

بررسی نظری و آزمایشگاهی سرریز لبه تیز در انتهای لوله‌های افقی

سمیه خلیلی^۱ و علیرضا وطن‌خواه^{۲*}

چکیده

سرریز یکی از پرکاربردترین ابزارهای کنترل و اندازه‌گیری جریان در مجاری روباز است. در این پژوهش، خصوصیات جریان عبوری از سرریز در یک کانال دایره‌ای افقی، به صورت نظری و آزمایشگاهی بررسی شده است. انتخاب این سازه به دلیل عدم وجود بررسی‌های کافی در مورد معادلات هیدرولیکی حاکم بر آن در این نوع از کانال‌ها و همچنین خصوصیات کاربردی آن است. در این پژوهش معادله بده عبوری از سازه سرریز در انتهای یک کانال دایره‌ای افقی، از دیدگاه نظری توسعه، سپس واسنجی معادله نظری بده با استفاده از ضریب بده انجام شده است. تعیین مقدار ضریب بده نیاز به اندازه‌گیری بده واقعی (آزمایشگاهی یا صحرایی) دارد. برای جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، سازه سرریز در انتهای دو کانال دایره‌ای افقی با قطر اسمی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر نصب شد و اندازه‌گیری گسترده‌ای از متغیرهای مؤثر بر ضریب بده انجام شد. سیصد و پنجاه آزمایش روی سرریزهای با ارتفاع‌های متفاوت در محدوده بده ۰/۵ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه انجام شد. با استفاده از ۷۰٪ داده‌های آزمایشگاهی، معادلاتی برای ضریب بده پیشنهاد شد و با استفاده از ۳۰٪ باقی مانده داده‌ها، معادلات پیشنهادی صحت‌سنجی شد. خطای برآورد بهترین معادله پیشنهادی برای ۹۵٪ از داده‌ها، کمتر از ۵٪ است.

واژه‌های کلیدی: بده، خطا، داده‌های آزمایشگاهی، سرریز، ضریب بده، کانال دایره‌ای.

ارجاع: خلیلی س. و وطن‌خواه ع. ر. ۱۳۹۵. بررسی نظری و آزمایشگاهی سرریز لبه تیز در انتهای لوله‌های افقی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۱۹-۲۶.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادنی، دانشگاه تهران.
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادنی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: arvatan@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۹

مقدمه

از عوامل اساسی در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی اندازه‌گیری دقیق حجم آب انتقالی است. در کشور ایران به دلیل عدم توجه کافی در این امر، توزیع مناسب آب در شبکه‌ها فراهم نمی‌شود. یکی از سازه‌های هیدرولیکی ساده که به طور گسترده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی برای کنترل و اندازه‌گیری جریان و همچنین تأمین رقوم سطح آب به نسبت ثابت استفاده می‌شود، سرریز است. در رابطه با جریان از روی سرریزها با شکل‌های مختلف (مستطیلی، مثلثی، دایره‌ای، دوزنقه‌ای و...)، پژوهش‌ها و بررسی‌های زیادی انجام شده است. اما بیشتر این بررسی‌ها در کانال مستطیلی انجام شده و در مورد سرریز در کانال دایره‌ای در ظاهر پژوهش جامعی گزارش نشده است. در این پژوهش به مطالعه و بررسی نظری و آزمایشگاهی جریان عبوری از سرریز در یک کانال دایره‌ای افقی و تعیین معادله مناسب برای برآورد بده این سازه، پرداخته شده است. انتخاب سرریز و کانال دایره‌ای به دلیل عدم وجود بررسی‌های کافی در مورد هیدرولیک حاکم بر سرریز در این نوع از کانال‌ها و همچنین خصوصیات کاربردی آن‌ها است. این سازه شرایط اقتصادی و فرهنگی را به خوبی برآورده کرده و بدون نیاز به هزینه زیاد یا فناوری خاص قابل ساخت بوده و به سادگی استفاده و بهره‌برداری می‌شود.

از نظر هیدرولیکی معادلات حاکم بر بده این سازه قابل توسعه بوده که با واسنجی و تأیید آزمایشگاهی، قابل استفاده در عمل خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است کانال دایره‌ای به عنوان پرکاربردترین و در دسترس‌ترین مقطع پیش ساخته، کاربرد گسترده‌ای در کانال‌های آبرگیر، زهکش‌ها و خطوط انتقال فاضلاب دارد (حسینی، ۱۳۹۱).

بررسی‌ها و مطالعات گسترده‌ای در زمینه انواع و شکل‌های متفاوت سرریزها از جمله سرریز دایره‌ای انجام شده است و این پژوهش‌ها با توجه به نقش مهم سرریزها در اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها، همچنان ادامه دارد. از آنجایی که بجز پژوهش انجام شده توسط الحمید (۲۰۰۲)، ظاهراً در مورد سرریز در کانال دایره‌ای مطالعاتی منتشر نشده است، به بررسی مطالعات شاخص انجام شده در مورد سرریزهای دایره‌ای پرداخته می‌شود.

داج (۱۹۳۵) معادله بده نظری را برای سرریزهای دایره‌ای لبه تیز به صورت یک سری نامتناهی به دست آورد.

استونس (۱۹۵۷) شاید اولین کسی بود که معادله‌ای بین هد آب و دبی عبوری از سرریز دایره‌ای را به صورت انتگرالی به دست آورد. حل این معادله پیچیده بود و برای مقاصد کاربردی، کارایی نداشت. سامرفلد و استالیبراس (۱۹۹۶) معادله توسعه داده شده توسط استونس را برای سرریزهای دایره‌ای تعمیم دادند. اما این معادله همچنان پیچیده بود. گریو (۱۹۳۲) آزمایش‌های بسیاری در مورد عبور آب از روی سرریزهای دایره‌ای، سهموی و مثلثی انجام داد. وی برای سرریزهای دایره‌ای با قطرهای مختلف، تعداد ۱۴۸ آزمایش انجام داد. وطن‌خواه (۲۰۱۰) یک معادله ساده و دقیق برای سرریزهای دایره‌ای لبه تیز توسعه داد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادله مناسبی برای ضریب بده به دست آورد. بررسی‌های اشاره شده مربوط به سرریز دایره‌ای هستند. الحمید (۲۰۰۲) به بررسی آزمایشگاهی سرریز (مستقر در میانه کانال دایره‌ای) و دریچه (مستقر در دو موقعیت انتها و میانه کانال دایره‌ای) تحت شرایط جریان آزاد پرداخت. او معادلات بده را برای هر دو سازه توسعه داد که این معادلات با توجه به نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط او دارای خطای متوسط $\pm 1/9$ درصد هستند. لازم به ذکر است که پژوهش الحمید (۲۰۰۲) در یک کانال دایره‌ای با قطر ۲۵ سانتی‌متر انجام شده است.

مواد و روش‌ها

بده نظری

شکل ۱ جزئیات جریان عبوری از سرریزی را نشان می‌دهد که در انتهای کانال دایره‌ای افقی نصب شده است. در این شکل D قطر لوله، y_1 عمق آب در لوله، h بار آبی روی سرریز، T عرض المان کوچک سطح، p ارتفاع سرریز، dy ارتفاع نوار، y فاصله از نوار تا لبه سرریز و m فاصله از نوار تا کف است.

برای محاسبه بده نظری عبوری از سرریز، نوار نازکی به ارتفاع dy و عرض T در نظر گرفته می‌شود. مقدار بده عبوری از نوار برابر حاصل ضرب مساحت نوار در سرعت آن است. اگر سطح مقطع عرضی آب عبوری از سرریز را به المان‌های نواری با ضخامت dy تقسیم کنیم، بده عبوری از سرریز برابر با مجموع بده مربوط به هر نوار است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_t = 2Dh^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \sqrt{(\eta + \varepsilon)(1 - \eta - \varepsilon)} F(a, b) \quad (8)$$

که در این معادله تابع $F(a, b)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(a, b) = \int_0^1 \sqrt{x(1+ax)(1-bx)} dx \quad (9)$$

که در آن $a = \eta / (1 - \eta - \varepsilon)$ و $b = \eta / (\eta + \varepsilon)$. در این پژوهش تابع $F(a, b)$ با روش برازش منحنی (وطن‌خواه، ۲۰۱۱) به صورت زیر تخمین زده شده است:

$$F(a, b) \cong 0.44 \sqrt{(1+0.79a)(1-0.8b)} + 0.226 \sqrt{(1+0.235a)(1-0.2b)} \quad (10)$$

محاسبه ضریب بده

با توجه به تعریف بده نظری سرریز، مقدار ضریب بده با تعریف $C_d = Q_a / Q_t$ به صورت زیر قابل محاسبه است که در آن C_d ضریب بده واقعی، Q_a بده واقعی و Q_t بده نظری است.

$$C_d \cong \frac{Q_a}{2Dh^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \sqrt{(\eta + \varepsilon)(1 - \eta - \varepsilon)} F(a, b)} \quad (11)$$

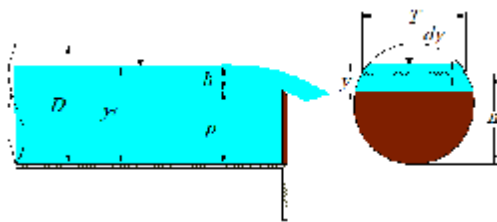
ضریب بده، اثر کلیه عوامل مهم مانند فشردگی جریان عبوری از سرریز، در نظر نگرفتن بار آبی سرعت ریش، افت‌های اصطکاکی موجود و همچنین یکنواخت فرض کردن توزیع سرعت را تصحیح می‌کند. با در نظر گرفتن یک معادله تجربی برای ضریب بده می‌توان دبی واقعی را از رابطه $Q_a = C_d Q_t$ محاسبه کرد.

بررسی آزمایشگاهی

واسنجی معادله نظری بده با استفاده از ضریب بده C_d ، $(Q_a = C_d Q_t)$ انجام می‌شود. تعیین مقدار این ضریب نیاز به اندازه‌گیری بده واقعی (آزمایشگاهی یا صحرایی) دارد. پس از بررسی خصوصیات جریان عبوری از سرریز، متغیرهای آزمایشگاهی مورد نیاز مشخص می‌شوند. برای جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی، سازه سرریز در انتهای دو کانال دایره‌ای افقی با قطر اسمی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر نصب شد و اندازه‌گیری گسترده‌ای از متغیرهای مؤثر بر ضریب بده انجام شد. سیصد و پنجاه آزمایش روی سرریزهای با ارتفاع‌های متفاوت در محدوده بده ۰/۵ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه انجام شد.

در این پژوهش برای بررسی تأثیر قطر کانال بر جریان عبوری از سرریز، دو لوله با قطر متفاوت استفاده شد.

$$Q_t = \int_0^h \sqrt{2g(h-y)} T dy \quad (1)$$



شکل ۱- مشخصات هیدرولیکی سرریز و المان مستطیلی در نظر گرفته شده روی آن

عرض نوار برای مجرای دایره‌ای نیز با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$T = 2D \sqrt{\frac{m}{D} \left(1 - \frac{m}{D}\right)} \quad (2)$$

با توجه به شکل داریم $y+p=m$ که با جای‌گذاری m در معادله (۲) خواهیم داشت:

$$T = 2D \sqrt{\frac{y+p}{D} \left(1 - \frac{y+p}{D}\right)} \quad (3)$$

حال اگر به جای T در معادله (۱) مقدار آن را از معادله (۳) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Q_t = \int_0^h 2D \sqrt{\frac{y+p}{D} \left(1 - \frac{y+p}{D}\right)} \sqrt{2g(h-y)} dy \quad (4)$$

معادله (۴) بیانگر بده نظری برای سرریز در یک کانال دایره‌ای است. با اعمال ضریب بده می‌توان بده واقعی را محاسبه کرد. با فرض $y=ht$ و جای‌گذاری آن در معادله (۴) داریم:

$$Q_t = h \int_0^1 2D \sqrt{\frac{ht+p}{D} \left(1 - \frac{ht+p}{D}\right)} \sqrt{2g(h-h t)} dt \quad (5)$$

در معادله بالا، t متغیر بدون بعدی است که با اعمال آن کرانه‌های انتگرال از صفر و h به صفر و یک تبدیل خواهد شد.

معادله (۵) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$Q_t = 2Dh^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \times \int_0^1 \sqrt{(\eta t + \varepsilon)(1 - \eta t - \varepsilon)} \sqrt{1-t} dt \quad (6)$$

در این معادله $\eta = h/D$ و $\varepsilon = p/D$ هستند. با تغییر متغیر $1-t=x$ معادله (۶) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$Q_t = 2Dh^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \sqrt{(\eta + \varepsilon)(1 - \eta - \varepsilon)} \times \int_0^1 \sqrt{x \left(1 - \frac{\eta}{\eta + \varepsilon} x\right) \left(1 + \frac{\eta}{1 - \eta - \varepsilon} x\right)} dx \quad (7)$$

معادله (۷) را می‌توان به فرم زیر نوشت:

شکل ۲ کانال دایره‌ای مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- کانال دایره‌ای استفاده شده در این پژوهش

طول کانال مورد آزمایش ۵/۷ متر و از جنس پولیکا در نظر گرفته شد. با توجه به حداکثر بده قابل تأمین توسط سامانه تأمین جریان، قطرهای موجود در بازار و مسائل اقتصادی پژوهش، دو قطر اسمی ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شد و دو کانال آزمایشی با ابعاد طولی ذکر شده در بالا به طور مشابه ساخته شد. به انتهای لوله، قابی مستطیل شکل نصب شد تا نصب سرریزها در انتهای کانال به راحتی انجام شود.

سرریزهای مورد آزمایش از جنس ورق پی‌وی‌سی بوده و ضخامتی برابر یک سانتی‌متر داشت و لبه آن از سمتی که با آب در تماس است، با زاویه ۴۵ درجه برش داده شده بود. ارتفاع سرریز متناسب با ارتفاع مورد نظر برای آزمایش و بزرگ‌تر از آن و عرض سرریز، هم عرض قاب انتهای لوله ساخته شده بود تا بتوان آن را از قسمت پایین و کناره‌ها به قاب انتهای لوله با گیره دستی به طور کامل محکم کرد تا هیچ جریانی از آن عبور نکند. شکل ۳ نحوه قرارگیری سرریز در انتهای کانال را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نحوه قرارگیری سرریز در انتهای کانال

برای تعیین ضریب بده، در هر آزمایش ابتدا سرریز با ارتفاع مشخصی در انتهای کانال به صورتی که لبه آن به طور کامل افقی باشد، نصب شد. برای گسترده‌گی دامنه کاربرد این سازه به‌عنوان یک سازه اندازه‌گیری جریان، ارتفاع‌های سرریز از حداقل ممکن تا حدود ۷۵ درصد قطر کانال و با گام‌های یک سانتی‌متری و دو سانتی‌متری به‌ترتیب برای قطر کوچک‌تر و بزرگ‌تر کانال انتخاب شدند. کمترین مقدار ارتفاع سرریز از نظر کاربردی، چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از تنظیم افقی بودن لبه سرریز، جریان در مدل برقرار شد. پس از گذشت زمان کافی و کنترل ارتفاع آب روی سرریز مثلی و حصول اطمینان از ثابت شدن جریان، بده عبوری با استفاده از سرریز مثلی تعیین شد. این سرریز مثلی قبل از انجام آزمایش‌ها با استفاده از جریان‌سنج مغناطیسی به طور دقیق واسنجی شده بود. سپس عمق آب بالادست سرریز با اندازه‌گیر نقطه‌ای^۱ برداشت شد. این عمق در فاصله کافی از سرریز و محلی که حداقل تلاطم سطح را داشت قرائت می‌شد، این فاصله با توجه به مشاهدات، حدود ۴۵ سانتی‌متری بالادست دریچه برای هر دو قطر انتخاب شد. در این فاصله اثر هد سرعت نیز کاهش می‌یابد. پی‌زومتر مربوط به نقطه برداشت نیز برای کنترل داده‌ها قرائت می‌شد. بعد از انجام قرائت بده و عمق، بده جریان را تغییر داده و مراحل تکرار می‌شد. برای هر ارتفاع سرریز، آزمایش‌ها از کمترین بده ممکن که حدود ۱/۵ سانتی‌متر ارتفاع تیغه آب روی سرریز ایجاد کند (در این حالت اثر کشش سطحی ناچیز خواهد بود) شروع شده و با گام‌های به طور تقریبی یکسان عمق‌های متفاوتی ایجاد می‌شد و این گام‌ها تا ایجاد حداکثر بده ممکن ادامه داشت.

نتایج و بحث

عوامل مؤثر بر ضریب بده سرریز در یک کانال دایره‌ای در جدول ۱ ارائه شده است.

ضریب بده را می‌توان به صورت تابعی از عواملی که بر آن مؤثرند به صورت زیر نوشت:

$$C_d = f(\mu, \rho, \sigma, V, D, p, h) \quad (12)$$

همان‌طور که دیده می‌شود ضریب بده تابعی از هفت متغیر مستقل با سه کمیت اصلی (طول، جرم و زمان) است که با استفاده از تحلیل ابعادی و تئوری

پای‌باکینگهام می‌توان آن را تابعی از چهار متغیر بدون بعد زیر در نظر گرفت:

$$C_d = f(R_p, W_p, \frac{h}{D}, \frac{p}{D}) \quad (13)$$

که در این معادله R_p و W_p به ترتیب عددهای بدون بعد رینولدز و وبر هستند. از آنجا که در بیشتر مواقع تیغه آب روی سرریز ضخامت کافی داشت (عدد وبر بالا) و جریان عبوری از سازه آشفته (عدد رینولدز بالا) است، در این پژوهش می‌توان از اثرات لزجت و کشش سطحی صرف نظر کرد. در این پژوهش از داده‌هایی که ارتفاع آب روی سرریز در آن‌ها کمتر از ۱/۵ سانتی‌متر بود صرف نظر گردید تا تیغه آب روی سرریز دارای ضخامت کافی شد و بتوان از اثر کشش سطحی صرف نظر کرد.

بنابراین با صرف نظر کردن از اثر لزجت و کشش سطحی معادله (۱۳) به فرم تابعی زیر کاهش می‌یابد.

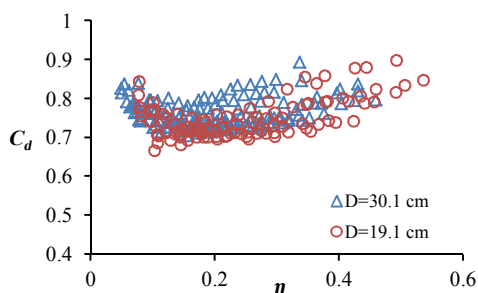
$$C_d = f(\frac{h}{D}, \frac{p}{D}) \quad (14)$$

جدول ۱- ابعاد و واحدهای متغیرهای هندسی، دینامیکی و سینماتیکی مورد نظر در تحلیل ابعادی ضریب بده

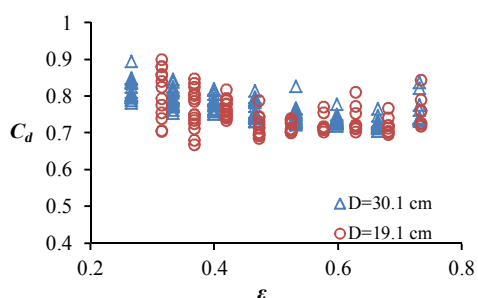
متغیر	نماد	بعد	واحد (متریک)
ضریب بده	C_d	بدون بعد	-
ارتفاع آب روی سرریز	h	L	m
ارتفاع سرریز	p	L	m
قطر کانال	D	L	m
سرعت	V	LT^{-1}	m/s
جرم مخصوص آب	ρ	M/L^{-3}	Kg/m^3
لزجت دینامیکی آب	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	$Kg/(m.s)$
کشش سطحی	σ	MT^{-2}	Kg/s^2

محاسبه ضریب بده داده‌های آزمایشگاهی

با استفاده از تعریف بده نظری و اندازه‌گیری بده واقعی، ضریب بده آزمایشگاهی محاسبه شد. با بررسی ضریب بده آزمایشگاهی برای ارتفاع‌های مختلف سرریز، در یک قطر مشخص، مشاهده شد که مقدار ضریب بده بر حسب $\eta = h/D$ از ارتفاع خاصی از سرریز و بیشتر از آن از روند خاصی پیروی می‌کند. این ارتفاع خاص برای لوله با قطر ۱۹/۱ سانتی‌متر شش سانتی‌متر و برای لوله با قطر ۳۰/۱ سانتی‌متر، هشت سانتی‌متر بوده است. بنابراین از داده‌های مربوط به سرریزهایی که ارتفاعشان کمتر از مقادیر ذکر شده بود صرف نظر شد. مقادیر ضریب بده بر حسب



شکل ۴- تغییرات ضریب بده بر حسب η



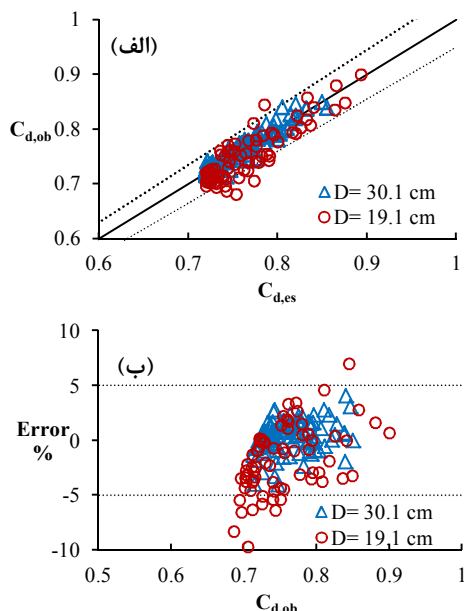
شکل ۵- تغییرات ضریب بده بر حسب ϵ

پیشنهاد معادله تجربی برازشی برای برآورد ضریب بده سرریز

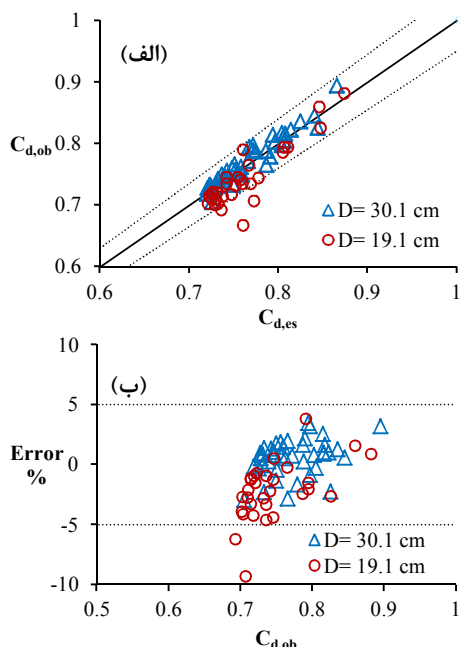
با توجه به تحلیل ابعادی انجام شده، ضریب بده سرریز را می‌توان تابعی از دو متغیر بدون بعد η و ϵ در نظر گرفت. از این دو متغیر بدون بعد برای تفسیر ضریب بده سرریز استفاده شد و بر حسب آن‌ها معادله‌ای برای تخمین ضریب بده با استفاده از ۷۰٪ از داده‌های برازشی داده شد. برای تعیین ضریب‌های معادله برازشی پیشنهادی، ضریب‌های با استفاده از گزینه Solver در نرم‌افزار اکسل طوری تعیین شد که مجموع یا میانگین قدرمطلق خطا نسبی، حداقل شود و سپس با استفاده از ۳۰٪ باقیمانده داده‌ها، معادله برازشی صحت‌سنجی شد. میانگین قدر مطلق درصد خطای نسبی^۱ برآورد MAPE بر اساس معادله (۱۵) محاسبه می‌شود.

1- Mean Absolute Percentage Error

خطای کمتری دارد که نشان دهنده تأثیر بیشتر ε بر ضریب بده است و معادله‌ای که هر دو متغیر بدون بعد η و ε را در تخمین ضریب بده سرریز در نظر می‌گیرد، دقیق‌ترین رابطه است.



شکل ۶- الف) مقادیر ضریب بده مشاهده شده و برآورد شده و ب) مقادیر خطای تخمین ضریب بده سرریز (مرحله واسنجی ضریب بده و استخراج معادله (۱۶) با استفاده از ۷۰٪ داده‌های آزمایشگاهی)



شکل ۷- الف) مقادیر ضریب بده مشاهده شده و برآورد شده و ب) مقادیر خطای تخمین ضریب بده سرریز (مرحله صحت‌سنجی ضریب بده پیشنهادی با معادله (۱۶) با استفاده از ۳۰٪ باقیمانده داده‌های آزمایشگاهی)

$$MAPE = \frac{\sum \left(\left| 1 - \frac{C_{d,es}}{C_{d,ob}} \right| \right)}{N} \times 100 \quad (15)$$

در این معادله $C_{d,es}$ و $C_{d,ob}$ به ترتیب ضریب بده مشاهداتی و ضریب بده برآورد شده با معادله برازشی پیشنهادی هستند. معادله پیشنهادی برای تعیین ضریب بده سرریز بر حسب متغیرهای بدون بعد η و ε به صورت زیر است.

$$C_{d,es} = 3.24\eta^{0.33} + 1.56\varepsilon^{0.55} - 6.65\eta^{0.12}\varepsilon^{0.13} + 2.74 \quad (16)$$

این معادله برای تمام داده‌های حاصل از آزمایش (هر دو قطر) و در دامنه $0.05 \leq \eta \leq 0.54$ و $0.26 \leq \varepsilon \leq 0.73$ معتبر است. میانگین قدر مطلق درصد خطای نسبی برای ضریب بده محاسبه شده با استفاده از معادله (۱۶) برای آن دسته از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سرریز که برای واسنجی و ارائه رابطه مورد نظر استفاده شدند برابر $1/92\%$ بوده و 93% تخمین‌ها خطایی کمتر از 5% دارند و این میانگین خطا برای آن دسته از داده‌هایی که برای صحت‌سنجی معادله (۱۶) استفاده شدند $2/04\%$ بوده و 96% تخمین‌ها خطایی کمتر از 5% دارند. شکل ۶ مقادیر ضریب بده مشاهده شده و برآورد شده با رابطه (۱۶)، همچنین مقادیر خطای تخمین ضریب بده سرریز برای مرحله واسنجی ضریب بده (با استفاده از 70% داده‌های آزمایشگاهی) را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب بده مشاهده شده و برآورد شده با معادله (۱۶)، همچنین مقادیر خطای تخمین ضریب بده سرریز برای مرحله صحت‌سنجی معادله پیشنهادی (۱۶) برای ضریب بده (با استفاده از 30% باقیمانده داده‌های آزمایشگاهی) نیز در شکل ۷ ارائه شده است.

برای مقایسه تأثیر متغیرهای η و ε بر ضریب بده معادلات مختلفی بر حسب این عوامل برای تعیین ضریب بده برازش داده شد. یک بار هم ضریب بده ثابت در نظر گرفته شد. معادلات مختلف برازش داده شده به همراه میانگین و حداکثر قدر مطلق درصد خطای نسبی برای داده‌های مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ ارائه شده است. ردیف‌های این جدول براساس افزایش شاخص f یعنی درصد فراوانی داده‌های برآورد شده با خطای کمتر از 5% مرتب شده‌اند. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود معادله ج نسبت به معادله ب میانگین

ضریب بده محاسبه شده از معادله (۱۷)، در حدود ۲۶/۱٪ خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۸ که در آن مقادیر ضریب بده مشاهده و برآورد شده و مقادیر خطای برازش برای کل داده‌ها با استفاده از معادله برازشی الحمید (۲۰۰۲) ارائه شده است دیده می‌شود، معادله وی در بیشتر موارد ضریب بده را کمتر از مقدار واقعی برای داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش، تخمین می‌زند. این امر می‌تواند به شرایط مختلف آزمایش در دو پژوهش انجام شده مربوط باشد.

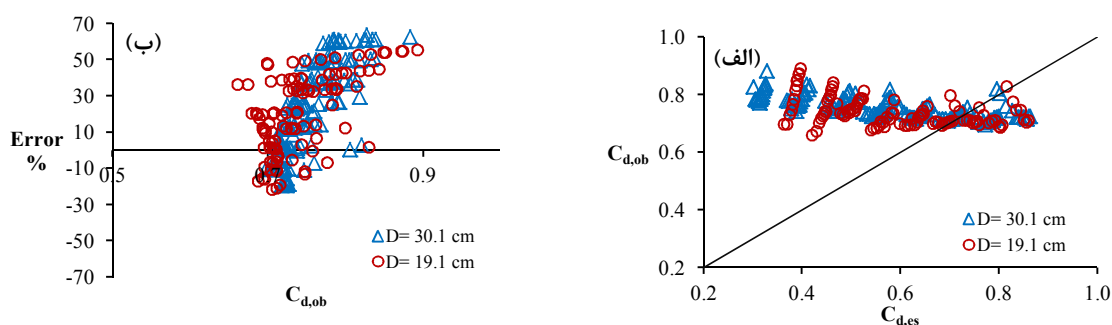
الحمید (۲۰۰۲) علاوه بر ارائه یک معادله تقریبی برای بده سرریز در کانال دایره‌ای، معادله زیر را برای برآورد ضریب بده این سازه پیشنهاد کرد. لازم به ذکر است پژوهش وی فقط در یک کانال دایره‌ای با قطر ۲۵ سانتی‌متر انجام شده است.

$$C_d = 1.287 \left(\frac{p}{D} \right)^{1.0406} \left(\frac{h}{p} \right)^{0.0594} \quad (17)$$

که در این معادله p ارتفاع سرریز، D قطر کانال و h ارتفاع تیغه آب روی سرریز است. با قرار دادن کل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سرریز (این پژوهش) در معادله (۱۷)، میانگین قدر مطلق درصد خطای نسبی برای

جدول ۲- مقایسه خطای روابط برازشی مختلف برای ضریب بده در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

ردیف	رابطه برازشی پیشنهادی برای تخمین ضریب بده	Max (%)	MAPE (%)	f (%)
واسنجی	الف	۱۵/۵۴	۴/۴۹	۶۵/۱۲
	ب	۱۲/۴۹	۳/۷۶	۷۲/۶۷
	ج	۱۵/۳۸	۳/۱۷	۸۰/۲۳
	د	۱۰/۶۲	۱/۹۲	۹۳/۰۲
صحت‌سنجی	الف	۱۵/۰۴	۴/۹۷	۵۷/۵۳
	ب	۱۵/۴۱	۴/۱۸	۶۵/۷۵
	ج	۱۵/۴۳	۳/۵۸	۷۳/۹۷
	د	۱۳/۸۲	۲/۰۴	۹۵/۸۹



شکل ۸- الف) مقادیر ضریب بده مشاهده شده و برآورد شده و ب) مقادیر خطای تخمین ضریب بده سرریز برای کل داده‌های این پژوهش با استفاده از معادله (۱۷) پیشنهادی الحمید (۲۰۰۲)

نظری ارائه شد (معادلات (۸) و (۱۰)). برای واسنجی معادلات نظری ارائه شده، اندازه‌گیری بده واقعی به صورت آزمایشگاهی انجام شد و ضریب بده آزمایشگاهی برای کلیه حالت‌ها محاسبه شد. در نهایت معادلات برازشی مناسب (جدول ۲) برای تخمین ضریب بده سرریز (و در نتیجه بده سرریز) ارائه شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش معادله‌ای برای تعیین بده نظری عبوری از سازه سرریز در کانال دایره‌ای به صورت انتگرالی توسعه داده شد. به دلیل پیچیده بودن این معادله، برای سهولت در کاربرد با استفاده از روش‌های انتگرال‌گیری عددی مقادیر متناظر با آن برای تمام دامنه کاربرد محاسبه شد. سپس معادله برازشی مناسب برای محاسبه مقدار بده

سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت "قطب ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی" انجام شده است. بدین وسیله از قطب یاد شده و از دانشگاه تهران که فضا و امکانات لازم را فراهم کرده است تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. حسینی پ. ۱۳۹۱. بررسی جریان آزاد از میان دریچه کشویی در یک کانال دایره‌ای افقی روباز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران. ۱۰۱ ص.
2. Alhamid A. A. 2002. Weirs and gates in circular cross section channels. *Dirasat Online*. 31-40.
3. Dodge E. R. 1935. M.Sc. thesis, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin. (Reported by Stevens J. 1957. Flow through circular weirs. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*. 83 (HY6): 1455-1-1455-24.
4. Greve F. V. 1932. Flow of water through circular, parabolic, and triangular vertical notch weirs. *Engineering Bulletin, Purdue University*. 40(2): 37-60.
5. Sommerfeld J. T. and Stallybrass M. P. 1996. Flow equations for parabolic and elliptical weirs. *Journal of Environmental Science and Health*. 31(4): 905-9012.
6. Stevens J. C. 1957. Flow through circular weirs. *Journal of Hydraulics Division*. 83(HY6): 1455-1-1455-24.
7. Vatankhah A. R. 2010. Flow measurement using circular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 21(2): 118-122.
8. Vatankhah, A. R. 2011. Approximate solutions to complete elliptic integrals for practical use in water engineering. *Journal of Hydrologic Engineering*. 16(11): 942-945.