

مطالعه آزمایشگاهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس با استفاده از روش فاکتوریل کامل

محمد محمودی راد^{۱*}، محمد جواد خانجانی^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

*mmahmoudirad@eng.uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۷/۳۰]

تاریخ دریافت: [۹۷/۴/۵]

چکیده

سازه ورتکس در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب و زهکشی شهری به منظور انتقال سیال به مجاری زیرزمینی با رقوم پایین‌تر به کار می‌رود. در این پژوهش، با ساخت مدل فیزیکی سازه از قطعات پلکسی گلاس، بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از آنالیز ابعادی نشان داده شده است که عدد فرود جریان (F_r)، نسبت ارتفاع کل ریزش به قطر شفت (L/D) و نسبت عمق چاهک به قطر شفت (H_s/D) عوامل موثر بر بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه هستند. در این پژوهش با در نظر گرفتن چهار سطح برای عامل F_r (۱، ۱۷۷، ۲/۰۱، ۲/۱۸، ۲/۳۲)، سه سطح برای عامل L/D (۱۰، ۱۳، ۱۶)، سه سطح برای عامل H_s/D (۰، ۱ و ۲) و چهار تکرار برای تمام ترکیبات ممکن بین عوامل، ۱۴۴ ($4 \times 4 \times 3 \times 3$) آزمایش در قالب روش فاکتوریل کامل طراحی و آنالیز شده است. نتایج نشان داد که بازدهی اتلاف انرژی جریان با افزایش عدد فرود، ۸ درصد کاهش و با افزایش نسبت ارتفاع کل ریزش به قطر شفت و نسبت عمق چاهک به قطر شفت به ترتیب ۵ و ۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که تاثیر متقابل عدد فرود جریان و نسبت عمق چاهک به قطر شفت بر بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه معنی‌دار نیست. علاوه بر این، معادله‌ای غیرخطی به صورت تابعی از عدد فرود جریان، نسبت ارتفاع کل ریزش به قطر شفت و نسبت عمق چاهک به قطر شفت برای تخمین بازدهی اتلاف انرژی جریان با استفاده از آنالیز رگرسیون ارائه شده است. همچنین نشان داده شد که در صورت استفاده از چاهک در پایه شفت ریزشی با عمق ۱ تا ۱/۶ برابر قطر شفت، عملکرد هیدرولیکی سازه افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: سازه ورتکس، اتلاف انرژی، طرح آزمایش‌ها، تحلیل رگرسیون

۱- مقدمه

تراز بالا به تراز پایین معمولاً از طریق سازه‌های ریزشی صورت

در سیستم‌های فاضلاب و زهکشی شهری، انتقال آب از می‌گیرد. دو نوع رایج این سازه‌ها، ریزشی با سقوط جریان [1]

یک عامل در یک زمان (OFAT) قادر نیست هیچ مدل چند عاملی را به منظور تعیین پاسخ ارائه کند. همچنین بدون در نظر گرفتن طراحی آزمایشها، بررسی آثار هر عامل و تاثیر متقابل بین آنها به راحتی امکان پذیر نخواهد بود. در مقابل با استفاده از روش فاکتوریل کامل و با در نظر گرفتن تعدادی سطح برای هر یک از عوامل موثر بر پاسخ و چند تکرار برای تمام ترکیبات ممکن بین آنها (حداقل ۲ تکرار به منظور بررسی خطا، تعداد بیشتر تکرارها به افزایش دقت نتایج کمک خواهد کرد)، قادر خواهیم بود تا ضمن بررسی تاثیر هر عامل و تاثیر متقابل بین آنها بر مقادیر پاسخ، مدلی چند عاملی به منظور پیش بینی پاسخ در محدوده مورد مطالعه ارائه کنیم. همچنین با ایجاد رویه پاسخ خواهیم توانست تغییرات پاسخ در این محدوده را به صورت واضح نشان دهیم [14, 21].

شکل ۱. مدل آزمایشگاهی سازه ورتکس

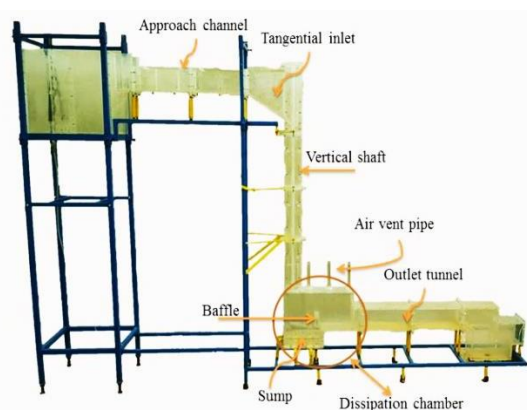


Fig. 1. Vortex structure experimental model

در این پژوهش ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی عوامل بدون بعد F_r ، L/D و H_s/D به عنوان عوامل موثر بر بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ی ورتکس معرفی شده اند سپس با توجه به خلا بکارگیری طراحی آزمایشها در پژوهشهای گذشته، تاثیر هم زمان این عوامل بر بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی قابلیت توصیف بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس، آزمایشها با روش فاکتوریل کامل طراحی و آنالیز شده اند. در نهایت، با آنالیز رگرسیون داده های آزمایشگاهی، مدل ریاضی منطبق بر فرایند واقعی ارائه شده است.

[2] و ریزشی گردابی (یا سازه ورتکس) [3, 4] است باشند. حفظ الگوی جریان پایدار و اتلاف مناسب انرژی از مزیت های سازه ی ورتکس نسبت به سازه های ریزشی با سقوط جریان است [5].

سازه ورتکس شامل سه قسمت اصلی است: سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی (شکل ۱). سازه ورودی معمولاً به یکی از سه شکل: ورودی مماسی، ورودی چرخشی و یا ورودی گردابی است [5, 6, 7]. این ورودیها با تولید جریان چرخشی و همچنین کنترل جریان هوا عملکرد قابل قبولی دارند [8]. در شفت قائم، جریان چرخشی ایجاد شده به جداره آن چسبیده و ضمن تشکیل هسته ی هوا در مرکز، به صورت حلقوی به سمت پایین حرکت می کند. اصطکاک دیواره و آشفته گی ایجاد شده در جریان جت حلقوی، از مهمترین عوامل اتلاف انرژی در این مسیر می باشند [9, 10]. در سازه خروجی، از مستهلک کننده انرژی با هدف هدایت جت چرخشی تقریباً قائم به مجرای خروجی افقی، هواگیری از جریان مخلوط آب و هوا و اتلاف مطمئن باقیمانده ی انرژی استفاده می شود [4]. همچنین استفاده از چاهک (با عمق ۷٪ تا ۱ برابر قطر آن) در پایه شفت ریزشی تاثیر مثبتی بر میزان اتلاف انرژی جریان می گذارد [11].

طراحی آزمایشها (DoE) شامل روشهایی است که با ایجاد تغییرات هدفمند روی یک یا چند عامل، به بررسی آثار آنها بر نتایج (پاسخ) می پردازد. این روشها می توانند برای اهداف مختلف از جمله غربالگری عوامل، استخراج مدل رگرسیون و بهینه سازی پاسخ مورد استفاده قرار گیرند. در این روشها آزمایشها به گونه ای طرح ریزی می شود که به منظور رسیدن به پاسخ، عوامل به صورت هم زمان با هم آزمایش شده و آثار متقابل بین عوامل نیز در نظر گرفته شود (تاثیر متقابل دو عامل، به این معنی است که تاثیر یک عامل روی تغییرات پاسخ به سطح عامل دیگر وابسته است). برخی پژوهشگران تنها تاثیر یک عامل در یک زمان و برخی دیگر بدون در نظر گرفتن طراحی آزمایشها، تاثیر چند عامل بر اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس را مورد مطالعه قرار داده اند [4, 10, 12, 13]. روش

دسترسی، l طول ورودی مماسی، e عرض ورودی در محل اتصال به شفت قائم، β زاویه شیب کف، L ارتفاع کل ریزش، D قطر شفت، f ضریب اصطکاک، S_t طول مستهلک کننده انرژی، B_t عرض مستهلک کننده انرژی، H_s عمق چاهک، B_s طول چاهک، H_b ارتفاع بافل، B_b عرض بافل، C_b فاصله مرکز بافل تا محور شفت قائم و D_b فاصله بین کف بافل و کف کانال خروجی. باید توجه داشت که عمق جریان (h) و سرعت جریان (V) در ابتدای ورودی مماسی (مقطع ۱) متغیرهای وابسته بوده و می توان آن ها را از متغیرهای رابطه (۲) محاسبه کرد. با استفاده از آنالیز ابعادی، می توان نوشت

$$\eta = \varphi\left(\beta, f, \frac{Q}{vh}, \frac{V^2 h \rho}{\sigma}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{B}{D}, \frac{l}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L}{D}, \frac{S_t}{D}\right) \quad (3)$$

$$\left(\frac{B_t}{D}, \frac{H_s}{D}, \frac{B_s}{D}, \frac{H_b}{D}, \frac{B_b}{D}, \frac{C_b}{D}, \frac{D_b}{D}\right)$$

که در آن $W = V^2 h \rho / \sigma$ و $Fr = V / \sqrt{gh}$ ، $R_r = Q / \vartheta h$ به ترتیب اعداد رینولدز شعاعی [17]، فرود و وبر جریان دسترسی هست. برای جریان های گردابی تاثیر کشش سطحی (و از این رو عدد وبر) در مقایسه با آثار ویسکوزیته و شتاب ثقل قابل چشم پوشی کردن است [18]. پژوهشگران حدود $W > 120$ و $R_r > 10^3$ را برای جلوگیری از آثار کشش سطحی و ویسکوزیته بر جریان گردابی تعیین کردند [19,20]. برای داده های تحقیق حاضر $213 \times 10^3 < R_r < 360 \times 10^3$ و $861 < W < 4066$ می باشد، پس آثار ویسکوزیته و کشش سطحی ناچیز بوده و R_r و W از معادله (۳) حذف می شوند. در نتیجه

$$\eta = \varphi\left(\beta, f, Fr, \frac{B}{D}, \frac{l}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L}{D}, \frac{S_t}{D}, \frac{B_t}{D}, \frac{H_s}{D}, \frac{B_s}{D}, \left(\frac{H_b}{D}, \frac{B_b}{D}, \frac{C_b}{D}, \frac{D_b}{D}\right)\right) \quad (4)$$

در این مطالعه، $e/D = 0.25$ ، $l/D = 2.18$ ، $B/D = 1.125$ ، $B_t/D = 1.25$ ، $S_t/D = 4.75$ ، $f = 0.02$ ، $\beta = 29.7^\circ$ و $B_b/D = 1.44$ ، $B_b/D = 0.25$ ، $H_b/D = 0.5$ ، $B_s/D = 2.19$ و $D_b/D = 0.19$ است. این اعداد در طول انجام آزمایش ها همواره ثابت بوده و بنابراین از معادله (۴) حذف می شوند.

شکل ۲. شرح سازه ورتکس (الف) نمای جانبی (ب) پلان بخش ورودی (ج) مقطع عرضی مستهلک کننده انرژی

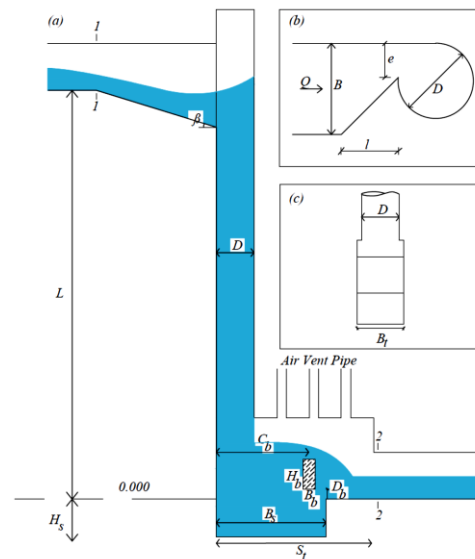


Fig. 2. Description of the vortex structure: (a) side view; (b) inlet part plan view (c) transverse section of dissipation chamber

۲- آنالیز ابعادی

بازدهی اتلاف انرژی جریان (η) در سازه ورتکس با استفاده از رابطه کلی زیر محاسبه می شود [10]:

$$\eta = (1 - H_{i+1} / H_i) \times 100 \% \quad (1)$$

در این رابطه H_i هد کل انرژی در بالادست (مقطع ۱) در شکل ۲) و H_{i+1} هد کل انرژی در پایین دست (مقطع ۲) در شکل ۲) است. جریان در این مقاطع به صورت جریان در مجاری روباز است و $H = h + V^2 / 2g + Z$ که h عمق جریان، V سرعت جریان، g شتاب ثقل و Z ارتفاع از سطح مبنا (کف کانال خروجی) است. بازدهی اتلاف انرژی جریان را می توان به صورت تابعی از متغیرهای مستقل (رابطه ۲)، که در پژوهش های گذشته [10, 15, 16] به آن ها اشاره شده است بیان کرد.

$$\eta = \varphi(Q, B, l, e, \beta, L, D, f, S_t, B_t, H_s, B_s, H_b, B_b, C_b, D_b, g, \rho, \mu, \sigma) \quad (2)$$

در این رابطه φ نماد تابع، ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی و σ کشش سطحی است. دیگر متغیرها با توجه به شکل (۲) عبارتند از: Q دبی جریان، B عرض کانال

در نتیجه: آزمایش‌ها ثابت است. جدول (۱) محدوده پارامترهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. محدوده پارامترهای مورد مطالعه

Q/Q_d	F_r	L/D	H_s/D	Number of Experiments
0.50	1.77	10, 13, 16	0, 1, 2	36
0.75	2.01	10, 13, 16	0, 1, 2	36
1.00	2.18	10, 13, 16	0, 1, 2	36
1.40	2.32	10, 13, 16	0, 1, 2	36

Table 1. Range of the studied parameters

دبی جریان با استفاده از دبی‌سنج الکترومغناطیس (MFC300) با دقت $\pm 1\%$ اندازه‌گیری و کنترل شده است. اندازه‌گیری رقوم سطح آب در کانال دسترسی، ورودی مماسی و مجرای خروجی توسط پیژومترهای نصب شده در خط مرکزی کف کانال (با دقت ± 1 میلی‌متر) صورت گرفته است. از طرح آزمایش‌ها، به منظور ارزیابی توانایی روش فاکتوریل کامل در پیدا کردن آثار عوامل اصلی (F_r , L/D و H_s/D) و آثار متقابل بین آن‌ها بر بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه‌ی ورتکس، استفاده شده است.

طرح آزمایش‌ها روش فاکتوریل کامل (با در نظر گرفتن چهار تکرار برای تمام ترکیبات ممکن و تعداد کل ۱۴۴ آزمایش) برای مقادیر واقعی عوامل به همراه پاسخ آزمایش‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. طرح آزمایش‌های روش فاکتوریل کامل برای مقادیر واقعی عوامل به همراه پاسخ آزمایش‌ها

F_r	L/D								
	10			13			16		
	H_s/D			H_s/D			H_s/D		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
1.77	94.30	94.29	92.68	93.28	93.82	93.62	92.02	95.12	94.91
	94.30	94.30	92.69	93.03	93.72	93.62	91.88	95.05	94.66
	94.29	94.29	92.78	93.06	93.82	93.62	92.25	95.06	94.75
2.01	94.29	94.29	92.69	93.03	93.82	93.62	92.25	95.12	94.98
	87.85	89.45	89.30	92.32	91.15	92.23	91.54	93.55	93.08
	87.65	89.24	89.30	92.29	91.15	92.21	91.40	93.33	93.16
2.18	87.43	89.45	89.17	92.37	91.40	92.12	91.56	93.24	93.16
	87.45	89.30	89.22	92.21	91.62	91.62	91.40	93.55	92.98
	86.05	88.47	88.03	91.82	90.68	90.75	90.64	92.46	92.39
2.32	86.40	88.47	88.16	91.83	90.59	90.75	90.36	92.62	92.39
	86.21	88.37	88.26	91.34	90.7	90.74	90.63	92.58	92.46
	86.38	88.27	88.04	91.36	90.67	89.99	90.51	92.46	92.46
2.32	85.84	87.60	87.17	90.64	89.81	89.94	89.56	91.58	91.41
	85.93	87.59	87.09	90.58	89.91	89.95	89.76	91.50	91.58
	85.94	87.70	86.90	90.60	89.88	90.14	89.66	91.48	91.54
	86.06	87.59	86.98	90.56	89.94	90.10	89.85	91.48	91.44

Table 2. DoE of full-factorial method for actual values in addition to the response of experiments

$$\eta = \varphi \left(F_r, \frac{L}{D}, \frac{H_s}{D} \right) \quad (5)$$

۳- مدل سازی آزمایشگاهی

مدل فیزیکی سازه ورتکس شبکه فاضلاب شهری تهران، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شده است. این مدل با مقیاس ۱:۱۰ و از جنس پلکسی گلاس شفاف است. مدل شامل کانال دسترسی مستطیلی، ورودی مماسی، شفت قائم، مستهلک کننده انرژی (که در آن چاهک و سازه مانع یا بافل نیز تعبیه شده است) و تونل خروجی مستطیلی است (شکل ۱). به منظور محاسبه قطر شفت ریزشی از رابطه زیر استفاده شده است [5]

$$D = K \left(\frac{Q}{g} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (6)$$

در این رابطه K ضریب ایمنی است. برای ورودی مماسی، Jain [5] و Hager [6] به ترتیب پیشنهاد $K = 1$ و $K = 1.25$ را داده اند. Hager [6] دلیل پیشنهاد خود را طراحی کارآمد هیدرولیکی و اقتصادی سازه بیان کرد. در این پژوهش با در نظر گرفتن $K = 1.22$ ، برای دبی ماکزیمم طراحی $Q_d = 19.4 \text{ l/s}$ مقدار $D = 0.16 \text{ m}$ محاسبه شده است. این مقدار در حین انجام

۴- بحث و نتایج

عملکرد هیدرولیکی

الگوی جریان پایدار در بخش ورودی سازه ورتکس بر اساس مقایسه دبی در شرایط زهکشی آزاد (Q_f) و ظرفیت کلی دبی ورودی (Q_c) تقسیم بندی می شود [15]. بر این اساس در بخش ورودی سازه امکان شکل گیری دو نوع الگوی جریان وجود دارد ۱- جریان همواری که به طور کامل به داخل شفت ریزشی تخلیه می شود ($Q_c < Q_f$) ۲- جریانی که با پس زدگی و تشکیل پرش هیدرولیکی در این بخش همراه است ($Q_c > Q_f$). Q_f و Q_c تحت تاثیر هندسه ورودی مماسی و شفت قائم است و توسط روابط زیر بیان می شوند [15]:

$$Q_c = \frac{\sqrt{g}e(2z/3)^{3/2}}{(\cos^{2/3}\beta - (e/B)^{2/3})^{3/2}} \quad (7)$$

$$Q_f = (\tan\beta \frac{\pi D}{1-e/D})^{3/2} \sqrt{g}e \times \cos^2\beta \quad (8)$$

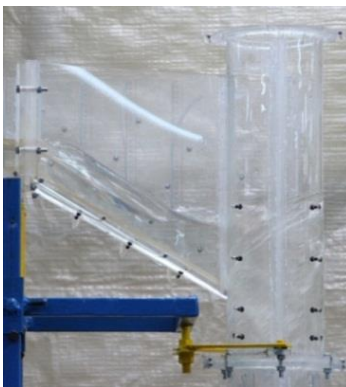
Q_f و Q_c برای سازه ورتکس مطالعه شده در این پژوهش به ترتیب 15.1 L/s و 22.3 L/s است. جریان مشاهده شده در بخش ورودی سازه (برای $0.5Q_a \leq Q \leq 1.4Q_a$ و $Q_c < Q_f$) در شکل (۳) نشان داده شده است. با افزایش دبی، تغییرات جریان در بخش تنگنا به صورت هموار و بدون تشکیل پرش هیدرولیکی متمایزی صورت گرفته است (شکل ۳). همچنین برای همه دبی ها، سطح آب در این بخش پایین تر از سطح آب در کانال دسترسی است. برای دبی های کوچک ($Q \leq 0.75Q_a$)، جریان آزادانه به داخل شفت ریزشی تخلیه شده و هیچ گونه انسدادی در محل اتصال با شفت قائم رخ نمی دهد (شکل ۳ الف و ب). با افزایش دبی ($Q > 0.75Q_a$)، جریان گردابی در شفت قائم با جریان ورودی در محل اتصال برخورد داشته و سطح آن افزایش می یابد (شکل ۳ ج و د). الگوی جریان مشاهده شده در بخش ورودی سازه با الگوی جریان مشاهده شده در تحقیق [15] Yu and Lee برای $Q_c < Q_f$ هماهنگی مناسبی را نشان می دهد.

شکل ۳. جریان مشاهده شده در بخش ورودی سازه برای دبی های مختلف

(الف) 9.7 l/s (ب) 14.5 l/s (ج) 19.4 l/s (د) 27.1 l/s



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig. 3. Flow observed in the structure inlet part $Q =$ (a) 9.7 L/s; (b) 14.5 L/s; (c) 19.4 L/s; and (d) 27.1 L/s

یافته و سبب می شود تا جریان عبوری از روی بافل علاوه بر حالت پرتابی، از بدنه آن نیز جدا شود (شکل ۵ الف).

شکل ۵. برخورد جریان ($Q = Q_d$) با بافل تعبیه شده در مستهلک کننده

انرژی (الف) $H_s / D = 0$ (ب) $H_s / D = 1$ (ج) $H_s / D = 1$



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 5. Flow hits ($Q = Q_d$) the baffle embedded in the dissipation chamber (a) $H_s / D = 0$ (b) $H_s / D = 1$ (c) $H_s / D = 2$

شکل ۶. نسبت عمق جریان روی بافل به قطر شفت ریزشی (y_b/D) در

برابر L/D برای مقادیر متفاوت H_s / D

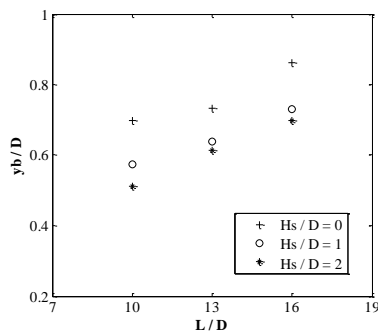
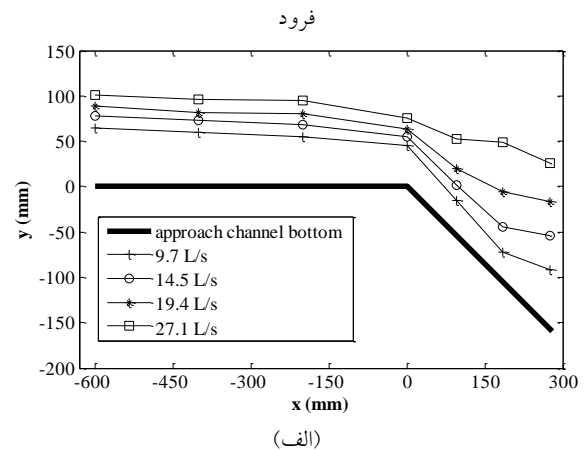


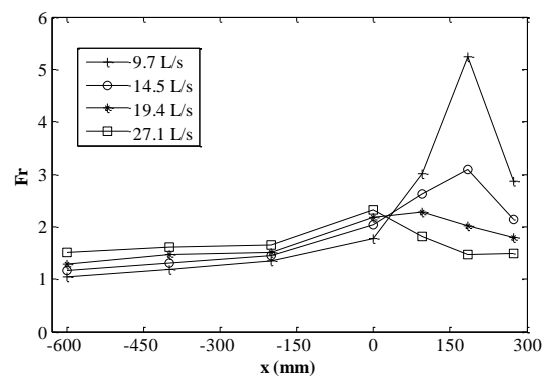
Fig. 6. Ratio of the flow depth on baffle to the drop shaft diameter (y_b/D) versus L/D for different values of H_s / D

شکل (۴ الف) پروفیل های سطح آزاد اندازه گیری شده بخش ورودی را برای دبی های متفاوت نشان می دهد. این پروفیل ها در بخش ورودی سازه هموار بوده و سطح آب به تدریج با افزایش دبی صعود می کند. همچنین این پروفیل ها هیچ گونه پس زدگی جریان در بخش ورودی سازه را نشان نمی دهند. شکل (۴ ب) تغییرات عدد فرود محاسبه شده در بخش ورودی سازه را نشان می دهد. در این شکل، کاهش قابل ملاحظه مقادیر عدد فرود در بخش تنگنا نشان دهنده انتقال محل کنترل جریان از بالادست (کانال دسترسی برای دبی های کوچک) به پایین دست (محل اتصال برای دبی های بزرگ) است.

شکل ۴. جریان در سازه ورودی (الف) پروفیل سطح آزاد (ب) پروفیل عدد



(الف)



(ب)

Fig. 4. Flow in the inlet part (a) Free surface profile (b) Froude number profile

مشاهدات نشان می دهد که برخورد جریان با بافل تعبیه شده در مستهلک کننده انرژی، موجب افزایش عمق جریان روی بافل نسبت به سایر قسمت ها است (شکل ۵). در صورت عدم استفاده از چاهک در پایه شفت ریزشی، این برخورد تشدید

پژوهشی گسترده استفاده می‌شود [21]. در این پژوهش، پس از برازش مدل‌های خطی و غیرخطی بر داده‌های آزمایشگاهی، مدل درجه دوم (مدل کلی اولیه) زیر به منظور تخمین بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس پیشنهاد شده است:

$$\eta = a_0 + a_1(F_r) + a_2(L/D) + a_3(H_s/D) + a_4(F_r)(L/D) + a_5(F_r)(H_s/D) + a_6(L/D)(H_s/D) + a_7(F_r)^2 + a_8(L/D)^2 + a_9(H_s/D)^2 \quad (9)$$

در این معادله، a_0 تا a_9 ضرایب برآورد شده با استفاده از روش کمینه مربعات است. ارزیابی مدل برازش شده با آنالیز واریانس انجام می‌شود. مقادیر ضرایب a_0 تا a_9 و نتایج آنالیز واریانس برای مدل فاکتوریل کامل در جدول (۳) ارائه شده است. اهمیت آماری مدل و ترم‌های آن، با استفاده از p -value (که مرتبط با F -value است) تعیین می‌شود. p -value های کوچکتر (F -value های بزرگتر) منجر به اهمیت آماری بیشتری می‌شوند [14]. به طور معمول تنها ترم‌های با p -value کوچکتر از 0.05 در مدل باقی می‌مانند [22]. بنابراین، با توجه به جدول (۳)، تاثیر متقابل F_r و H_s/D بر بازدهی اتلاف انرژی در سازه معنی‌دار نیست و از مدل پیشنهادی حذف می‌شود.

برای یک مقدار ثابت دبی ($Q = Q_d$)، شکل (۶)، نسبت y_b/D (نسبت عمق جریان روی بافل به قطر شفت ریزشی) را در مقابل L/D ، برای مقادیر متفاوت H_s/D نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- برای یک مقدار ثابت H_s/D ، نسبت y_b/D با افزایش L/D افزایش می‌یابد (به دلیل آن که با افزایش L/D ، سقوط جریان در انتهای شفت ریزشی از ترازهای بالاتری صورت می‌گیرد)

- برای یک مقدار ثابت L/D ، نسبت y_b/D با افزایش H_s/D کاهش می‌یابد.

مشخصات مدل پیشنهادی

بیشتر، در یک آزمایش طرح شده تحلیل واریانس (ANOVA) به تعیین عوامل مهم کمک می‌کند، و از رگرسیون در تولید یک مدل کمی که عوامل مهم را به پاسخ ربط می‌دهد استفاده می‌شود. مدل‌های معمول رگرسیون، مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم است. مدل خطی ساده، زمانی به کار گرفته می‌شود که هیچ‌گونه انحنایی در پاسخ وجود نداشته باشد. برای ارزیابی انحنای، توصیف متقابل بین عوامل و تعیین یک نقطه بحرانی (نقطه ماکزیمم، می‌نیمم یا زینی) لازم است مدل پیشنهادی شامل ترم‌های درجه دوم نیز باشد. از مدل‌های با درجه بالاتر تنها برای پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده با دامنه

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم پیشنهادی (مدل کلی اولیه)

Source	Coefficient estimate (a_i)	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value
Model	-	740.46	9	82.27	124.36	<0.0001 ^S
Intercept	153.1906	-	1	-	-	-
$X_1 : F_r$	-57.9533	380.23	1	380.23	574.73	<0.0001
$X_2 : L/D$	0.4211	203.96	1	203.96	308.29	<0.0001
$X_3 : H_s/D$	-0.0986	15.13	1	15.13	22.87	<0.0001
X_1X_2	1.1576	48.69	1	48.69	73.57	<0.0001
X_1X_3	0.1972	0.16	1	0.16	0.2373	0.6270 ^{NS}
X_2X_3	0.1041	6.24	1	6.24	9.44	0.0026
X_1^2	8.4998	11.62	1	11.62	17.56	<0.0001
X_2^2	-0.0924	22.14	1	22.14	33.47	<0.0001
X_3^2	-0.6291	12.66	1	12.66	19.14	<0.0001
Residual	-	88.65	134	0.6616	-	-

S و NS به ترتیب معنی دار و بدون معنی

Table 3. Results of ANOVA for recommended 2nd order model (basic general model)

می دهد. مقدار مطلوب این شاخص آماری ۴ یا بیشتر است. نسبت بزرگ تعیین شده نشان دهنده سیگنال‌های مناسب است. بنابراین مدل می‌تواند با حرکت در فضای تعریف شده، مقادیر پاسخ را پیش‌بینی نماید [23]. مدل نهایی (معادله ۱۰) بر اساس شاخص‌های آماری بیان شده تعیین، و برای نشان دادن تغییرات بازدهی اتلاف انرژی در سازه انتخاب شد.

$$\eta = 152.7823 - 57.7561(F_r) + 0.4211(L/D) + 0.3095(H_s/D) + 1.1576(F_r)(L/D) + 0.1041(L/D)(H_s/D) + 8.4998(F_r)^2 - 0.0924(L/D)^2 - 0.6291(H_s/D)^2 \quad (10)$$

نمودارهای تشخیص ویژگی‌های آماری مدل (مانند نمودارهای احتمال نرمال و باقیمانده‌ها) برای ارزیابی فرضیات آنالیز واریانس استفاده قرار می‌شود. شکل (۷ الف)، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای مدل نهایی نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، باقیمانده‌ها در امتداد خط قطری پراکنده شده‌اند و توزیعی نرمال دارند. شکل (۷ ب)، نمودار باقیمانده‌ها را در برابر مقادیر پیش‌بینی شده برای مدل نهایی نشان می‌دهد. قرار گرفتن نقاط در محدوده ثابتی از وسط نمودار نشان می‌دهد که این مدل به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی هماهنگ است.

در جدول (۴)، علاوه بر مشخصات مدل نهایی، برخی شاخص‌های آماری (مانند R^2 , $Adj - R^2$, $Pred - R^2$, Std. Dev., Adequate precision و C. V.) که بیشتر به منظور اعتبار سنجی مدل از آن‌ها استفاده می‌شود نیز ارائه شده‌اند. p -value برای مدل کوچکتر از 0.0001 است که نشان می‌دهد مدل با سطح اطمینان بالایی (99.99%) از لحاظ آماری معنی‌دار است. $R^2 = 0.8929$ نشان دهنده هماهنگی مناسب مدل نهایی برازش داده شده بر داده‌های آزمایشگاهی است (به عبارت دیگر 89.29% تغییرات پاسخ را می‌توان با مدل نهایی شرح داد). $Adj - R^2$ ضریب تعیین تعدیل شده است و معمولاً برابر یا کوچکتر از R^2 است. $Pred - R^2$ ضریب تعیین پیش‌بینی است و مقدار بالای آن نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است به گونه موثری مجموعه‌ای از داده‌های جدید را پیش‌بینی نماید [14]. ضریب واریانس (Coefficient of variance) فاکتور قابلیت تکثیر یک مدل است و از نسبت انحراف معیار به مقدار میانگین پاسخ مشاهده شده تعیین می‌شود (به صورت درصد). به طور کلی یک مدل با $C.V. < 10\%$ را می‌توان قابل تکثیر دانست [14]. در این مطالعه، $C.V. = 0.8906\%$ نشان دهنده این قابلیت برای مدل نهایی ارائه شده است. مقدار Adequate precision نسبت سیگنال به نویز را نشان

جدول ۴. نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم کاهش یافته (مدل نهایی)

Source	Coefficient estimate (a_i)	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value
Model	-	740.30	8	92.54	140.67	<0.0001 ^S
Intercept	152.7823	-	1	-	-	-
$X_1 : F_r$	-57.7561	380.23	1	380.23	578.00	<0.0001
$X_2 : L/D$	0.4211	203.96	1	203.96	310.04	<0.0001
$X_3 : H_s/D$	0.3095	15.74	1	15.74	23.92	<0.0001
X_1X_2	1.1576	48.69	1	48.69	74.01	<0.0001
X_2X_3	0.1041	6.24	1	6.24	9.49	0.0025
X_1^2	8.4998	11.62	1	11.62	17.66	<0.0001
X_2^2	-0.0924	22.14	1	22.14	33.66	<0.0001
X_3^2	-0.6291	12.66	1	12.66	19.25	<0.0001
Residual	-	88.81	135	0.6578	-	-
Model Summary Statistics						
Std. Dev.	0.8111		R^2		0.8929	
C. V.	0.8906		$Adj - R^2$		0.8865	
Adequate precision	41.1561		$Pred - R^2$		0.8779	

Table 4. Results of ANOVA for reduced 2nd order model (final model)

ه- نمودارهای سطح پاسخ

با توجه به تاثیر معنی دار اثر متقابل L/D و F_r بر بازدهی اتلاف انرژی جریان جدول (۴)، شکل (۹) به روشنی آثار L/D و F_r را بر مقادیر پاسخ نشان می دهد. بازدهی اتلاف انرژی با افزایش F_r ، کاهش و با افزایش L/D ، افزایش می یابد. افزایش L/D و به تبع آن تاثیر قابل ملاحظه اصطکاک دیواره بر جریان گردابی، سبب افزایش بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه می شود. همچنین این مشاهده نشان می دهد که با کاهش عدد فرود (کاهش دبی ورودی به سازه)، جریان گردابی در شفت قائم تعداد چرخش بیشتری (تاثیر بیشتر اصطکاک دیواره بر جریان) نسبت به جریان های با اعداد فرود بزرگتر دارد. این موضوع سبب می شود تا با افزایش عدد فرود، بازدهی اتلاف انرژی جریان کاهش یابد. علاوه بر این، شکل (۹) نشان می دهد که در سازه های با L/D کوچکتر ($L/D = 10$) تاثیر کاهش عامل F_r بر بازدهی اتلاف انرژی جریان بیشتر است.

شکل ۹. تاثیر F_r و L/D بر بازدهی اتلاف انرژی جریان ($H_s / D = 1$)

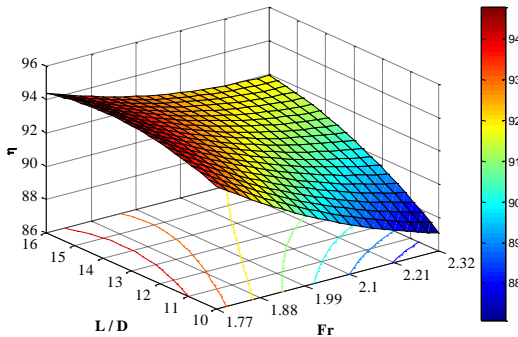


Fig. 9. Effect of F_r and L/D on the FEDE ($H_s / D = 1$)

شکل ۱۰. تاثیر H_s / D و L/D بر بازدهی اتلاف انرژی جریان

($F_r = 2.18$)

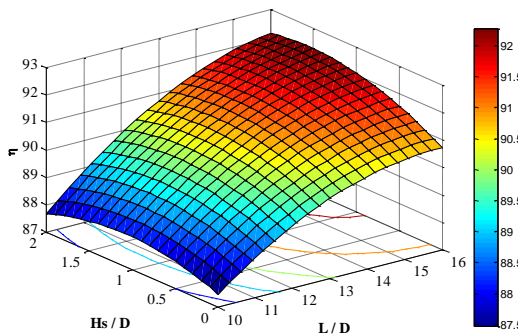


Fig. 10. Effect of H_s / D and L/D on the FEDE ($F_r = 2.18$)

بنابراین، با توجه به شکل (۷) فرضیه آنالیز واریانس مورد تایید است.

شکل ۷. نمودارهای تشخیص ویژگی های آماری مدل (الف) نمودار احتمال نرمال (ب) نمودار باقیمانده

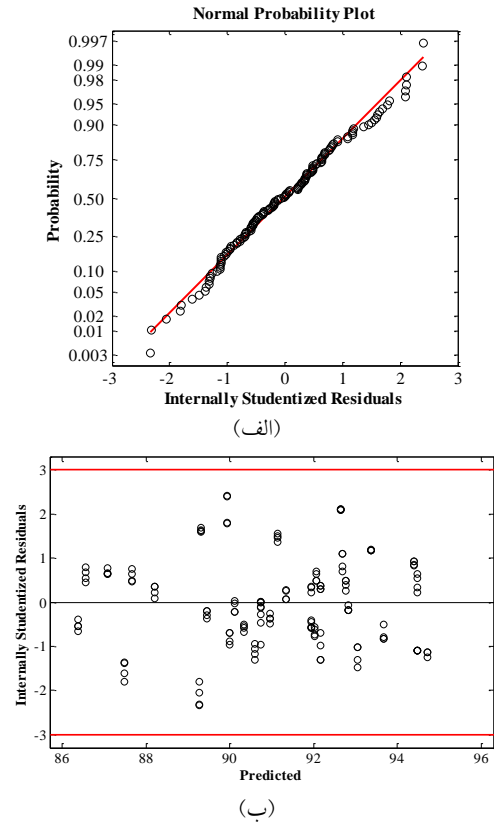


Fig. 7. Diagnostics plots of the model (a) normal probability plot (b) residuals plot

شکل (۸)، داده های آزمایشگاهی را در مقابل مقادیر پیش بینی شده مدل نهایی نشان می دهد. با توجه به پراکندگی نقاط در نزدیکی خط قطری می توان نتیجه گرفت که مدل نهایی با داده های آزمایشگاهی سازگاری مناسبی دارد.

شکل ۸. مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده بازدهی اتلاف انرژی جریان

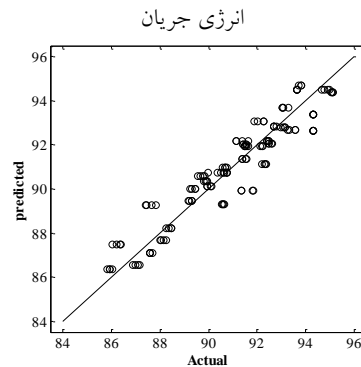


Fig. 8. Comparing the measured and predicted values of the FEDE

ورودی مماسی از سطح آب در کانال دسترسی پایین تر است. - در مستهلک کننده انرژی، برخورد جریان با بافل به کار رفته در این بخش موجب افزایش تراز آب روی بافل نسبت به سایر قسمت‌های مستهلک کننده انرژی می‌شود. همچنین برای مقادیر ثابتی از Q و H_s/D تراز آب روی بافل با افزایش L/D افزایش می‌یابد در حالی که برای مقادیر ثابتی از Q و L/D تراز آب روی بافل با افزایش H_s/D کاهش می‌یابد.

- جریان مشاهده شده در مستهلک کننده انرژی نشان می‌دهد که در صورت عدم استفاده از چاهک در پایه شفت ریزشی، جریان برخوردی با بافل به کار رفته در مستهلک کننده انرژی تشدید یافته و از بدنه آن جدا می‌شود. این موضوع می‌تواند احتمال وقوع کاویتاسیون در این قسمت را به دنبال داشته باشد. - مقادیر اندازه‌گیری شده بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس با افزایش عدد فرود F_r ، در تمام سطوح عامل L/D کاهش می‌یابند به گونه‌ای که بیشترین کاهش در سطوح پایین تر عامل L/D و به میزان ۸ درصد است.

- تغییرات بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس در مقابل نسبت‌های L/D و H_s/D روند افزایشی دارد به گونه‌ای که آثار مقادیر H_s/D بین ۱ تا ۱/۶ روی بازدهی اتلاف انرژی جریان قابل ملاحظه‌تر است.

۷- قدردانی

پژوهش اخیر با استفاده از منابع مالی شرکت محترم فاضلاب تهران به عنوان طرح تحقیقاتی مصوب سال ۱۳۹۵ شماره ۹۵/۱۰۰/۵۸۵/ص به انجام رسید که نویسندگان مقاله از همکاری آن شرکت محترم کمال تشکر را دارند.

References

- [1] Rajaratnam, N., Mainali, A., and Hsung, C. Y. 1997 Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems, *J. Environ. Eng.*, 123(5), 486-491.
- [2] Camino, G. A., Zhu, D. Z., and Rajaratnam, N. 2015 Flow Observations in Tall Plunging Flow Dropshafts, *J. Hydraul. Eng.*, 141(1).
- [3] Jain, S. C. 1987 Free-surface swirling flows in vertical dropshaft, *J. Hydraul. Eng.*, 113(10), 1277-1289.
- [4] Vischer, D. L., and Hager, W. H. 1995 Vortex drops,

با توجه به جدول (۴) و تاثیر معنی‌دار اثر متقابل H_s/D و L/D بر بازدهی اتلاف انرژی جریان، در شکل (۱۰) تاثیر این عوامل بر مقادیر پاسخ نشان داده شده است. در این شکل نیز به وضوح تاثیر افزایشی L/D بر بازدهی اتلاف انرژی جریان مشاهده می‌شود. این تاثیر در سازه‌های با H_s/D بزرگتر، بیشتر است. همچنین با توجه به شکل (۱۰)،

با افزایش H_s/D نیز شاهد افزایش در بازدهی اتلاف انرژی جریان هستیم به طوری که مقدار بیشینه آن در محدوده $1.0 < H_s/D < 1.6$ رخ می‌دهد. به این ترتیب می‌توان طرح چاهک با $0.7 < H_s/D < 1.0$ [11] را در محدوده $1.0 < H_s/D < 1.6$ مناسب‌تر ارزیابی نمود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ویژگی‌های هیدرولیکی سازه ورتکس در سیستم‌های فاضلاب و زهکشی شهری به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. برای این منظور با ساخت مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۱۰ از جنس پلکسی گلاس شفاف شرایط برای مشاهده و بررسی الگوی جریان در سازه نیز فراهم شده است. به منظور تعیین عوامل طرح فاکتوریل کامل، با استفاده از آنالیز ابعادی نشان داده شد که عدد فرود جریان دسترسی (F_r)، نسبت ارتفاع کل ریزش به قطر شفت (L/D) و نسبت عمق چاهک به قطر شفت (H_s/D) می‌توانند برای ارزیابی عملکرد سازه ورتکس در اتلاف انرژی جریان بسیار مهم باشند. ۱۴۴ آزمایش با استفاده از روش فاکتوریل کامل طراحی و آنالیز شده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

- معادله‌ای غیرخطی به صورت تابعی از سه عامل بدون بعد F_r ، L/D و H_s/D برای تخمین بازدهی اتلاف انرژی جریان در سازه ورتکس با $R^2 = 0.893$ ارائه شده است. معادله پیشنهادی در محدوده $F_r = 1.77 - 2.32$ ، $L/D = 10 - 16$ و $H_s/D = 0 - 2$ قابل استفاده است.

- برای $9.7 L/s \leq Q \leq 27.1 L/s$ و $Q_c < Q_f$ ، پسرش هیدرولیکی در ورودی مماسی شکل نگرفته و جریان آزادانه به داخل شفت ریزشی تخلیه می‌شود. علاوه بر این سطح آب در

- Flow over Arced Weirs Using Traditional and Response Surface Methodologies, *Hydraulic Engineering*, 143(11).
- [15] Yu, D., and Lee, J. 2009 Hydraulics of Tangential Vortex Intake for Urban Drainage, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 135, pp. 164–174.
- [16] Hager, W. H. 2010 WasteWater Hydraulics: Theory and Practice, (Second ed.). Springer.
- [17] Weller, J. A. 1974 Similitude in free-surface vortex formations; Discussion of Daggett & Keulegan, *J. Hydraul. Div.*, 101, HY11.
- [18] Daggett, L. L., and Keulegan, G. H. 1974 Similitude conditions in freesurface vortex formations, *J. Hydraul. Div.*, 100(11), 1565–1581.
- [19] Jain, A. K., Garde, R. J., and Ranga Raju, K. G. 1978 Vortex formation at vertical pipe intakes, *J. Hydraul. Div.*, 104(10), 1429–1445.
- [20] Anwar, H. 1965 Flow in a free vortex, *Water Power*, 4, 153–161.
- [21] Montgomery, D. C. 2013 Design and Analysis of Experiments, 8th edition. Wiley, New York.
- [22] Amiri, F., Mousavi, S. M., Yaghmaei, S., and Barati, M. 2012 Bioleaching kinetics of a spent refinery catalyst using *Aspergillus niger* at optimal conditions, *Biochem. Eng. J.*, 67, 208–217.
- [23] Ahmadi, M., Vahabzadeh, F., Bonakdarpour, B., Mofarrah, E., and Mehranian, M. 2005 Application of the central composite design and response surface methodology to the advanced treatment of olive oil processing wastewater using Fenton's peroxidation, *J. Hazard. Mater.*, 123(1–3), 187–195.
- Energy dissipators: Hydraulic structures design manual, No. 9, Chap. 9, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 167–181.
- [5] Jain, S. C. 1984 Tangential vortex-inlet, *J. Hydraul. Eng.*, 110(12), 1693–1699.
- [6] Hager, W. H. 1990 Vortex drop inlet for supercritical approaching flow, *J. Hydraul. Eng.*, 116(8), 1048–1054.
- [7] Quick, M. C. 1990 Analysis of spiral vortex and vertical slot vortex drop shafts, *J. Hydraul. Eng.*, 116(3), 309–325.
- [8] Jain, S. C., and Ettema, R. 1987 Vortex-flow intakes, *IAHR Hydraulic Structures Design Manual*, Vol. 1, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [9] Giudice, G. D., Gissoni, C., and Rasulo, G. 2010 Design of a Scroll Vortex Inlet for Supercritical Approach Flow, *Hydraulic Engineering*, 136(10), 136:837-841.
- [10] Zhao, C. H., Zhu, D. Z., Sun, S. K., and Liu, Z. P. 2006 Experimental study of flow in a vortex drop shaft, *J. Hydraul. Eng.*, 132(1), 61–68.
- [11] Zhao, C. H., Sun, S. K., and Liu, Z. P. 2001 Optimal study on the depth of stilling well for rotation-flow shaft flood-releasing tunnel, *Water Power*, 2001(5), 30–33 (in Chinese).
- [12] Jeanpierre, D., and Lachal, A. 1966 Dissipation d'énergie dans un puits a vortex, *Houille Blanche*, 21(7), 825–831.
- [13] Jain, S. C., and Kennedy, J. F. 1983 Vortex-flow dropstructures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District inline storage system, *IIHR Rep. No. 264*, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
- [14] Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M., and Motalebizadeh, M. R. 2017 Evaluation and Analysis of

Experimental Study of Flow Energy Dissipation in a Vortex Structure Using Full Factorial Method

M. Mahmoudi Rad^{1*}, M.J. Khanjani²

1- Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

m.m6456@yahoo.com

Abstract:

With rapid rise in development of urban districts, a ferocious demand for water-collecting urban sewer systems is inevitable. In fact, flexible sewer collecting systems and drainage systems should be developed for controlling sewage and runoff, respectively. In the case of underground, conducting water flow properly through high vertical distances needs reliable criteria design for dissipating flow energy. Vortex structure is taken into account as one of the economical infrastructures which can be used to eradicate destructive impacts of inflow over a drop with invert elevation. In the current investigation, a physical model, made of Plexiglas segments, was set up to study hydraulic performance of vortex drop structure in terms of flow energy dissipation efficiency (FEDE). 144 experiments were conducted and analyzed by means of full factorial method (FFM). Results of dimensional analysis demonstrated that Froude number (Fr), ratio of drop total height to shaft diameter (L/D), and ratio of sump depth to shaft diameter (H_s/D) were considered effective variables on the FEDE. Hence, a regression based equation in form of a quadratic polynomial was proposed to estimate FEDE variable. Experiments aims were to investigate simultaneous effects of approach flow Fr , L/D , H_s/D on the FEDE. Results of experiments indicated that FEDE variable had downward trends with an increase in Fr variable and additionally, FEDE has gone through upward trends with an increase of L/D and H_s/D ratios. Increase in L/D , which causes remarkable effect of wall friction on vortex flow, leads to increase in FEDE in the structure. Moreover, observations showed that decrease in inlet discharge for smaller Froude number results in more rotations of vortex flow in vertical shaft than flow with larger discharges for larger Froude number. This causes reduction of FEDE due to increase in inlet discharge. In addition, shown that in the structures with smaller L/D ($L/D = 10$), the reduction effect of F_r on the FEDE is more. With respect to positive effects of sump depth range ($H_s / D = 1 - 1.6$) on FEDE and flow patterns observed in the entrance outlet tunnel, range ($H_s / D = 1 - 1.6$) can be replaced by H_s / D range (0.7-1) proposed Zhao et al. [11]. In addition, the results showed that the interaction of F_r and H_s/D on the FEDE in the structure is not significant.

For Q between 9.7 and 27.1 l/s, formation of hydraulic jump in tangential inlet was not occurred and flow was drained freely to drop shaft. Additionally, water surface in tangential inlet was lower than that of approach channel. In the outlet part of vortex structure, flow hitting the baffle leads to relatively significant increase in flow elevation top of the baffle in comparisons with other parts. Moreover, for constant values of Q and H_s/D ratio, flow elevation over the baffle has increased with an increase in L/D ratio, while for constant values of Q and L/D ratio, flow elevation has plummeted with an increase in H_s/D . Observations of experiments indicated that baffle-hitting flow accelerated without existence of sump at the base of drop shaft. Then caused to detaching flow and consequently occurrence of cavitation increased.

Keywords: Vortex structure, Energy dissipation, Experimental design, Regression analysis