Engineering, 113(2): 199-205.

7. Livio, M. 2002. The golden ratio: The story of Phi, the world's most astonishing number. New York: Broadway Books, 230 pages.
8. Markowsky, G. 1992. Misconceptions about the golden ratio. College Mathematics Journal (Mathematical Association of America), 23(1): 2–19.
9. Mincks, L.M. 2002. Pressure drop characteristics of viscous fluid flow across orifices. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Iowa State University, 124 pages.
10. Smith, D. and W.J. Walker. 1923. Orifice flow. Institution of Mechanical Engineers Proceedings, 1: 23–36.
11. Spencer, P. 2013. Investigation of discharge behavior from a sharp-edge circular orifice in both weir and orifice flow regimes using an unsteady experimental procedure. MSc Thesis, Civil and Environmental Engineering, Western University, 123 pages.
12. Padovan, R. 2002. Proportion: science, philosophy, architecture. Nexus Network Journal, 4(1): 113–122.
13. Perez, J.C. 1991. Chaos DNA and neuro-computers: a golden link. in Speculations in Science and Technology, 14(4): 12-22.
14. Prohaska, D. 2008. Investigation of discharge coefficient for circular orifices in riser pipes. MSc Thesis, Civil Engineering, Clemson University, 124 pages.
15. Van, M. and M. Audrey. 1998. Rhetorical prototypes in architecture: measuring the acropolis with a philosophical polemic. Communication Quarterly, 46(2): 194-213.
16. Vatankhah, A.R. and M. Bijankhan. 2012. Discussion of “new method for modeling thin-walled orifice flow under partially submerged conditions” by David Brandes and William T. Barlow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 138(10): 924-928.