

Flow Energy Dissipation in Vortex Drop Shaft by Tangential Inlet

AMIN HAJIAHMADI¹, MAHNAZ GHAEINI-HESSAROEYEH^{1*}, MOHAMMAD-JAVAD KHANJANI¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: Feb. 6, 2020- Revised: Sep. 2, 2020- Accepted: Sep. 21, 2020)

ABSTRACT

Vortex drop shafts, with a primary function of dissipating flow energy, are used to transfer flow from higher to lower elevations. In the present research, the physical model of the vortex drop shaft of the eastern Tehran sewage system in Iran are studied and the effects of the inflow Froude number, inlet bottom slope, and the ratio of sump depth to vertical shaft diameter on the flow energy dissipation rate are surveyed. This study was performed with Froude numbers of 1.79, 2.01, 2.18 and 2.31, the inlet bottom slopes of 0.251, 0.4, and 0.571, and the sump depth to vertical shaft diameter ratios of 0, 1, and 2. Accordingly, 36 experiments were designed. For the purpose of increasing accuracy and analysis of results, each experiment is repeated 3 times. Consequently, 108 experiments were done. The results showed that the flow energy is dissipated in the range of 93.7% to 98.5% by changing the parameters. In addition, increasing the inflow Froude number and the sump depth to vertical shaft diameter ratio cause the reduction of the flow energy dissipation rate in the vortex drop shaft by 2.2% and 3%, respectively. Also, increasing the inlet bottom slope increases the flow energy dissipation rate by 2.4%. According to the interaction between the flow energy dissipation and the outflow Froude number, the appropriate sump depth to vertical shaft diameter ratio proposed 0.3-1.2. Furthermore, a nonlinear relationship using the variance analysis was presented to estimate the flow energy dissipation rate.

Keywords: Drop Shaft, Vortex Flow, Energy Dissipation, Analysis of Variance.

استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی با ورودی مماسی

امین حاجی احمدی^۱، مهناز قائینی حصاروئی^{۱*}، محمد جواد خانجانی^۱

۱. بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۳۱)

چکیده

سازه‌ی ریزشی گردابی به منظور انتقال جریان از رقوم بالاتر به رقوم پایین تر به کار می‌رود. استهلاک انرژی جریان از وظایف عمده‌ی این سازه‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی فاضلاب شرق تهران (ایران) مورد بررسی قرار گرفت و میزان تاثیر پارامترهای عدد فرود جریان ورودی، شیب کف سازه ورودی و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم در میزان استهلاک انرژی جریان بررسی گردید. این مطالعه با عدد فرود جریان ورودی برابر ۱/۷۹، ۲/۰۱، ۲/۱۸ و ۲/۳۱ و شیب کف سازه ورودی ۰/۲۵۱، ۰/۴ و ۰/۵۷۱ و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم برابر ۰، ۱ و ۲ انجام شد. به همین منظور ۳۶ حالت آزمایش طراحی گردید. برای افزایش دقت و آنالیز نتایج، هر آزمایش ۳ بار تکرار شد. در نتیجه تعداد کل آزمایش‌ها، ۱۰۸ آزمایش می‌باشد. نتایج نشان داد با تغییر پارامترها، انرژی جریان بین ۹۳/۷ تا ۹۸/۵ درصد مستهلک می‌گردد. با افزایش عدد فرود جریان ورودی و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم میزان استهلاک انرژی به ترتیب ۲/۲ و ۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب کف سازه ورودی میزان استهلاک انرژی جریان ۲/۴ درصد افزایش می‌یابد. با بررسی اثر متقابل استهلاک انرژی جریان و عدد فرود جریان خروجی، نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم مناسب بین ۰/۳ تا ۱/۲ پیشنهاد گردید. علاوه بر این با استفاده از تحلیل واریانس رابطه‌ای غیر خطی برای تخمین میزان استهلاک انرژی جریان ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سازه ریزشی، جریان گردابی، استهلاک انرژی جریان، تحلیل واریانس.

مقدمه

سازه‌های ریزشی به منظور عبور جریان از شیب‌های تند و کاهش انرژی جنبشی جریان استفاده می‌شود (Rajaratnam et al., 1997). از این سازه‌ها در جمع‌آوری آب‌های سطحی، سیستم‌های آبرسانی و نیروگاه‌ها استفاده می‌گردد (Jain and Kennedy, 1983). دو نوع رایج سازه‌های ریزشی شامل سازه‌های سقوط جریان^۱ (Rajaratnam et al., 1997; Granata, 2016) و سازه‌های ریزشی گردابی^۲ (Jain, 1984; Vischer and Hager, 1995) وجود دارد. در سازه‌های سقوط جریان، جریان در شفت قائم به صورت سقوط آزاد و غیرقابل کنترل می‌باشد اما در سازه‌های ریزشی گردابی الگوی جریان پایدار می‌باشد و امکان انتقال جریان در دبی‌های مختلف وجود دارد (Jain, 1984). همچنین در سازه‌های ریزشی گردابی بدلیل وجود اصطکاک بین جریان و دیواره شفت قائم، انرژی بیشتری مستهلک می‌گردد (Zhao et al., 2006). از این رو سازه‌های ریزشی گردابی نسبت به سازه‌های سقوط جریان جهت انتقال و استهلاک جریان پیشنهاد می‌گردد (Hager, 1985).

(1985).

سازه ریزشی گردابی از سه بخش اصلی سازه ورودی، شفت قائم و مخزن مستهلک کننده تشکیل شده است (Hager, 2010). سازه ورودی متداول شامل مماسی، مارپیچی و حلزونی می‌باشد (Mahmoudi-Rad and Khanjani, 2019). جریان سیال تحت تاثیر هندسه خاص سازه ورودی به صورت جریان گردابی درآمده و در طول شفت قائم به جداره چسبیده و به تراز پایین تر انتقال می‌یابد که همین موضوع سبب اتلاف انرژی جریان تا رسیدن به مخزن مستهلک کننده خواهد شد (Zhao et al., 2006). در مخزن مستهلک کننده انرژی باقیمانده جریان مستهلک می‌شود و هوای ورودی به سازه از طریق دریچه هوا از آن خارج می‌شود و در نهایت جریان به تونل خروجی منتقل می‌شود (Vischer and Hager, 1995).

محققین زیادی بر روی سازه‌های ریزشی مطالعاتی را انجام داده‌اند. اولین بار (Drioli (1947) مطالعاتی بر روی ظرفیت انتقال جریان سازه‌های گردابی انجام داد. (Jain and Kennedy (1983) سازه‌های ریزشی گردابی با مقیاس‌های مختلف در فاضلاب شهر

* نویسنده مسئول: mghaeini@uk.ac.ir

^۱ Drop Manhole

^۲ Vortex Drop Shaft

(2019) به بررسی آزمایشگاهی اثر ارتفاع شفت قائم و عمق چاهک پایین دست بر روی عملکرد سازه ریزشی گردابی با ورودی مماسی پرداختند. آنها استهلاک انرژی جریان بین ۸۵-۹۵٪ گزارش کردند. (Fernandes and Jónatas (2019) مشخصات هیدرولیکی شامل سطح آب، سرعت و فشار در سازه ورودی مارپیچی و مخزن مستهلک کننده سازه ریزشی گردابی ارائه کردند. Crispino *et al.* (2019) به صورت آزمایشگاهی بر روی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعه به بررسی حداکثر ارتفاع موج در ورودی و زوایای چرخش جریان در شفت قائم، سطح آب و میزان فشار در مخزن مستهلک کننده پرداخته- اند. آن‌ها حداکثر میزان فشار در کف سازه خروجی در زیر شفت ۰/۱۸ تا ۰/۴ هد جریان گزارش کردند.

به طور کلی می توان گفت تحقیقات قبلی در مورد سازه ریزشی گردابی بر روی استهلاک انرژی جریان متمرکز شده است اما تأثیر متقابل عوامل هیدرولیکی و هندسی بر استهلاک انرژی جریان، مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین رابطه ای بر اساس عوامل هیدرولیکی و هندسی برای محاسبه استهلاک انرژی جریان ارائه نشده است. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده، شیب کف سازه ورودی، فاکتور تاثیرگذار بر ظرفیت انتقال جریان می باشد (Yu and Lee, 2009). از سویی چاهک در مخزن مستهلک کننده در استهلاک انرژی باقیمانده جریان موثر می باشد (Zhao *et al.* 2006). بنابراین از مطالعات قبلی می توان چنین استنباط کرد که در مورد تاثیر همزمان عدد فرود جریان ورودی، شیب کف سازه ورودی و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم بر روی میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی بررسی نشده است.

از این رو، از یک مدل فیزیکی با ورودی مماسی و چاهک در مخزن مستهلک کننده، برای بررسی میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی استفاده گردید. بنابراین در این مطالعه، تاثیر همزمان عدد فرود جریان ورودی (Fr_{in})، شیب کف سازه ورودی (β) و نسبت عمق چاهک مخزن مستهلک کننده به قطر شفت قائم (h_s/D) در میزان استهلاک انرژی جریان سازه ریزشی گردابی ارزیابی شده است. همچنین آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل^۱ طراحی و با استفاده از تحلیل واریانس^۲، رابطه ای برای بیان میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی ارائه گردید.

آنالیز ابعادی

میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی به

میلواکی (ایالت متحده آمریکا) را مورد مطالعه قرار دادند. برخی از این سازه ها دبی ۹۰ متر مکعب بر ثانیه و ارتفاع بیش از ۸۰ متر جریان را انتقال می دهند. ایشان استهلاک انرژی جریان ۹۰٪ را در یک سازه ریزشی گردابی با نسبت ارتفاع به قطر شفت ۱۰۰ و ضریب اصطکاک ۰/۰۳ گزارش کرده اند. (Vischer and Hager (1995) به بررسی سازه ریزشی گردابی در سیستم فاضلاب شهر کربان ایتالیا با ارتفاع ۱۷۰ متر برای دبی ۱۴۰ متر مکعب بر ثانیه پرداخته اند. آن‌ها برای شفت قائم با نسبت ارتفاع به قطر شفت ۵۰ و ضریب اصطکاک ۰/۰۱۲، استهلاک انرژی جریان ۸۵ درصد را گزارش کردند. (Zhao *et al.* (2006) اقدام به بررسی آزمایشگاهی عملکرد سازه ریزشی گردابی با ورودی مماسی و ارتفاع شفت ۲/۷۰ متر کردند. در این تحقیق آزمایش‌هایی جهت بررسی فشار روی دیواره، ضخامت جریان جت حلقوی و اندازه هسته‌ی هوا در طول شفت قائم سازه‌ی ریزشی گردابی انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سازه ریزشی گردابی در ارتفاع کم نیز موجب استهلاک انرژی جریان ۹۰ درصد می شود. (Yu and Lee (2009) با بررسی عملکرد ورودی مماسی بر رفتار جریان در سازه ریزشی گردابی، روش جامعی را برای طراحی این نوع ورودی ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان دادند که در شفت قائم، سطح مقطع هسته هوا با افزایش دبی کاهش می یابد. از این رو نسبت سطح مقطع هسته هوا به سطح مقطع شفت قائم برای دبی طراحی لازم است بزرگ تر یا مساوی با ۰/۲۵ در نظر گرفته شود. (Rhee *et al.* (2018) به بررسی اثر شیب کف کانال ورودی، شیب کف ورودی مارپیچی و دیوار هدایت کننده در هیدرولیک جریان سازه‌های ریزشی گردابی پرداختند. آن‌ها دریافته اند با افزایش شیب کف سازه ورودی سطح آب کاهش یافته و جریان همواری در سازه ورودی ایجاد خواهد شد. آن‌ها پیشنهاد دادند برای جلوگیری از خفگی جریان از دیواره هدایت کننده استفاده گردد. (Pfister *et al.* (2018) بر روی محفظه‌های جمع کننده جهت ادغام شاخه‌های ورودی قبل از سازه ریزشی گردابی مطالعاتی انجام داده اند. نتایج آن‌ها نشان داد برای ایجاد جریان آرام در سازه ورودی برای انتقال حجم کافی از آب، زمان ماندگاری ۱۲ ثانیه برای تخلیه دبی طراحی لازم است. (Liu *et al.* (2018) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی مدل سازه ریزشی گردابی، به بررسی میزان استهلاک انرژی جریان و ضریب تخلیه جریان سازه ورودی با دیواره‌های مورب پرداختند. آنها استهلاک انرژی جریان ۷۲٪ را برای سازه ریزشی گردابی و اطمینان از عدم وقوع کاویتاسیون در شفت قائم را گزارش کردند. (Mahmoudi-Rad and Khanjani

پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بستگی دارد (Jain, 1984). از آنالیز ابعادی برای تعیین رابطه تجربی میزان استهلاک انرژی جریان در سازه های ریزشی گردابی استفاده گردید. براساس مطالعات Zhao et al. (2006) و Yu and Lee (2009) پارامترهای موثر بر رابطه تجربی مفروض است:

(رابطه ۱)

$$\eta = F_1(Q, B, l, e, \theta, \beta, L, D, f, S_t, B_t, h_t, S_s, h_s, B_s, g, \rho, \mu, \sigma)$$

در این رابطه F_1 نماد تابع، Q دبی جریان، B عرض کانال ورودی، l طول ورودی مماسی، e عرض ورودی در محل اتصال سازه ورودی به شفت قائم، θ زاویه تنگ شدگی سازه ورودی مماسی، β زاویه شیب کف ورودی مماسی، L ارتفاع کل شفت قائم، D قطر شفت قائم، f ضریب اصطکاک، S_t طول مخزن مستهلک کننده، h_t ارتفاع مخزن مستهلک کننده، B_t عرض مخزن مستهلک کننده، S_s طول چاهک، h_s عمق چاهک، B_s عرض چاهک، g شتاب گرانش، ρ دانسیته سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی و σ کشش سطحی می باشد. عمق جریان (h) و سرعت جریان (V) در ابتدای ورودی مماسی متغیرهای وابسته می باشد. بنابراین رابطه (۱) را می توان بازنویسی کرد:

(رابطه ۲)

$$\eta = F_2(\theta, \beta, f, \frac{\rho V D_H}{\mu}, \frac{V^2 h \rho}{\sigma}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{B}{D}, \frac{l}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L}{D}, \frac{S_t}{D}, \frac{B_t}{D}, \frac{h_t}{D}, \frac{S_s}{D}, \frac{h_s}{D}, \frac{B_s}{D})$$

که در آن $Fr = V / \sqrt{gh}$ ، $Re = (\rho V D_H) / \mu$ و $W = V^2 h \rho / \sigma$ به ترتیب اعداد رینولدز، فرود و وبر جریان می باشند. در رابطه عدد رینولدز، D_H عمق هیدرولیکی می باشد. براساس مطالعه Mulligan et al. (2016) برای جریان های گردابی اثر ویسکوزیته و کشش سطحی ناچیز بوده و می توان اعداد رینولدز و وبر نادیده گرفت. از طرفی باتوجه به اینکه سایر پارامترها ثابت است می توان نتیجه گرفت:

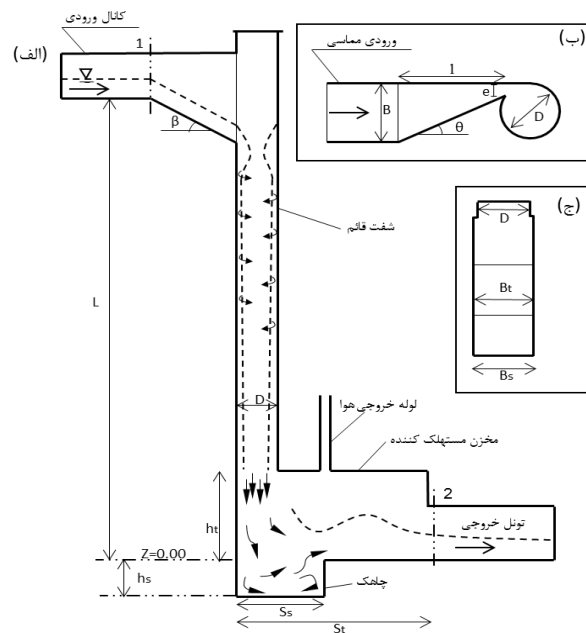
(رابطه ۳)

$$\eta = F_2(Fr_{in}, \beta, \frac{h_s}{D})$$

مدل آزمایشگاهی

آزمایش ها بر روی مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی از شبکه فاضلاب شرق شهر تهران (ایران) در آزمایشگاه سازه های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد (شکل ۱). این مدل با مقیاس ۱:۱۰ و از جنس پلکسی گلاس ساخته شده است.

(د)



شکل ۱- الف) طرح اولیه و نمای جانبی سازه ریزشی گردابی، ب) پلان سازه ورودی مماسی، ج) مقطع مخزن مستهلک کننده و د) مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی شبکه فاضلاب شرق شهر تهران (ایران)

مستطیلی جریان را به سازه ورودی مماسی انتقال می دهد. این کانال به عرض (B) ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۱ متر می باشد. به منظور افزایش پایداری جریان در شفت قائم، لازم است قطر آن

با توجه به شکل (۱) مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی شامل کانال ورودی، سازه ورودی مماسی، شفت قائم، مخزن مستهلک کننده و تونل خروجی می باشد. کانال ورودی با مقطع

۰/۲ متر می باشد. ابعاد چاهک به طول (S_s) ۰/۳۵ متر و عرض (B_s) ۰/۲ متر است. جریان هوای وارد شده از شفت قائم از طریق لوله خروجی هوا که بر روی مخزن مستهلک کننده نصب شده است خارج می گردد. در پایین دست سازه ریزشی گردابی جریان از تونل خروجی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۴ متر خارج می گردد. دبی جریان ورودی به سازه ریزشی گردابی با استفاده از دبی سنج الکترومغناطیس (MFC300) با دقت $\pm 1\%$ اندازه گیری و کنترل شده است. ارتفاع سطح آب در کانال ورودی و سازه ورودی با استفاده از پیژومترهایی کف کانال با دقت ± 1 میلی متر اندازه گیری شده است.

در این مطالعه پارامترهای موثر در میزان استهلاك انرژی جریان (η) شامل: میزان فرود جریان ورودی (Fr_{in})، شیب کف سازه ورودی (β) و نسبت عمق چاهک به قطر مخزن مستهلک کننده (h_s/D) بررسی می گردد. مقدار Fr_{in} برای دبی های ۰/۶۷، ۱/۰۶۷، ۱/۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر ۱/۷۹، ۲/۰۱، ۲/۱۸ و ۲/۳۱ می باشد. مقادیر شیب کف سازه ورودی (β) ۰/۲۵۱، ۰/۴ و ۰/۵۷۱ و مقادیر h_s/D برابر ۰، ۱ و ۲ می باشد.

آزمایش های انجام شده در این تحقیق براساس طرح آزمایش ها^۱ طراحی شد. طرح آزمایش ها با ایجاد تغییرات هدفمند روی یک یا چند عامل، به بررسی اثرات آن ها بر نتایج می پردازد. این روش ها می توانند برای اهداف مختلف از جمله غربالگری عوامل، استخراج مدل رگرسیون و بهینه سازی پاسخ مورد استفاده قرار گیرند. در طرح آزمایش ها از روش فاکتوریل کامل آزمایش ها طرح ریزی شد. به گونه ای که به منظور رسیدن به پاسخ، عوامل به صورت همزمان با هم آزمایش شده و اثرات متقابل نیز در نظر گرفته می شود. (Montgomery, 2013). پارامترهای Fr_{in} ، β و h_s/D به ترتیب دارای ۴، ۳ و ۳ سطح می باشند. تعداد کل حالت های ممکن بین این عوامل 3^3 (۲۷) حالت است. برای افزایش دقت و استفاده از تحلیل واریانس، آزمایش ها با ۳ بار تکرار انجام شد ($3^3=27$).

نتایج و بحث

رفتار جریان در کانال و سازه ورودی مماسی

از وظایف سازه ریزشی ورودی مماسی انتقال جریان به صورت کاملا هموار و بدون پرش هیدرولیکی می باشد. از طرفی سازه های ورودی مماسی برای انتقال جریان فوق بحرانی طراحی و پیشنهاد گردیده است (Yu and Lee, 2009). به همین منظور با ایجاد جریان فوق بحرانی در کانال ورودی وضعیت جریان در سازه

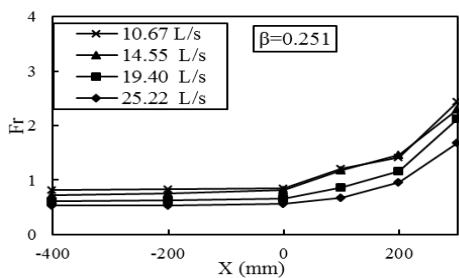
مناسب انتخاب گردد و همچنین دیواره شفت قائم صاف و صیقلی باشد. از طرفی هوادهی در شفت قائم باید به طور کامل و کافی انجام شود تا از نوسانات جریان در آن جلوگیری شود (Jain, 1984). از این رو بر اساس تحقیق Jain (1984) رابطه (۴) به منظور محاسبه قطر شفت قائم براساس دبی طراحی مورد استفاده قرار می گیرد:

$$D = K \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در این معادله Q_d دبی طراحی، K ضریب ایمنی طراحی و g شتاب گرانش می باشد. برای ورودی مماسی، (Jain 1984) $K=1$ ، $K=1/25$ Hager (1990) و $K=1/16$ Zhao et al. (2006). Hager (1990) دلیل پیشنهاد خود را طراحی کارآمد هیدرولیکی و اقتصادی سازه بیان کرد. از این رو در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن $K=1/22$ ، برای دبی طراحی ۱۹/۴ لیتر بر ثانیه، مقدار قطر شفت قائم ۰/۱۶ متر محاسبه شده است. ارتفاع کلی شفت قائم (L) از کف کانال ورودی تا کف تونل خروجی ۲/۰۸ متر می باشد. برای ایجاد جریان پایدار و هموار در ورودی مماسی و ایجاد هسته ای هوا با اندازه مناسب، بهتر است نسبت عرض ورودی در محل اتصال به شفت قائم (e) به قطر شفت قائم (D) بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ باشد. همچنین مقدار e نمی تواند خیلی کوچک در نظر گرفته شود زیرا در این صورت شرایط لازم برای ایجاد جریان چرخشی در شفت قائم ایجاد نمی شود (Yu and Lee, 2009). از این رو عرض ورودی در محل اتصال به شفت قائم ۰/۰۴ متر می باشد. طول ورودی مماسی (l) با توجه به موقعیت مکانی شفت قائم برابر ۰/۳۵ متر می باشد. (شکل ۱ ب). زاویه تنگ شونده در ورودی مماسی (θ) با توجه به مقدار l و e برابر ۲۴/۵۷ درجه است. پس از شفت قائم جریان مخلوط آب و هوا به مخزن مستهلک کننده رسیده و سپس وارد تونل پایین دست می شود. مخزن مستهلک کننده وظیفه استهلاك انرژی باقی مانده جریان خروجی از شفت قائم، جداسازی حباب های درون جریان، کاهش فشار کف مخزن مستهلک کننده ناشی از سقوط جریان از شفت قائم و ایجاد جریان زیر بحرانی و هدایت آن به کانال پایین دست را دارد (Hager and Kellenberger, 1987). به همین منظور از چاهک برای کمک به مخزن مستهلک کننده برای کاهش فشار و ایجاد جریان زیر بحرانی در تونل خروجی استفاده می گردد (Zhao et al., 2001). ابعاد هندسی مخزن مستهلک کننده براساس مطالعات Hager (2010) انتخاب گردید. مخزن مستهلک کننده به طول (S_t) ۰/۷۶ متر، ارتفاع (h_t) ۰/۳۵ متر و عرض (B_t)

خواهد شد که نتیجه آن بالا آمدن سطح آزاد جریان و ایجاد جریان زیربحرانی در سازه ورودی خواهد شد. همچنین کاهش شیب کف سازه ورودی باعث کاهش ظرفیت انتقال جریان و ایجاد محدودیت ارتفاعی در کانال ورودی خواهد شد. بنابراین سازه ورودی در شیب ۰/۵۷۱ کارایی بهتری در انتقال جریان دارد. با توجه به وجود جریان فوق بحرانی در کانال ورودی این کاهش شیب باعث بوجود آمدن پرش هیدرولیکی در کانال ورودی در بالادست می‌گردد. تشابه روند تغییرات سطح آزاد جریان و پروفیل عدد فرود جریان با مطالعات Yu and Lee, (2009) نشان‌دهنده صحت نتایج به دست آمده می‌باشد.

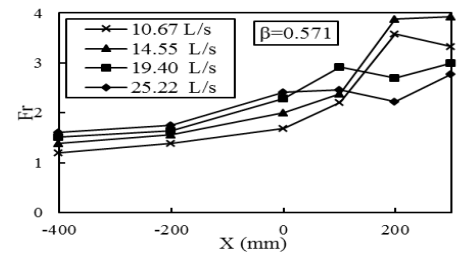
پروفیل عدد فرود در شکل (۳) نشان می‌دهد در سازه‌ی ورودی مماسی برای دبی‌های کم، نقطه کنترل جریان در ابتدای ورودی مماسی می‌باشد. در دبی‌های زیاد، نقطه کنترل به پایان پایین دست ورودی مماسی و در محل تقاطع آن با شفت قائم منتقل می‌شود. این روند با کاهش شیب کف سازه ورودی تشدید خواهد شد. به گونه‌ای که برای شیب ۰/۲۵۱ در همه دبی‌ها مقطع کنترل در محل اتصال سازه ورودی به شفت قائم قرار دارد.



(الف)



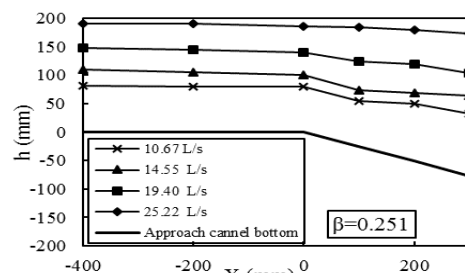
(ب)



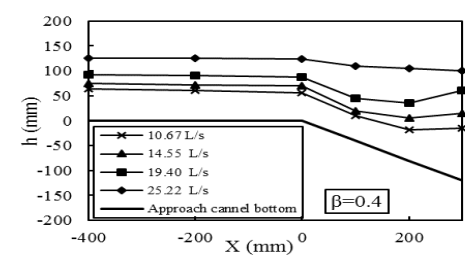
(ج)

شکل ۳ - پروفیل عدد فرود جریان در کانال ورودی و سازه ورودی (الف) $\beta=0/251$ (ب) $\beta=0/4$ (ج) $\beta=0/571$

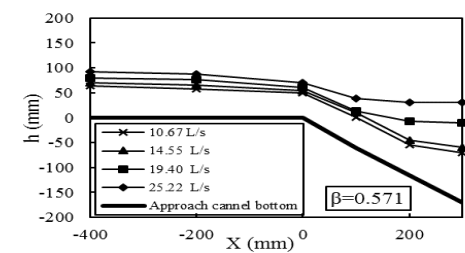
ورودی بررسی گردید. در شکل‌های (۲) و (۳) پروفیل‌های سطح آزاد و عدد فرود جریان در سازه ورودی مماسی برای سه شیب ۰/۲۵۱، ۰/۴، و ۰/۵۷۱ و دبی جریان ورودی ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، پروفیل سطح آزاد جریان در سازه ورودی و کانال ورودی هموار بوده و پرش هیدرولیکی تشکیل نمی‌گردد و برای هر شیب کف سازه ورودی مشاهده می‌گردد که در هر نقطه از کانال و سازه ورودی، ارتفاع سطح آزاد جریان با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. از طرفی با کاهش شیب در کف سازه ورودی روند افزایش پروفیل سطح آزاد جریان بیشتر خواهد شد. در شکل (۳-ج) مشاهده می‌گردد که جریان در شیب ۰/۵۷۱ برای همه دبی‌ها به صورت فوق بحرانی می‌باشد. اما در شیب ۰/۲۵۱ جریان در سازه ورودی و کانال ورودی به صورت زیربحرانی است، هر چند در محل ورود جریان به شفت قائم جریان فوق بحرانی می‌شود. شیب ۰/۴ یک حالت میانی می‌باشد به گونه‌ای که برای دبی‌های کم جریان فوق بحرانی و برای دبی‌های زیاد، جریان زیربحرانی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد سازه ورودی مماسی در شیب‌های کم کف سازه ورودی باعث پس‌زدگی جریان



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ - پروفیل سطح آزاد جریان در کانال ورودی و سازه ورودی (الف) $\beta=0/251$ (ب) $\beta=0/4$ (ج) $\beta=0/571$



شکل ۴- نمای جانبی جریان در سازه ورودی برای دبی (الف) ۱۹/۴ L/s (ب) $\beta=0/251$ (ج) $\beta=0/571$

شکل (۴) وضعیت جریان در سازه ورودی برای دبی طراحی (۱۹/۴ L/s) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با کاهش شیب کف سازه ورودی (β) سطح آزاد جریان افزایش می‌یابد.

گردابی استفاده گردید.

$$\eta = \Delta H / H_0 \times 100 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که ΔH اختلاف هد کل انرژی بین مقاطع در بالادست و پایین دست، H_0 هد کل انرژی در مقطع بالادست می‌باشد. با توجه به شکل (۱)، هد کل انرژی در ابتدای سازه ورودی (مقطع ۱: $Z/D=13$) و انتهای مخزن مستهلک کننده (مقطع ۲: $Z/D=0$) برداشت گردید. مقادیر هد کل انرژی در مقطع ۱ و ۲ با استفاده از پیژومترهای نصب شده اندازه گیری شد. نتایج حاصل از اندازه گیری و محاسبه میزان استهلاک انرژی جریان سازه ریزشی گردابی با تغییر پارامترهای Fr_{in} ، β و h_s/D در جدول (۱) برای ۱۰۸ آزمایش ارائه شده است.

استهلاک انرژی جریان سازه ریزشی گردابی
میزان انرژی در جریان های روباز براساس هد انرژی در هر نقطه از جریان تعیین می‌گردد. هد کل انرژی در هر مقطع از جریان به کمک معادله برنولی ($H = h + V^2 / (2g) + Z$) محاسبه می‌گردد. در این معادله h عمق جریان، V سرعت جریان، g شتاب ثقل و Z ارتفاع از سطح مبنا (کف کانال خروجی) است. از این رو بر اساس مطالعات (Granata (2016) و Hager (2010)، از رابطه ۵ به منظور محاسبه نرخ استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی

جدول ۱- میزان استهلاک انرژی (درصد) در سازه ریزشی گردابی

									Fr_{in}
β									
۰/۵۷۱			۰/۴			۰/۲۵۱			
h_s/D			h_s/D			h_s/D			
۲	۱	۰	۲	۱	۰	۲	۱	۰	
۹۷/۳۷	۹۷/۸۹	۹۸/۵۰	۹۶/۰۷	۹۶/۷۷	۹۸/۳۱	۹۵/۰۰	۹۵/۹۷	۹۷/۶۸	
۹۷/۴۱	۹۷/۸۴	۹۸/۴۷	۹۶/۱۱	۹۶/۷۷	۹۸/۳۶	۹۵/۰۱	۹۵/۹۵	۹۷/۷۰	۱/۷۹
۹۷/۳۶	۹۷/۸۸	۹۸/۵۰	۹۶/۰۹	۹۶/۷۶	۹۸/۳۳	۹۴/۹۷	۹۵/۹۵	۹۷/۷۲	
۹۷/۰۵	۹۷/۲۴	۹۸/۳۱	۹۵/۶۳	۹۶/۵۱	۹۸/۱۹	۹۴/۷۲	۹۵/۵۰	۹۷/۴۸	
۹۷/۰۵	۹۷/۲۲	۹۸/۳۹	۹۵/۶۳	۹۶/۴۶	۹۸/۲۳	۹۴/۷۶	۹۵/۵۴	۹۷/۵۴	۲/۰۱
۹۷/۰۳	۹۷/۲۴	۹۸/۳۰	۹۵/۶۳	۹۶/۵۰	۹۸/۱۷	۹۴/۷۳	۹۵/۴۸	۹۷/۴۸	
۹۵/۹۸	۹۶/۶۴	۹۸/۰۸	۹۵/۱۶	۹۶/۰۳	۹۷/۷۹	۹۴/۳۷	۹۵/۰۹	۹۷/۰۳	
۹۶/۰۲	۹۶/۶۱	۹۸/۰۹	۹۵/۱۱	۹۶/۰۸	۹۷/۷۷	۹۴/۴۱	۹۵/۰۸	۹۷/۰۸	۲/۱۸
۹۶/۰۰	۹۶/۶۳	۹۸/۰۹	۹۵/۱۴	۹۶/۰۳	۹۷/۷۸	۹۴/۳۷	۹۵/۰۹	۹۷/۰۵	
۹۵/۵۳	۹۵/۶۷	۹۷/۸۶	۹۴/۲۸	۹۵/۴۶	۹۷/۶۰	۹۳/۷۳	۹۴/۶۱	۹۶/۴۷	
۹۵/۵۸	۹۵/۷۱	۹۷/۸۶	۹۴/۲۵	۹۵/۴۱	۹۷/۶۰	۹۳/۶۸	۹۴/۵۸	۹۶/۴۴	۲/۳۱
۹۵/۵۲	۹۵/۶۶	۹۷/۸۸	۹۴/۳۰	۹۵/۴۵	۹۷/۶۰	۹۳/۷۲	۹۴/۶۳	۹۶/۴۶	

میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. از این رو نتایج نشان می‌دهد که میزان استهلاک انرژی جریان تابعی از شیب کف سازه ورودی (β) می‌باشد. بیشترین مقدار استهلاک انرژی جریان در

باتوجه به نتایج جدول (۱) میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی با افزایش Fr_{in} ، کاهش می‌یابد. این مقادیر از ۹۳/۶۸ تا ۹۸/۵۰ درصد متغیر می‌باشد. همچنین با کاهش β

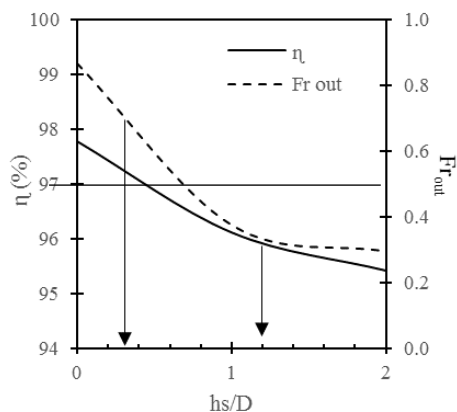
دست سازه مستهلک کننده می‌باشد. این سازه باعث افزایش سطح آزاد جریان در پایین دست سازه می‌شود و به دنبال آن میزان استهلاک انرژی جریان کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از تغییر نسبت عمق چاهک به شفت قائم (h_s/D) در جدول (۱) نشان می‌دهد که با افزایش h_s/D از میزان استهلاک انرژی جریان کاسته می‌شود به گونه‌ای که روند کاهش h_s/D در محدوده ۰ تا ۱ نسبت به محدوده ۱ تا ۲ بیشتر است. روند کاهش استهلاک انرژی جریان محدوده ۱ تا ۲ نسبتاً کم بوده و تقریباً میزان استهلاک انرژی جریان ثابت می‌باشد. از وظایف چاهک ایجاد جریان زیربحرانی در پایین دست سازه ریزشی گردابی می‌باشد. از این رو میزان عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) با تغییر پارامترهای Fr_{in} ، β و h_s/D در جدول (۲) ارائه گردید.

شیب ۰/۵۷۱ رخ می‌دهد، به گونه‌ای که جریان در سازه ورودی در شیب ۰/۵۷۱ به صورت فوق بحرانی می‌باشد (شکل ۳) که با نتایج (2009) Yu and Lee که مطرح کردند، سازه ورودی مماسی برای انتقال جریان های فوق بحرانی مناسب می‌باشد، هم خوانی دارد. با کاهش شیب کف سازه ورودی میزان استهلاک انرژی جریان کاسته می‌شود. همچنین نتیجه عملکرد نامناسب سازه ورودی در شیب ۰/۲۵۱ در شکل (۲) بر روی جریان سطح آزاد جریان مشاهده گردید که باعث افزایش سطح جریان و کاهش عدد فرود در سازه ورودی مماسی شد. Mahmoudi-Rad and Khanjani (2019) میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی بین ۸۵ تا ۹۵ درصد را گزارش کردند. علت کاهش میزان استهلاک انرژی در تحقیق آن‌ها استفاده از سازه بافل در پایین

جدول ۲- میزان عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) از سازه ریزشی گردابی

Fr_{in}	β									
	۰/۵۷۱			۰/۴			۰/۲۵۱			
	h_s/D			h_s/D			h_s/D			
	۲	۱	۰	۲	۱	۰	۲	۱	۰	
۱/۷۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۹۴	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۷۹	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۴۸	
۲/۰۱	۰/۴۶	۰/۵۱	۱/۰۸	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۵۷	
۲/۱۸	۰/۵۰	۰/۵۶	۱/۱۸	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۹۳	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۵۸	
۲/۳۱	۰/۵۵	۰/۶۲	۱/۲۹	۰/۳۱	۰/۴۰	۱/۰۴	۰/۲۴	۰/۳۰	۰/۶۰	

فرود جریان خروجی تغییری نمی‌کند و به منظور جلوگیری از کاهش بیشتر استهلاک انرژی جریان، این مقدار به عنوان بیشترین h_s/D انتخاب گردید. بنابراین نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم مناسب بین ۰/۳ تا ۱/۲ پیشنهاد می‌گردد.



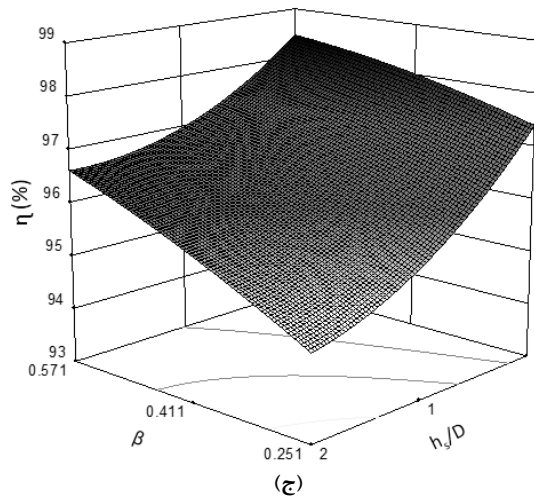
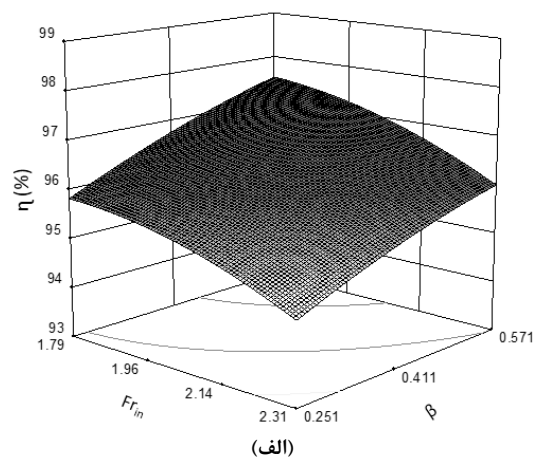
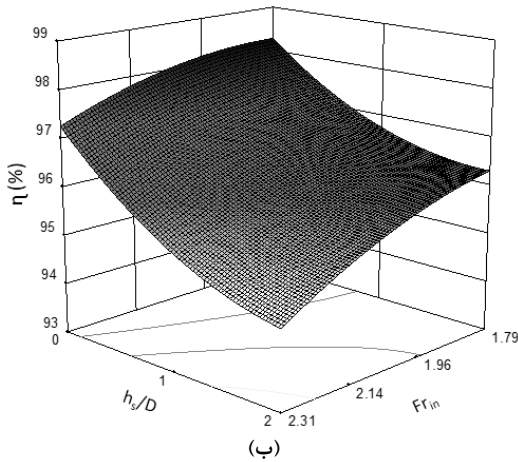
شکل ۵- تاثیر نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (h_s/D) بر میزان استهلاک انرژی جریان (η) و عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out})

Zhao et al. (2001) پیشنهاد دادند که از چاهک با h_s/D بین ۰/۷ تا ۱ استفاده گردد. همچنین Mahmoudi-Rad and

در جدول (۲) مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد جریان ورودی (Fr_{in})، عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب کف سازه ورودی (β) مقدار Fr_{out} افزایش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (h_s/D) در همه حالات عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) کاهش می‌یابد که عملکرد مناسب چاهک را نشان می‌دهد. این روند کاهش محدود ۱ تا ۲ تقریباً ثابت است. به همین منظور برای تعیین h_s/D مناسب، با در نظر گرفتن همزمان متوسط مقادیر استهلاک انرژی جریان و عدد فرود جریان خروجی، شکل (۵) ارائه گردیده است. عدد فرود جریان خروجی در حالت $h_s/D=0$ در بیشترین مقدار و نزدیک به عمق بحرانی است. براساس استاندارد (2016) NWW^۱، حداکثر سرعت مجاز برای مجاری فاضلاب و جمع‌آوری آب‌های سطحی ۴/۵ متر بر ثانیه می‌باشد که در این مطالعه براساس دبی های جریان، بیشترین عدد فرود مجاز جریان خروجی از مخزن مستهلک کننده برابر ۰/۷۲ محاسبه گردید. از این رو این مقدار بر روی شکل (۵) به عنوان محدود کننده در نظر گرفته شد. در شکل (۵) مقدار $Fr_{out}=0/72$ مقدار $h_s/D=0/3$ را نشان می‌دهد. از سویی بعد از $h_s/D=1/2$ عدد

(۶) ارائه گردیده است. در شکل (۶-الف) با کاهش شیب کف سازه ورودی (β) و افزایش عدد فرود جریان ورودی (Fr_{in}) میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. در شکل (۶-ب) با افزایش نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (h_s/D) و کاهش شیب کف سازه ورودی (β) میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. در شکل (۶-ج) با افزایش نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (h_s/D) و افزایش عدد فرود جریان ورودی (Fr_{in}) میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد.

(Khanjani, 2019) استفاده از چاهک با h_s/D بین ۱ تا ۱/۶ را توصیه کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر استفاده از چاهک از سازه بافل برای استهلاک انرژی جریان در مخزن مستهلک کننده استفاده کرده‌اند که همین مسئله باعث افزایش عمق چاهک پیشنهادی آنان شد. همچنین در مطالعات پیشین تاثیر عدد فرود جریان خروجی در انتخاب عمق مناسب چاهک در نظر گرفته نشده است. برای درک بهتر روند تاثیر متقابل پارامترهای Fr_{in} ، β و h_s/D در میزان استهلاک انرژی جریان سازه ریزشی گردابی شکل



شکل ۶- اثر متقابل پارامترهای Fr_{in} ، β و h_s/D در میزان استهلاک انرژی جریان سازه ریزشی گردابی (الف) ($h_s/D=1$) (ب) $Fr_{in}=2/18$ (ج) $\beta=0/4$

(Montgomery, 2013). از این رو به بررسی ارتباط بین پارامترهای Fr_{in} ، h_s/D و β با استفاده از روش تحلیل واریانس و نرم افزار Design Expert 10 پرداخته شده است. باتوجه به روند تغییرات پارامترهای Fr_{in} ، h_s/D و β در شکل (۶) (غیرخطی بودن)، مدل اولیه پیشنهادی برای تخمین نرخ استهلاک انرژی، بصورت درجه دو انتخاب گردید. از این رو مدل اولیه میزان استهلاک انرژی در سازه‌ی ریزشی گردابی به صورت زیر استفاده

تحلیل واریانس از روش‌های آماری در تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و بیان ارتباط بین آن‌ها استفاده می‌گردد. یکی از این روش‌های آماری تحلیل واریانس می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان با تولید رگرسیون داده‌ها و بررسی خطاها نسبت به ارائه یک مدل خطی، درجه یک، درجه دو و درجه سه اقدام نمود. همچنین در این روش اثر متقابل پارامترها برهم سنجیده خواهد شد

شد:

(رابطه ۶)

$$\eta = a_0 + a_1 (Fr_{in}) + a_2 (h_s / D) + a_3 (\beta) + a_4 (Fr_{in})(h_s / D) + a_5 (Fr_{in})(\beta) + a_6 (h_s / D)(\beta) + a_7 (Fr_{in})^2 + a_8 (h_s / D)^2 + a_9 (\beta)^2$$

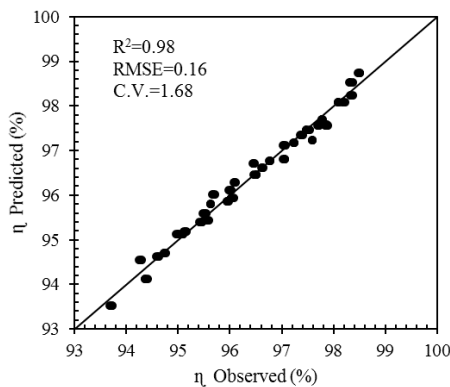
در این معادله، a_0 تا a_9 ضرایب برآورد شده با استفاده از روش حداقل مربعات می‌باشند. براساس داده‌های جدول (۱) ارزیابی مدل برازش شده به روش تحلیل واریانس انجام شد و مقادیر ضرایب a_0 تا a_9 برای هر نرخ استهلاك انرژی برآورد گردید.

معنی‌دار بودن مدل و اثر جملات آن از نظر آماری، با استفاده از شاخص p-value تعیین می‌گردد. از این‌رو پارامترهایی با p-value کوچکتر از ۰/۰۵ در مدل نهایی باقی خواهند ماند. P-value های کوچکتر اهمیت نتایج آماری را بیشتر خواهند کرد (Montgomery, 2013). با توجه به نتایج جدول (۳) مشاهده می‌گردد که همه پارامترها مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ می‌باشند و تاثیر پارامترهای Fr_{in} ، h_s/D و β در میزان استهلاك انرژی جریان را تایید می‌کند.

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس در نرم‌افزار Design Expert 10

p-value Prob > F	F- Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Coefficient Estimate	Source
<0.0001	652/63	20/41	9	183/67	-	Model
-	-	-	-	-	81/57	Intercept
<0.0001	912/38	28/53	1	28/53	15/17	Fr:A
<0.0001	1365/96	42/71	1	42/71	10/98	β :B
<0.0001	3071/14	96/03	1	96/03	-1/32	h_s/D :C
<0.0073	7/51	0/23	1	0/23	-1/83	AB
<0.0001	45/48	1/42	1	1/42	-0/72	AC
<0.0001	104/46	3/27	1	3/27	1/63	BC
<0.0001	48/15	1/51	1	1/51	-3/98	A^2
<0.0008	11/86	0/37	1	0/37	-4/88	B^2
<0.0001	181/21	5/67	1	5/67	0/48	C^2
-	-	0/31	98	3/06	-	Residual

آزمایشگاهی ۰/۱۶ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از رابطه (۷) است. کواریانس (C.V.) شاخصی برای تعیین پراکندگی متغیرها است. در واقع کواریانس انحراف از میانگین را نشان می‌دهد. کواریانس مناسب برای داده‌های آماری نزدیک صفر خواهد بود که با توجه به $C.V.=1/68$ ، پایین بودن این مقدار نشان‌دهنده پراکندگی مناسب داده‌های آماری این مطالعه می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده میزان استهلاك انرژی جریان

بنابراین رابطه نهایی، براساس شاخص‌های آماری برای تعیین میزان استهلاك انرژی در سازه ریزشی گردابی تعیین گردید:

(رابطه ۷)

$$\eta = 81.57 + 15.17(Fr) + 10.98(\beta) - 1.32(h_s / D) - 1.83(Fr)(\beta) - 0.72(Fr)(h_s / D) + 1.63(\beta)(h_s / D) - 3.98(Fr)^2 - 4.88(\beta)^2 + 0.48(h_s / D)^2$$

به‌منظور بررسی کیفیت مدل ارائه شده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)، و کواریانس (C.V.) استفاده گردید. مقدار $R^2=0/98$ که ضریب همبستگی می‌باشد، نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل نهایی برازش داده شده با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد که در شکل (۷) نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده می‌گردد. نتایج حاصل برازش داده‌های آزمایشگاهی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی رابطه (۷) نشان می‌دهد که با توجه به پراکندگی نقاط در نزدیکی خط قطری می‌توان نتیجه گرفت مدل نهایی با داده‌های آزمایشگاهی سازگاری مناسبی دارد. مقدار RMSE برای نتایج بدست آمده از رابطه (۷) با نتایج

افزایش می‌یابد. افزایش h_s/D باعث کاهش میزان استهلاک انرژی جریان و عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) گردید. از این رو با بررسی اثر متقابل استهلاک انرژی جریان و عدد فرود جریان خروجی (Fr_{out}) نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم مناسب (h_s/D) بین $0/3$ تا $1/2$ پیشنهاد می‌گردد. همچنین مدل غیرخطی برای تعیین میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی با $R^2=0/98$ ارائه شده است.

سپاس‌گزاری

تحقیق حاضر با کمک‌های مالی (۹۵/۱۰۰/۵۸۵) شرکت فاضلاب تهران (ایران) انجام گرفت. نویسندگان این مقاله از همکاری دانشگاه شهید باهنر کرمان در انجام این تحقیق کمال تشکر را دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از مدل آزمایشگاهی میزان استهلاک انرژی جریان (η) در سازه ریزشی گردابی بررسی شد. در آزمایش‌های انجام شده میزان تاثیر عدد فرود جریان ورودی (Fr_{in})، شیب کف سازه ورودی (β) و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (h_s/D) در میزان استهلاک انرژی جریان سنجیده شد. به‌همین منظور با ترکیب این پارامترها تعداد ۱۰۸ آزمایش با ۳ بار تکرار، آزمایش انجام شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد، افزایش Fr_{in} و کاهش β باعث افزایش سطح آزاد جریان در کانال بالادست شده و عدد فرود جریان در کانال بالادست از فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌کند. بنابراین سازه ورودی در شیب‌های زیاد ($0/571$) کارایی مناسب برای انتقال جریان را دارد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش Fr_{in} میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی کاهش می‌یابد. این مقادیر از $93/7$ تا $98/5$ درصد متغیر می‌باشد. با افزایش β میزان استهلاک انرژی جریان

REFERENCES

- Crispino, G., Pfister, M. & Gissoni, C., (2019). Hydraulic design aspects for supercritical flow in vortex drop shafts, *Urban Water Journal*, 16(3): 225-234.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648531>
- Drioli, C. (1947). Su un particolare tipo di imbocco per pozzi di scarico (scaricatore idraulico a vortice). *L'Energia Elettrica* 24 (10): 447-452. (In Italian)
- Fernandes, J., Jónatas, R., (2019). Experimental flow characterization in a spiral vortex drop shaft. *Water Science and Technology*, 80 (2): 274-281.
<https://doi.org/10.2166/wst.2019.274>
- Granata, F. (2016). Dropshaft cascades in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 73 (9): 2052-2059.
<https://doi.org/10.2166/wst.2016.051>
- Hager, W. H. (1985). Head-discharge relation for vortex shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (6), 1015-1020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:6\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:6(1015))
- Hager, W.H., Kellenberger, M.H. (1987). Die Dimensionierung des Wirbelfallschachtes (The design of the vortex drop). *gwf - Wasser/Abwasser* 128(11): 585-590. (in German)
- Hager, W. H. (1990). Vortex drop inlet for supercritical approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116 (8): 1048-1054.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:8\(1048\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:8(1048))
- Hager, W. H. (2010). *Wastewater hydraulics: Theory and practice*. New York: Springer.
<https://www.springer.com/gp/book/9783642113826>
- Jain, S. C. (1984). Tangential vortex-inlet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (12): 1693-1699.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1693))
- Jain, S. C., and J. F. Kennedy. (1983). Vortex-flow dropstructures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District inline storage system. *IIHR Rep.* No. 264. Iowa City, IA: Univ. of Iowa.
- Liu, Z.-P., X.-L. Guo, Q.-F. Xia, H. Fu, T. Wang, and X.-L. Dong. (2018). Experimental and numerical investigation of flow in a newly developed vortex drop shaft spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144 (5): 04018014.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001444](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001444)
- Mahmoudi-Rad, M., Khanjani, M. J., (2019). Energy Dissipation of Flow in the Vortex Structure: Experimental Investigation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(4): 040190271-0401902716.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000398)
- Ministry of energy, (2016). Principles and Criteria for designing Wastewater Networks and storm-sewer, *Standard Department of National Water & Wastewater Engineering Company(NWW)*, Journal 116, Iran. (in Farsi) <https://seso.moe.gov.ir>
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/ep.11743>
- Mulligan, S., Casserly, J., & Sherlock, R. (2016). Effects of geometry on strong free-surface vortices in subcritical approach flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016051.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001194)
- Pfister, M., Crispino, G., Fuchsmann, T., Ribl, J., M.,

- and Gisonni, C., (2018). Multiple Inflow Branches at Supercritical-Type Vortex Drop Shaft, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(11): 050180081-050180089.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001530)
- Rajaratnam, N., Mainali, A., Hsung, C.Y. (1997). Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems. *J. Envir. Eng.* 123(5), 486–491.
- Rhee, D. S., Park, Y. S., & Park, I. (2018). Effects of the bottom slope and guiding wall length on the performance of a vortex drop inlet. *Water Science and Technology*, 78(6): 1287–1295.
<https://doi.org/10.2166/wst.2018.397>
- Vischer, D. L., and W. H. Hager. (1995). *Vortex drops. Chap. 9 in Energy dissipators: Hydraulic structures design manual*, 167–181. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Yu, D., and J. H. W. Lee. (2009). Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage. *Journal of Hydraulic Engineering*. 135 (3): 164–174.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(164))
- Zhao, C. H., S. K. Sun, and Z. P. Liu. (2001). Optimal study on the depth of stilling well for rotation-flow shaft flood-releasing tunnel. *Water Power*, 2001(5): 30–33. (In Chinese)
- Zhao, C.-H., D. Z. Zhu, S.-K. Sun, and Z.-P. Liu. (2006). Experimental study of flow in a vortex drop shaft.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (1): 61–68.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:1\(61\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(61))