

Research Article

Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet

Saeed Akbari Zade¹, Ehsan Fadaei-Kermani ², Mahnaz Ghaeini-Hessaroeeyeh³ 

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

(✉ Corresponding Author: e.fadaei@uk.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 11 September 2025

Revised: 8 October 2025

Accepted: 30 December 2025

Available Online: 24 January 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Akbari Zade, S., Fadaei Kermani, E., Ghaeini Hesaroeeyeh, M., (2025). Experimental Investigation of the Energy Dissipation Efficiency of a Vortex Drop Shaft with a Spiral Inlet. V.26, No.99, P: 17-33
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370674.1630>

Extended Abstract**Introduction**

Urban sewage collection systems in areas with rugged topography present significant hydraulic challenges. Steep slopes and substantial elevation differences generate high kinetic energy in the flow. Without proper control, this excess energy leads to adverse consequences, including erosion and degradation of the channel bed and walls. Further issues may involve structural damage and vibrations induced by high-energy flow, the entrainment of large volumes of air due to free-falling sewage, and the potential for water hammer in closed systems. To address these challenges, vortex drop structures have been introduced as an efficient engineering solution. These structures establish a controlled vortex flow pattern within a vertical shaft, thereby dissipating the incoming flow's excess energy in an effective and manageable manner.

Methodology

In the present study, a physical model of a vortex drop structure was constructed to investigate its hydraulic performance, including the spiral inlet and the shaft. Furthermore, since the structure's performance in flow energy dissipation is significantly influenced by the upstream and downstream hydraulic conditions and geometry, the rate of flow energy dissipation by the structure was measured.

A 1:10 scale physical model of the East Tehran Sewer Vortex Drop Structure was constructed in the Hydraulic Structures Laboratory of Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. The model comprises a rectangular approach channel, a tangential vortex inlet, a drop shaft, an energy dissipator, and a rectangular outlet conduit. In this study, a spiral inlet with different outlet diameters was employed. The inlet channel, with a rectangular cross-section, conveys the flow to the tangential inlet structure. This channel measures 0.18 m in width (B) and 0.21 m in height. Downstream of the vortex drop structure, the flow exits via a rectangular outlet conduit measuring 0.18 m in width and 0.24 m in height.

The model begins with an initial reservoir; upon filling, water enters the structure through the inlet channel. The wall height of the inlet channel is 0.24 m. Four different flow rates were used in this experiment: 10.67, 14.55, 19.40, and 25.22 liters per second, respectively.

Results and Discussion

In the present study, the flow behavior within different sections of the vortex drop structure, including the inlet channel, the spiral inlet structure, and the outlet channel (energy dissipator), was investigated. Subsequently, the influence of three parameters including: flow rate (Q), inlet structure diameter (d), and the ratio of sump depth to shaft diameter (H_s/D) on the energy dissipation efficiency (EDE) was examined. The

effect of these parameters was evaluated in three stages: first, each parameter was assessed individually, then in pairwise combinations, and finally all three parameters were evaluated together.

The results indicate that flow rate had the greatest influence on EDE. The highest efficiency (92.79%) occurred at a flow rate of 10.67 L/s, while the lowest (88.93%) corresponded to 25.22 L/s. Consequently, EDE was found to decrease with increasing flow rate.

The simultaneous effect of all three parameters (diameter, flow rate, and sump depth) on energy dissipation efficiency shows that, for a 12 cm diameter and a flow rate of 10.67 L/s, the highest efficiency of 94.59% corresponds to $H_s/D=1$. For the same diameter and a flow rate of 25.22 L/s, the highest efficiency is 88.92% for $H_s/D=1$. For a 16 cm diameter and a flow rate of 10.67 L/s, the highest efficiency is 94.08% for $H_s/D=1$. For this same diameter and a flow rate of 25.22 L/s, the highest efficiency is 90.35% for $H_s/D=2$.

Conclusions

In the present research, a physical model of a sewer vortex drop shaft with a spiral inlet was investigated in the Hydraulic Structures Laboratory at Shahid Bahonar University of Kerman. This study examined the effect of three parameters including discharge (Q), the diameter of the inlet structure (d) and the ratio of the depth of sump to the drop shaft diameter (H_s/D) on energy dissipation efficiency (EDE). Separate analysis of the individual parameters revealed that the influence of flow discharge (Q) on EDE was greater than that of the other two parameters (diameter and sump depth ratio), accounting for 79.92% of the effect. The two-parameter analysis concerning the interaction of diameter and discharge on EDE showed that at a discharge of $Q=10.67$ L/s, the highest EDE (93.15%) was achieved with a 12 cm diameter. Furthermore, when the discharge increased to $Q=25.22$ L/s, the maximum EDE (89.25%) was recorded for the 16 cm diameter. Regarding the combined effect of diameter and sump depth ratio on EDE, the results indicated that for a 12 cm diameter, the peak EDE (92.21%) occurred when $H_s/D=1$, meaning the sump depth was equal to the drop shaft diameter.

The results of this study confirm that all three parameters—flow discharge, inlet diameter, and sump depth—affect the energy dissipation efficiency (EDE), with flow discharge exerting the greatest influence. Future work should investigate the effect of other geometric parameters of the spiral inlet, particularly the slope of the inlet channel bed and the slope of the inlet structure itself, on the EDE of vortex drop shafts.

Keywords: Energy dissipation efficiency, Discharge, Vortex drop structure, Laboratory model, Spiral inlet.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants of the present study, especially the civil engineering department of the Shahid Bahonar University of Kerman which made this research possible.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by E. F.K. and all authors commented on previous versions of the manuscript (S. A.Z., E. F.K., and M. Gh.H.). The final revisions have been applied by E. F.K., and M. Gh.H. Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.



نوع مقاله: پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی کارایی سازه ریزشی گردابی با ورودی مارپیچی

سعید اکبری زاده^۱، احسان فدائی کرمانی^۲✉، مهناز قائینی حصاروئی^۳id

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

چکیده:

شیب‌های تند و تغییرات ارتفاعی شدید موجب بروز مشکلاتی برای مجاری فاضلاب یا کانال‌های رو باز می‌شود. در اثر تغییر ارتفاع، سرعت جریان در این سازه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باعث بروز مشکلات عدیده‌ای در مسیر انتقال می‌گردد. برای انتقال سیال در شرایط ذکر شده از سازه‌هایی با نام سازه‌های ریزشی گردابی استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، مدل فیزیکی سازه گردابه فاضلاب شرق تهران با ورودی مارپیچی در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان بررسی گردید. در این پژوهش، تاثیر سه پارامتر دبی جریان (Q)، قطر سازه ورودی به شفت قائم (d) و نسبت عمق چاهک به قطر شفت ریزشی (Hs/D) بر بازده اتلاف انرژی بررسی شد. نتیجه حاصل از بررسی هر یک از پارامترها به صورت مجزا نشان داد که تاثیر دبی بر بازده اتلاف انرژی، نسبت به دو پارامتر دیگر یعنی قطر و عمق چاهک، بیشتر و مقدار آن ۹۲/۷۹ درصد است. در بررسی دو پارامتر، تاثیر قطر و دبی بر بازده اتلاف انرژی به گونه‌ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۲ سانتی‌متر بیشتر و مقدار آن ۹۳/۱۵ درصد است و با افزایش دبی به ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۶ سانتی‌متر بیشترین مقدار و معادل ۸۹/۲۵ درصد است. تاثیر قطر و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه‌ای است که در قطر ۱۲ سانتی‌متر، بیشترین بازده اتلاف انرژی برای $Hs/D=1$ یعنی عمق چاهک برابر با قطر شفت ریزشی است که مقدار آن ۹۲/۲۱ درصد است.

واژگان کلیدی: بازده اتلاف انرژی، دبی جریان، سازه ریزشی گردابی، مدل آزمایشگاهی، ورودی مارپیچی

مقدمه

مشکلات می‌توان به فرسایش و تخریب بستر و دیواره‌های مجاری فاضلاب اشاره کرد. ورود حجم بالایی از هوا در اثر سقوط آزاد جریان از ارتفاع زیاد آسیب‌های سازه‌ای، ارتعاش‌های ناشی از جریان با انرژی زیاد، و وقوع پدیده ضربه قوچ در صورت وجود سیستم بسته از دیگر مشکلات محتمل است (Granata, 2016). سازه‌های ریزشی گردابی^۱ راه حل مهندسی کارآمدی برای روبه‌رو شدن با این چالش‌ها معرفی شده‌اند. این سازه‌ها با ایجاد الگوی جریان گردابی^۲ در

شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب شهری، به‌ویژه در مناطق ناهموار اغلب با چالش‌های هیدرولیکی متعددی روبه‌رو هستند. شیب‌های تند و اختلاف ارتفاع شدید بین نقاط مختلف مسیر جریان فاضلاب باعث افزایش قابل توجه انرژی جنبشی جریان می‌شود. این انرژی اضافی اگر به‌صورت مناسب کنترل نشود می‌تواند پیامدهای نامطلوب فراوانی را به دنبال داشته باشد. از جمله مهم‌ترین این

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، (✉ نویسنده مسئول: Email: e.fadaei@uk.ac.ir)

دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

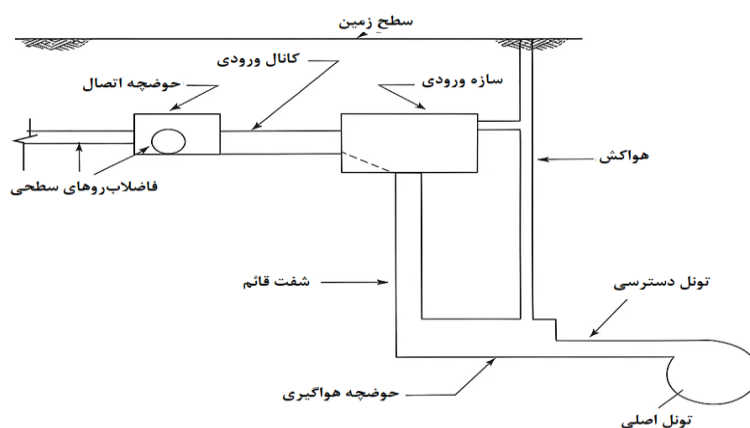
^۲ استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

¹ Vortex Drop Structures

² Vortex

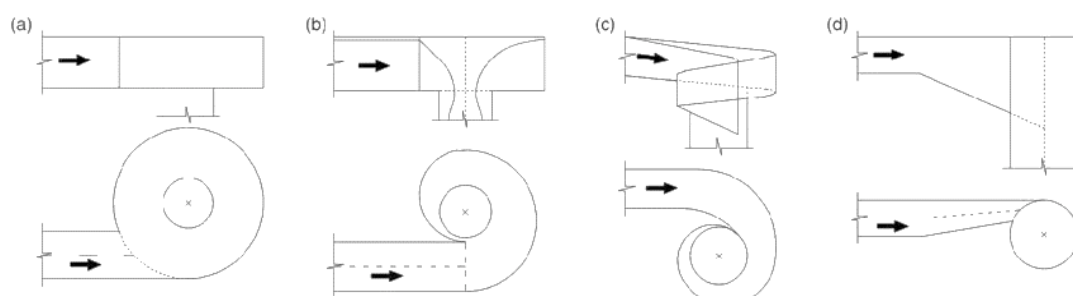
استوانه‌ای عمودی (شفت)، انرژی اضافی جریان ورودی را به صورت مؤثر و کنترل شده‌ای اتلاف می‌کنند (Hajiahmadi et al., 2022). تفاوت سازه منهول ریزشی^۳ با سازه ریزشی گردابی در این است که سقوط جریان در شفت قائم سازه سقوطی جت مرکزی منسجم ایجاد نمی‌کند و در اطراف شفت قائم جریانی پیچیده و کنترل نشده شکل می‌گیرد ولی ریزشی می‌شود (Jain, 1984).



شکل ۱ - نمای سازه ریزشی گردابی (Jain, 1984)

Fig.1- Layout of a vortex drop structure (Jain, 1984)

همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سازه‌های ریزشی گردابی شامل سه جز اصلی است: سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی. ماهیت جریان در شفت قائم توسط سازه ورودی مشخص می‌شود. انواع سازه‌های ورودی شامل: ورودی مماسی، ورودی مارپیچی، ورودی دایره‌ای و ورودی حلزونی است (شکل ۲). صرف نظر از شکل ورودی، الگوهای همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سازه‌های ریزشی گردابی شامل سه جز اصلی است: سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی. ماهیت جریان در شفت قائم توسط سازه ورودی مشخص می‌شود. انواع سازه‌های ورودی شامل: ورودی مماسی، ورودی مارپیچی، ورودی دایره‌ای و ورودی حلزونی است (شکل ۲). صرف نظر از شکل ورودی، الگوهای



شکل ۲- انواع ورودی سازه ورودی: a دایره‌ای، b مارپیچی، c حلزونی، d مماسی (Fernandes and Jónatas, 2019)

Fig.2- Different types of inlet structure: a) circular, b) spiral, c) scroll, d) tangential (Fernandes and Jónatas, 2019)

نوع جریان خروجی از مخزن مستهلک کننده و فشار وارد بر کف مخزن مستهلک کننده نسبت ارتفاع بافل به قطر شفت قائم $0/6-0/28$ ، نسبت ارتفاع سرریز به قطر شفت قائم $0/7-0/3$ ، نسبت فاصله عرضی و نتوری به قطر شفت قائم برابر $0/85$ در دبی‌های کم و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم بین $0/45-1/2$ پیشنهاد کردند. در تحقیقات محمودی‌راد و نجف‌زاده (Mahmoudi-Rad and Najafzadeh, 2023) کارایی اتلاف انرژی در شفت عمودی بررسی و نشان داده شد کارایی اتلاف انرژی در شفت عمودی بین $10/8$ تا $62/29$ درصد متغیر است. با افزایش عدد فرود، مقادیر کارایی اتلاف انرژی جریان در شفت عمودی کاهش می‌یابد. کریسپینو و همکاران (Crispino et al., 2025) با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، جریان در یک سازه گردابی ریزشی فوق بحرانی با ورودی مارپیچ را به صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند رفتار جریان در داخل شفت به طور قابل توجهی به عدد فرود وابسته است و از شرایط تقارن محوری به دور است.

با توجه به مطالب بیان شده، سازه‌های ریزشی گردابی از سه بخش عمده شامل سازه ورودی، شفت قائم و سازه خروجی تشکیل شده است که براساس مطالعات محققان، هر بخش بر هیدرولیک جریان و بازده اتلاف انرژی جریان موثر است. از این رو در تحقیق حاضر با ساخت مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی، عملکرد هیدرولیکی سازه ریزشی گردابی با سازه ورودی مارپیچی و چاهک بررسی گردید. با توجه به اینکه عملکرد سازه در اتلاف انرژی جریان به طور قابل توجهی تحت تاثیر شرایط هیدرولیکی و هندسه بالادست و پایین دست سازه قرار دارد، میزان اتلاف انرژی جریان سازه اندازه گیری شده است.

مواد و روش ها

مدل سازی آزمایشگاهی

مدل فیزیکی سازه ریزشی گردابی فاضلاب‌رو شرقی تهران با مقیاس $1:10$ در آزمایشگاه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شده است (شکل ۳). این مدل شامل کانال دسترسی مستطیلی، ورودی گردابی

یو و لی (Yu and Lee, 2009) با آزمایش‌هایی ضمن بررسی عملکرد ورودی مماسی بر رفتار جریان در سازه ریزشی گردابی، روش جامعی را برای طراحی این نوع ورودی ارائه دادند. این محققان با ارائه رابطه عمق-دبی در کانال ورودی، هسته هوای تشکیل شده درون شفت قائم را نیز اندازه‌گیری کردند و نشان دادند در صورت طراحی نامناسب ورودی مماسی، ناپایداری هیدرولیکی و سرریز جریان از آن رخ می‌دهد. مولیگان و همکاران (Mulligan et al., 2016) آزمایش‌های گسترده‌ای را به صورت عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه ساختار گرداب در 12 مدل مختلف سازه ورودی مارپیچی ترتیب دادند و با استفاده از روش ردیابی مسیر ذرات معلق در جریان، ویژگی‌های جریان را به صورت دوبعدی در سازه ورودی مطالعه کردند. در این آزمایش‌ها اثر مقیاس بر پارامترهای هیدرولیکی بررسی شد. مقایسه نتایج مدلسازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، خطای 12 درصد را برای پروفیل جریان و خطای 22 درصد را برای پروفیل سرعت نشان داد. محمودی راد و خانجانی (Mahmoudi-Rad and Khanjani, 2019) در یک مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع شفت عمودی و عمق چاهک را بر بازده اتلاف انرژی جریان بررسی کردند و ترکیبی از یک چاهک و یک بافل در محفظه اتلاف برای اتلاف انرژی جریان به کار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که این تغییرات باعث اتلاف انرژی جریان بین 85 تا 95 درصد در شفت ریزشی گردابی شده است. این محققان پیشنهاد دادند که نسبت عمق چاهک به قطر شفت عمودی در بازه 1 تا $1/6$ در نظر گرفته شود. حاجی‌احمدی و همکاران (Hajiahmadi et al., 2021) عملکرد مخزن مستهلک کننده از نظر استهلاک انرژی جریان، نوع جریان خروجی (زیر بحرانی و فوق بحرانی) و میزان فشار وارد شده بر کف مخزن را بررسی و در مخزن مستهلک کننده به منظور بهبود عملکرد آن از چهار نوع المان شامل بافل، سرریز، ونتوری و چاهک استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد این المان‌ها جریان ورودی به مخزن مستهلک کننده را به اندازه 90 تا 96 درصد مستهلک می‌کند. این محققان با در نظر گرفتن استهلاک انرژی جریان،

مماسی، شفت ریزشی، مستهلک کننده انرژی و تونل خروجی مستطیلی است. در این تحقیق، از ورودی مارپیچی با قطرهای خروجی متفاوت استفاده شد. برای مشاهده جریان، مدل آزمایشگاهی از جنس پلکسی گلاس شفاف ساخته شده است. کانال ورودی با مقطع مستطیلی جریان را به سازه ورودی مماسی انتقال می‌دهد. این کانال به عرض (B) ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۱ متر است. جریان هوای وارد شده از شفت قائم از طریق لوله خروجی هوا خارج می‌شود که روی مخزن مستهلک کننده نصب شده است. در پایین دست سازه ریزشی گردابی جریان از تونل خروجی با مقطع

مستطیلی به عرض ۰/۱۸ متر و ارتفاع ۰/۲۴ متر خارج می‌شود. باتوجه به نوع جریان در سازه ریزشی گردابی و نیز مطالعات پیشین و مدل‌های مشابه ساخته شده در سطح بین‌المللی، برای ایجاد تشابه بین مدل آزمایشگاهی و سازه اصلی لازم است عدد بدون بعد فرود در مدل و سازه اصلی یکسان یا به عبارتی تشابه فرودی حاکم باشد (Hajiahmadi et al., 2022). باتوجه به ابعاد سازه و ضرورت کاهش هرچه بیشتر خطای مدلسازی و افزایش دقت مدل و مطالعات محققان پیشین، از مقیاس ۱:۱۰ برای ابعاد فضایی مدل استفاده شده است.



شکل ۳- مدل آزمایشگاهی سازه ریزشی گردابی

Fig.3- The experimental model of the vortex drop shaft structure

معرفی بخش‌های مختلف مدل آزمایشگاهی

بخش ابتدایی مدل با مخزن شروع می‌شود که پس از پر شدن مخزن، آب از طریق کانال ورودی به سازه وارد می‌شود. ارتفاع دیواره کانال ورودی ۰/۲۴ متر است. در این آزمایش، از ۴ دبی متفاوت استفاده شده است که به ترتیب ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. برای ورود آب به مدل آزمایشگاهی ابتدا پمپ روشن و دبی مورد نظر با دبی‌سنج الکترومغناطیسی تنظیم می‌شود تا آب با دبی مورد نظر وارد مخزن شود. در تحقیق حاضر دبی طراحی برابر با ۱۹/۴۰ لیتر بر ثانیه است، این دبی‌ها به‌صورت درصدی از دبی طراحی است به گونه‌ای که به ترتیب برابر با ۵۵ درصد، ۷۵ درصد، ۱۰۰ درصد و ۱۳۰ درصد دبی طراحی در نظر گرفته شده‌اند. براساس دیدگاه هاگر (Hager 2010) برای طراحی ورودی مارپیچی (شکل ۴-الف) از روابط زیر استفاده شده است.

$$a = R + \Delta R + \frac{1}{2}b + c + s \quad (1)$$

$$e = \frac{1}{7}(b + s) \quad (2)$$

$$R_4 = R + \Delta R + c + e \quad (3)$$

$$R_3 = R_4 + e \quad (4)$$

$$R_2 = R_4 + 3e \quad (5)$$

$$R_1 = R_4 + 5e \quad (6)$$

در این روابط: a فاصله بین مرکز شفت قائم تا دیوار خارجی کانال ورودی، b عرض کانال ورودی، R شعاع شفت

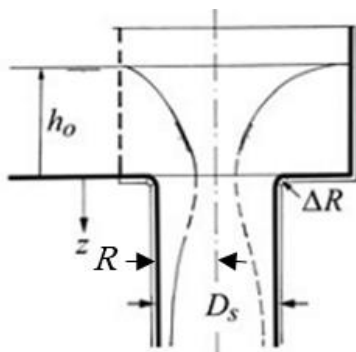
قائم، ΔR شعاع انحنای ورودی شفت قائم، C حداقل فاصله سازه ورودی با کانال ورودی، S حداقل ضخامت دیواره داخلی کانال ورودی، e فاصله خروج از مرکز و R_1, R_2, R_3 و R_4 شعاع سازه ورودی در طول با فواصل زاویه‌ای 90° درجه است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی مدل فیزیکی

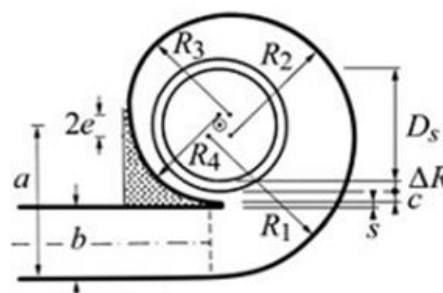
Table 1- Design parameters of the physical model

R (m)	ΔR	S (m)	C (m)	e (m)	R_1 (m)	R_2 (m)	R_3 (m)	R_4 (m)
0/08	0	0/005	0/02	0/026	0/258	0/206	0/153	0/126

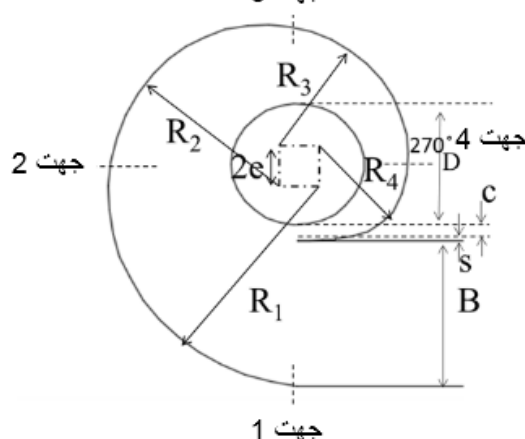
آب پس از کانال ورودی وارد سازه مارپیچی می‌شود. در تحقیق حاضر از ۳ قطر متفاوت برای ورودی آب به شفت قائم استفاده شده است. قطرهای ورودی به ترتیب ۱۲، ۱۳/۶۰ و ۱۶ سانتی‌متر هستند. در جریان آزمایش، در چهار جهت سازه ورودی ارتفاع آب اندازه‌گیری شده است. در شکل (د) مقطع قطرهای خروجی استفاده شده برای سازه ورودی نمایش داده شده است.



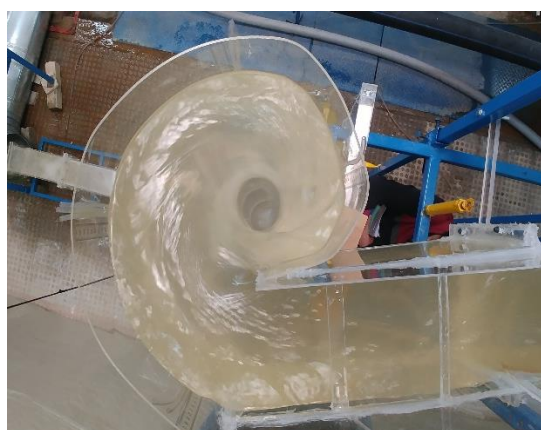
(الف)



جهت ۳



(ب)



(ج)

شکل ۴- سازه ورودی مارپیچی: (الف) هندسه ورودی مارپیچی در پلان و مقطع هاگر (Hager, 2010)، (ب) پلان شماتیک،

(ج) مدل آزمایشگاهی

Fig.4- The plan of the spiral inlet structure (Hager, 2010)



شکل ۵- مقطع قطرهای خروجی استفاده شده برای سازه ورودی
Fig.5- The spiral inlet with different outlet diameters

بعد از سازه مارپیچی شفت قائم قرار می‌گیرد. در مدل حاضر، شفت قائم به قطر ۱۶ سانتی‌متر است. برای ساخت شفت قائم از ۴ قطعه مطابق شکل (۶) با ارتفاع ۴۸ سانتی‌متر استفاده شده است که به یکدیگر متصل‌اند. در مدل حاضر قطر ورودی به شفت قائم متغیر است و ارتفاع کل ریزش، ۱۹۲ سانتی‌متر، ثابت در نظر گرفته شده است.



(ب)



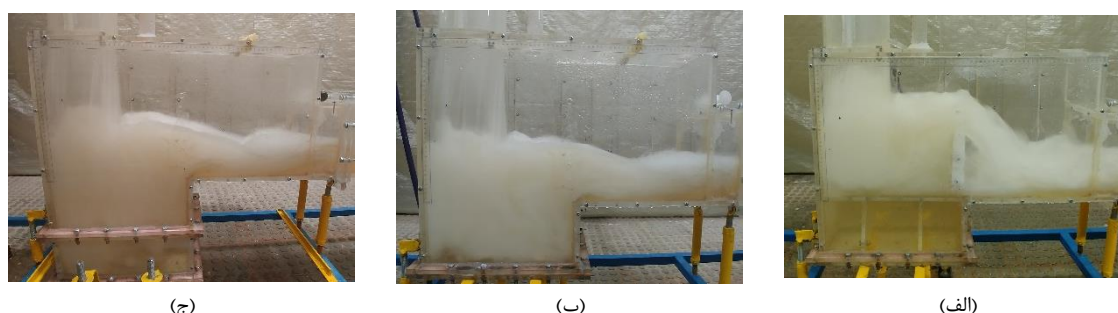
(الف)

شکل ۶- نمای شفت قائم مدل: (الف) قطعات ۴۸ سانتی‌متری، (ب) شکل کلی شفت قائم

Fig.6- View of the vertical shaft model: a) pieces of 48 cm, b) the overall shape of the vertical shaft

جریان آب به صورت گردابی از شفت قائم پایین می‌آید پس از آن به مخزن مستهلک کننده انرژی وارد می‌شود. مخزن مستهلک کننده وظیفه استهلاک انرژی باقیمانده که در مسیر شفت قائم مقداری از انرژی مستهلک می‌شود و

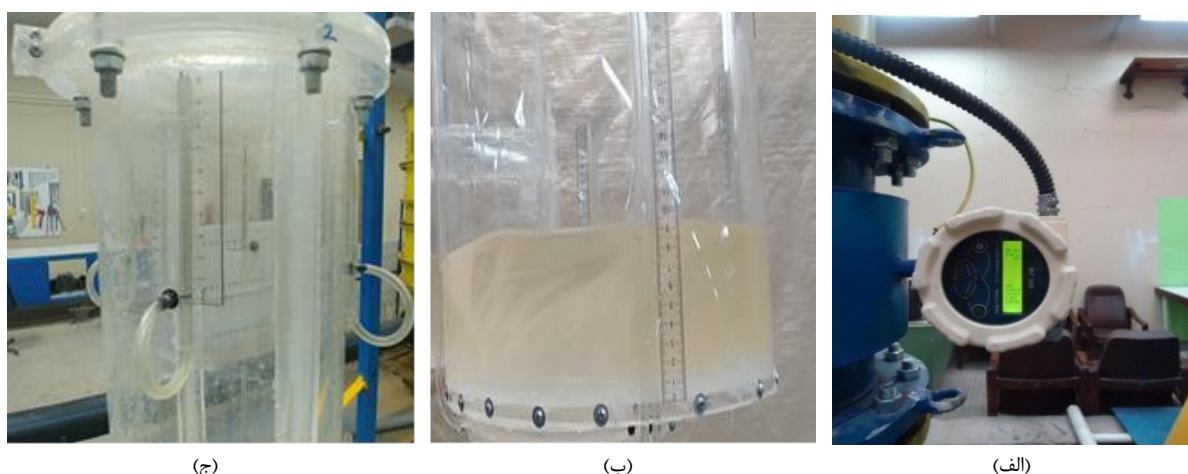
جریان خروجی از شفت قائم، جداسازی حباب های درون جریان، کاهش فشار کف مخزن مستهلک کننده ناشی از سقوط جریان از شفت قائم و ایجاد جریان زیربحرانی و هدایت آن به کانال پایین دست را بر عهده دارد (Zhang et al., 2025). در مدل تحقیق حاضر، ابعاد هندسی مخزن مستهلک کننده به طول ۰/۷۶ متر، ارتفاع ۰/۳۵ متر و عرض ۰/۲ متر است. به منظور تغییر در عمق چاهک مدل آزمایشگاهی، با ساخت دو قطعه پیش ساخته امکان اضافه و کم شدن این عمق مهیا گردیده است. این قطعات سبب می شوند تا نسبت $H_s/D=1$ (نسبت عمق چاهک به قطر شفت ریزشی) به صفر و ۲ نیز کاهش و افزایش یابد (شکل ۷). بعد از مستهلک شدن انرژی جریان به وسیله شفت قائم و چاهک، آب به کانال خروجی به ابعاد ۰/۲۱×۰/۲۱ متر وارد و از سازه ریزشی گردابی خارج می شود.



شکل ۷- چاهک در مخزن مستهلک کننده انرژی (الف) $H_s/D=0$ ، (ب) $H_s/D=1$ ، (ج) $H_s/D=2$

Fig.7- The outlet energy dissipator, a) $H_s/D=0$, b) $H_s/D=1$, c) $H_s/D=2$

ابزارهای اندازه گیری برای اجرای آزمایش ها شامل دبی سنج الکترومغناطیسی، پیزومتر و خط کش است. دبی جریان ورودی به سازه با استفاده از دبی سنج الکترومغناطیسی (MFC300) با دقت ± 1 درصد اندازه گیری و کنترل شده و تراز سطح آب با خط کش و هد فشار بیا پیزومترهای نصب شده در خط مرکزی کف کانال (با دقت ± 1 میلی متر) اندازه گیری شده است (شکل ۸).



شکل ۸- ابزارهای اندازه گیری پارامترهای آزمایش (الف) دبی سنج الکترومغناطیسی، (ب) خط کش، (ج) پیزومتر

Fig.8- Measurement tools of the hydraulic parameters: flow rate, gauge and piezometer

هد کل انرژی در هر مقطع از جریان به کمک معادله برنولی محاسبه می‌شود.

نتایج

عملکرد هیدرولیکی بخش های ورودی و خروجی سازه ریزشی گردابی

عمق جریان مشاهده شده در کانال ورودی تحت تاثیر تغییرات دبی جریان در شکل (۹) نشان داده شده است. دیده می‌شود که جریان در قسمت ورودی به صورت هموار و بدون تشکیل پرش هیدرولیکی برقرار است. با افزایش دبی، جریان گردابی در شفت قائم با جریان ورودی در محل اتصال برخورد می‌کند و سطح آن افزایش می‌یابد. این برخورد هیچ گونه انسدادی در محل اتصال با شفت قائم ایجاد نمی‌کند و پس‌زدگی آب نیز در ورودی ماریچی رخ نمی‌دهد. این موضوع عملکرد مناسب سازه ورودی را در تبدیل جریان مستقیم به جریان چرخشی نشان می‌دهد.

رفتار جریان در مخزن مستهلک کننده انرژی

جریان بعد از شفت قائم وارد مخزن مستهلک کننده انرژی می‌شود. جریانی که به صورت قائم و ماریچی از شفت قائم خارج می‌شود با برخورد آب به درون چاهک (مستهلک کننده انرژی)، انرژی جریان به صورت قابل توجهی تلف و جریان قائم به جریان افقی تبدیل می‌شود. در سازه خروجی، آزمایش‌ها برای هر چهار دبی مختلف جریان در ۶ نقطه به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر دنبال شده که در هر نقطه میانگین اعداد ارتفاع سطح آب محاسبه شده است. نتایج بررسی‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۰) در تمامی حالات یعنی بدون چاهک و با چاهک به ازای تمامی قطرهای، ارتفاع سطح آب در ابتدا و انتهای کانال تقریباً یکسان است.

در این تحقیق میزان استهلاک انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی تحت تاثیر دبی جریان ورودی و قطر خروجی سازه ورودی و عمق چاهک در سازه خروجی بررسی می‌گردد. پارامترهای مورد بررسی شامل: دبی جریان ورودی (Q)، قطر خروجی سازه ورودی (d) و عمق چاهک (H_s) است. آزمایش‌ها برای چهار دبی ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه اجرا گردید که با در نظر گرفتن دبی طراحی برابر ۱۹/۴۰ لیتر بر ثانیه، نسبت Q/Q_d برای دبی‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۳ است. آزمایش‌ها برای قطر خروجی سازه ورودی در چهار اندازه ۱۲، ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر و نسبت عمق چاهک به قطر شفت قائم (H_s/D) برای صفر، ۱ و ۲ اجرا شده‌اند. در جدول (۲) مشاهده می‌شود که عوامل Q ، d و H_s/D به ترتیب دارای ۳، ۴ و ۳ عوامل هستند یعنی تعداد کل ترکیبات ممکن بین این عوامل $3 \times 4 \times 3 = 36$ ترکیب است. با در نظر گرفتن سه بار تکرار برای تمام ترکیبات ممکن، تعداد ۱۰۸ ($3 \times 3 \times 3$) آزمایش به منظور ارزیابی عملکرد سازه طرح ریزی شده است. هدف از تکرار آزمایش‌ها، افزایش دقت داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق کاهش خطای اندازه‌گیری و بررسی تاثیر هر عامل بر نتایج در محدوده مورد مطالعه است.

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 محاسبه می‌گردد. از این رو بر اساس مطالعات گراناتا (Granata 2016) و هاگر (Hager 2010) از رابطه ۷ به منظور محاسبه بازده اتلاف انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی استفاده شده است:

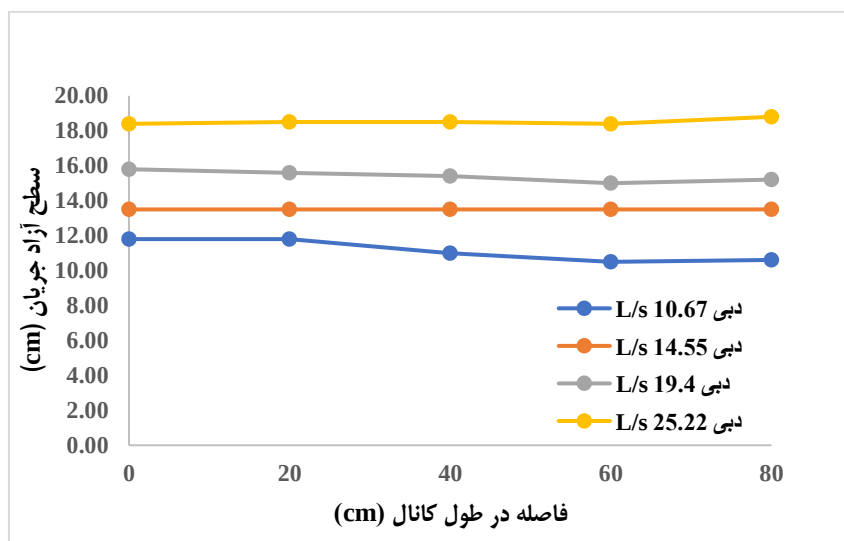
$$\eta = (H_1 - H_2) / H_1 \times 100 \quad (7)$$

که η میزان استهلاک انرژی جریان، H_1 هد کل انرژی مقطع بالادست، و H_2 هد کل انرژی در مقطع پایین دست است.

جدول ۲- وضعیت محدوده عوامل مورد آزمایش

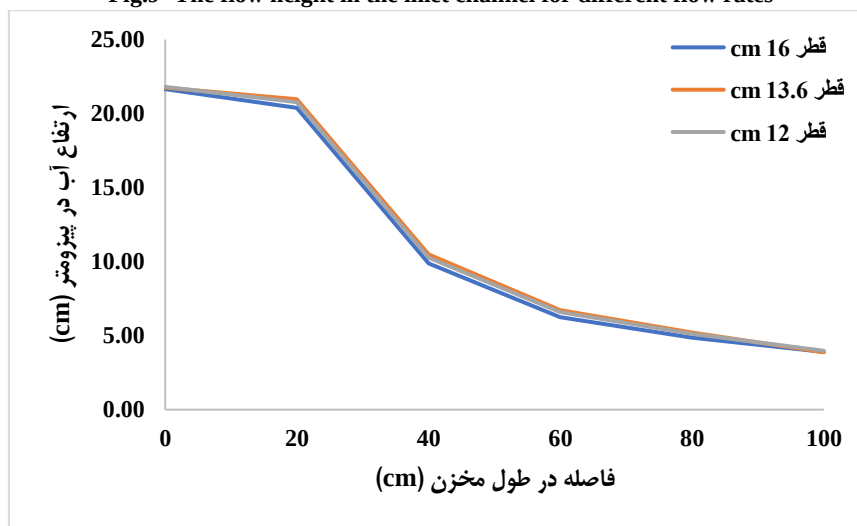
Table 2- Analysis of the experimental parameters

سطح level	محدوده Range	پارامترهای مورد مطالعه Study parameters
4	25/22,19/40,14/55,10/67	$Q (l/s)$
3	16,13/6,12	$d(cm)$
3	2,1,0	(H/D)
3	تکرار	
108	تعداد آزمایش‌ها	

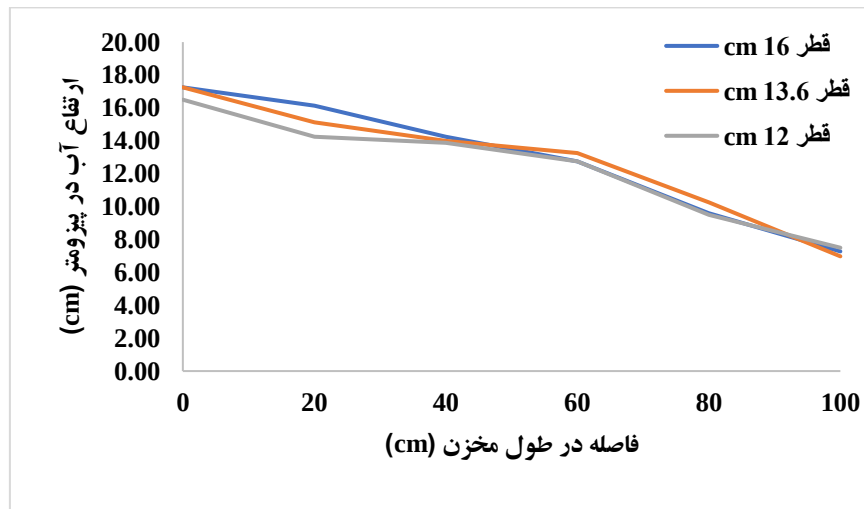


شکل ۹- ارتفاع جریان در کانال ورودی به ازای مقادیر مختلف دبی جریان

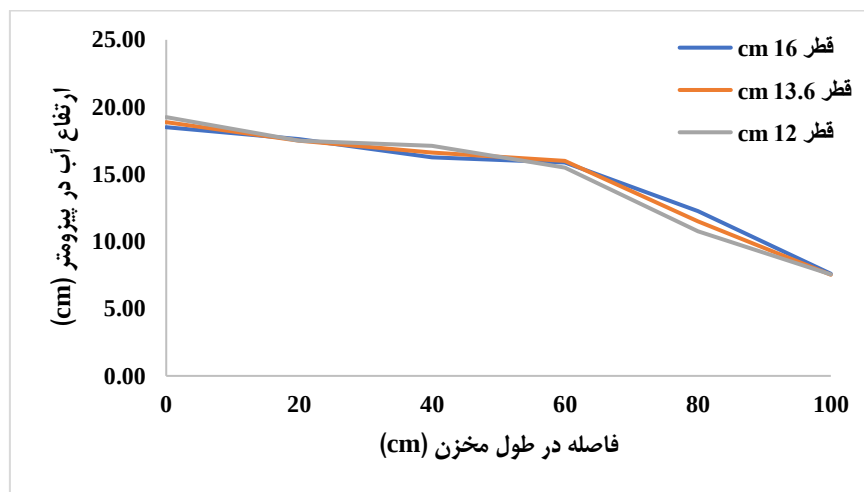
Fig.9- The flow height in the inlet channel for different flow rates



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰- ارتفاع جریان در مخزن مستهلک کننده الف) $H_s/D=0$ ب) $H_s/D=1$ ج) $H_s/D=2$

Fig.10- The flow height in the energy dissipation chamber: a) $H_s/D=0$, b) $H_s/D=1$, c) $H_s/D=2$

برابر شکل (۱۰) الف، حالت بدون چاهک، ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۲۱/۷۵ سانتی‌متر است. ارتفاع سطح آب در انتهای کانال برای هر سه قطر تقریباً برابر و مقدار آن ۳/۹ سانتی‌متر است. در شکل ۱۰ ب، حالت عمق چاهک برابر با قطر شفت، کمترین ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال مربوط به قطر ۱۲ سانتی‌متر است که مقدار آن برابر با ۱۶/۵ سانتی‌متر است و بیشترین ارتفاع سطح آب در ابتدای کانال مربوط به قطرهای ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر است که مقدار هر دو آن برابر با ۱۷/۲۵ سانتی‌متر است. در انتهای کانال و هنگام خروج آب از سازه، ارتفاع سطح آب تقریباً یکسان و مقدار آن حدود ۷ سانتی‌متر است.

اتلاف انرژی جریان

در ادامه تحقیق تاثیر پارامترهای دبی جریان، عمق چاهک و قطر سازه ورودی شفت قائم بر بازده اتلاف انرژی در سه حالت بررسی شده است. بدین صورت که در ابتدا تاثیر هر یک از پارامترها به صورت جداگانه بررسی می‌شود، پس از آن تاثیر دو پارامتر باهم و در نهایت هر سه پارامتر

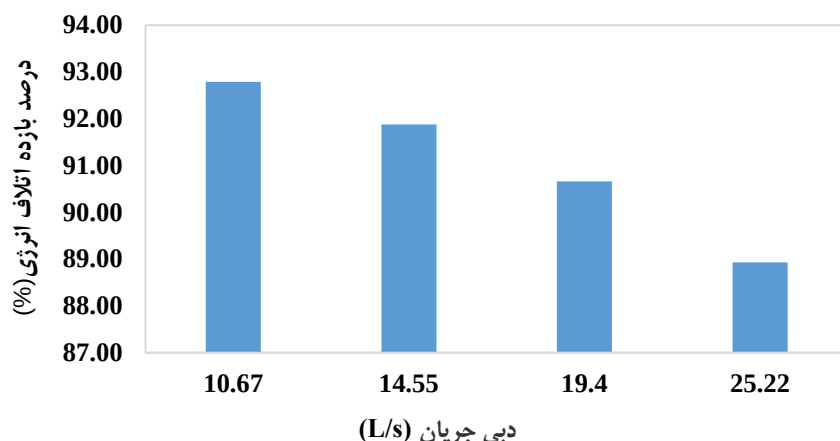
در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری میزان اتلاف انرژی در ۱۰۸ آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است. و نسبت های مختلف ارائه شده است. در این جدول (۳) تاثیر چهار دبی مختلف به مقدار ۱۰/۶۷،

جدول ۳- میزان اتلاف انرژی جریان
Table 3- The rate of flow energy dissipation

η (%)			دبی Discharge	قطر Diameter
Hs / D=2	Hs / D=1	Hs / D=0	Q(L/s)	d(cm)
92.04	94.08	91.18	10.67	16
92.00	94.01	91.01		
93.89	94.09	91.20		
91.55	93.45	90.50	14.55	
91.49	93.40	90.52		
91.55	93.35	90.55		
90.98	90.59	89.71	19.4	
90.91	90.50	89.71		
90.92	90.61	89.80		
90.35	88.87	88.52	25.22	
90.35	88.80	88.50		
90.40	88.79	88.49		
92.54	94.14	91.69	10.67	13.6
92.55	94.11	91.61		
92.59	94.19	91.72		
91.81	93.33	90.42	14.55	
91.88	93.31	90.44		
91.80	93.35	90.41		
91.10	91.28	89.61	19.4	
91.11	91.27	89.55		
91.18	91.33	89.61		
89.33	88.56	88.45	25.22	
89.30	88.51	88.40		
89.34	88.55	88.41		
93.27	94.59	91.57	10.67	12
93.25	94.55	91.51		
93.32	94.59	91.50		
91.94	93.26	90.61	14.55	
91.94	93.22	90.66		
91.99	93.25	90.67		
90.81	92.08	89.80	19.4	
90.85	92.01	89.80		
90.84	92.07	89.81		
88.72	88.92	88.65	25.22	
88.69	88.90	88.61		
88.65	88.88	88.70		

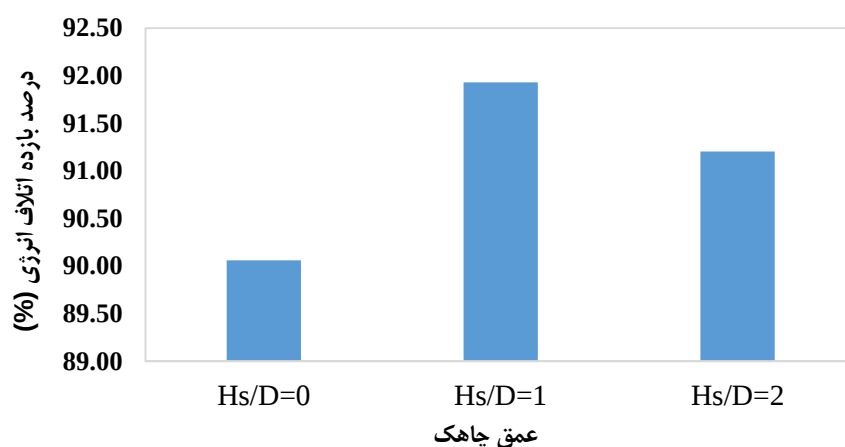
پیشتر اشاره شد که در تحقیق حاضر تاثیر چهار دبی ۱۰/۶۷، ۱۴/۵۵، ۱۹/۴۰ و ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بازده اتلاف انرژی برای دبی های مختلف به صورت میانگین درصد بازده مربوط به دبی مورد نظر، بدون در نظر گرفتن قطر و نسبت عمق چاهک به قطر شفت محاسبه می شود. با توجه به نتایج به دست آمده، بازده اتلاف انرژی حاصل از میانگین ۹ عدد، طبق جدول (۳) به ترتیب دبی های بالا برابر با ۹۲/۷۹، ۹۱/۸۸، ۹۰/۶۶ و ۸۸/۹۳ درصد است که بیشترین بازده اتلاف مربوط به دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه برابر با ۹۲/۹۷ درصد و کمترین بازده اتلاف مربوط به دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه که برابر با ۸۸/۹۳ درصد است. در شکل (۱۱) دیده می شود که با افزایش دبی جریان، بازده اتلاف انرژی کاهش می یابد. در بررسی تاثیر عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی نیز بازده اتلاف انرژی برای هر سه حالت مختلف بر طبق جدول (۳) برابر است با میانگین ستونی نسبت عمق چاهک به قطر شفت (H_s/D) بدون در نظر گرفتن قطر و دبی جریان. در این حالت میانگین ۱۲ عدد برای هر سه حالت، یعنی بدون

چاهک، عمق چاهک برابر با قطر شفت و عمق چاهک دو به شکل (۱۲)، بیشترین بازده مربوط به نسبت $H_s/D=1$ برابر با ۹۱/۹۳ درصد و کمترین بازده مربوط به نسبت $H_s/D=0$ برابر با ۹۰/۰۶ درصد است. با توجه به نتایج به دست آمده، میزان بازده اتلاف انرژی به ترتیب برابر با ۹۰/۰۶، ۹۱/۹۳ و ۹۱/۲۰ درصد است. با توجه



شکل ۱۱- نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به دبی جریان

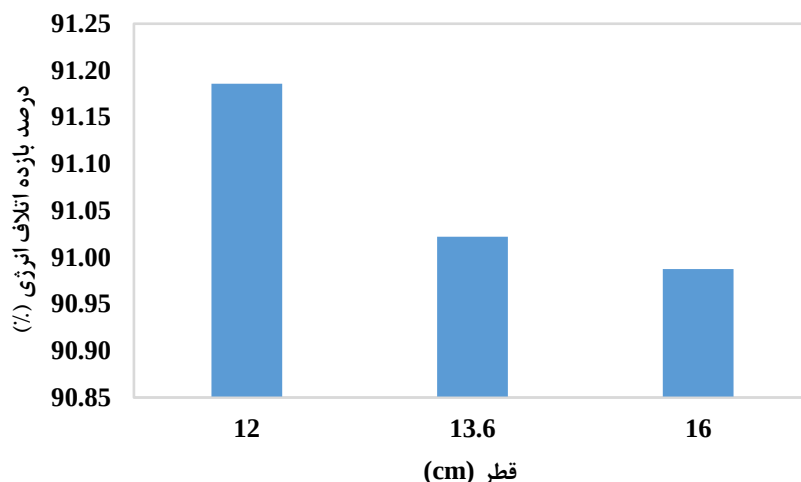
Fig.11- The effect of discharge on energy dissipation efficiency



شکل ۱۲- نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به عمق چاهک

Fig.12- The effect of sump depth on energy dissipation efficiency

در بررسی تاثیر قطر بر بازده اتلاف انرژی، در جدول (۳) بازده اتلاف انرژی برابر با میانگین ۱۲ عدد مربوط به هر قطر بدون در نظر گرفتن دبی جریان و عمق چاهک آورده شده است. بازده اتلاف انرژی برای قطرهای ۱۲، ۱۳/۶ و ۱۶ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۹۱/۱۹، ۹۱/۰۲ و ۹۰/۹۹ درصد است. در این حالت، بیشترین بازده مربوط به قطر ۱۲ سانتی‌متر و برابر با ۹۱/۱۹ درصد و کمترین بازده مربوط به قطر ۱۶ سانتی‌متر و برابر با ۹۰/۹۹ درصد است. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش قطر، بازده اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ - نمودار بازده اتلاف انرژی نسبت به قطر سازه ورودی

Fig.13- The effect of inlet diameter on energy dissipation efficiency

نتیجه گیری

برای قطر ۱۶ سانتی متر برابر با ۹۲/۴۳ درصد است. با افزایش دبی به ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۶ سانتی متر بیشترین یعنی ۸۹/۲۵ درصد و کمترین بازده در این دبی مربوط به قطر ۱۲ سانتی متر و برابر با ۸۸/۷۶ درصد است.

- تاثیر باهم دو پارامتر قطر و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در قطر ۱۲ سانتی متر بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$ یعنی عمق چاهک برابر با قطر شفت ریزشی است که مقدار آن برابر با ۹۲/۲۱ درصد و کمترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=0$ یعنی حالت بدون چاهک است که مقدار آن برابر با ۸۹/۹۸ درصد است. با افزایش قطر نیز باز همان نتیجه به دست آمد.

- تاثیر باهم دو پارامتر دبی جریان و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$ است که مقدار آن ۹۴/۲۷ درصد به دست آمده است و برای دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه، بیشترین بازده مربوط به $H_s/D=2$ است که مقدار آن ۸۹/۴۷ درصد به دست آمده است.

- تاثیر همزمان هر سه پارامتر بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در قطر ۱۲ سانتی متر و دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه، بیشترین بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$

در تحقیق حاضر رفتار جریان در بخش های مختلف سازه ریزشی گردابی شامل کانال ورودی، سازه مارپیچی و کانال خروجی (مستهلك کننده انرژی) بررسی شد. تاثیر سه پارامتر دبی جریان، قطر سازه ورودی و عمق چاهک به قطر شفت بر بازده اتلاف انرژی جریان نیز بررسی گردید. تاثیر این پارامترها در سه حالت ارزیابی شد. در ابتدا تاثیر هر یک به صورت مجزا و پس از آن دو پارامتری و سپس هر سه پارامتر باهم ارزیابی شدند که نتایج آن به شرح زیر است:

- در بررسی های انجام یافته برای هر یک از پارامترها، بیشترین تاثیر بر درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به پارامتر دبی است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین بازده مربوط به دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه است که مقدار آن برابر با ۹۲/۷۹ درصد و کمترین بازده مربوط به دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه است که مقدار آن ۸۸/۹۳ درصد به دست آمده است. بدین ترتیب دیده می شود با افزایش دبی، بازده اتلاف انرژی کاهش می یابد.

- تاثیر باهم دو پارامتر قطر و دبی جریان بر بازده اتلاف انرژی به گونه ای است که در دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه، درصد بازده اتلاف انرژی برای قطر ۱۲ سانتی متر از دیگر حالت ها بیشتر و برابر با ۹۳/۱۵ درصد و کمترین بازده در این دبی

دیده می‌شود که مقدار آن ۹۴/۵۹ درصد است. در همان قطر و دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه بیشترین بازده مربوط به $D=1$ است که مقدار آن ۸۸/۹۲ درصد به‌دست آمده است. در قطر ۱۶ سانتی‌متر و دبی ۱۰/۶۷ لیتر بر ثانیه، بیشترین درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به $H_s/D=1$ است که مقدار آن ۹۴/۰۸ درصد به‌دست آمده است و در همین قطر و دبی ۲۵/۲۲ لیتر بر ثانیه بیشترین بازده مربوط به $H_s/D=2$ است که مقدار آن ۹۰/۳۵ درصد به‌دست آمده است.

باتوجه به نتایج تحقیق حاضر، هر سه پارامتر دبی جریان، قطر سازه ورودی و عمق چاهک بر بازده اتلاف انرژی جریان تاثیر داشته و در بررسی‌های انجام یافته برای هر یک از پارامترها، بیشترین تاثیر بر درصد بازده اتلاف انرژی مربوط به پارامتر دبی است. با این حال پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با تغییر در مشخصات سازه ورودی مارپیچی مانند شیب کف کانال ورودی و شیب کف سازه ورودی، تاثیر این پارامترها نیز بر بازده اتلاف انرژی جریان در سازه ریزشی گردابی مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی افرادی که در پیشبرد این تحقیق و مقاله یاری رساندند، به‌ویژه بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

- Crispino, G., Maietta, F., Iervolino, M., & Gisonni, C. (2025). Numerical study on a supercritical vortex drop shaft with a spiral inlet. *Results in Engineering*, 25, 104197.
- Fernandes, J., & Jónatas, R. (2019). Experimental flow characterization in a spiral vortex drop shaft. *Water Science and Technology*, 80(2), 274-281.
- Granata, F. (2016). Dropshaft cascades in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 73(9), 2052-2059.
- Hager, W. H. (2010). *Wastewater hydraulics: Theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Hajiahmadi, A., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., & Khanjani, M. J. (2021). Experimental study of flow characteristics in vortex drop shaft. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(3), 04021032.
- Hajiahmadi, A., Crispino, G., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., & Gisonni, C. (2022). Effect of the flow regime on the hydraulic features governing the operation of vortex drop shafts with spiral inlets. *Water Science & Technology*, 86(5), 1095-1107.
- Jain, S. C. (1984). Tangential vortex-inlet. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1693-1699.
- 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), 04019027.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در مطالعه و طراحی مقاله و تحقیق مشارکت داشته‌اند. جمع‌آوری داده‌ها، پیاده‌سازی، تجزیه و تحلیل و جمع‌بندی نتایج توسط تمامی نویسندگان انجام پذیرفته است. نسخه اولیه مقاله توسط ا. ف. ک. نوشته شده است و تمامی نویسندگان (س. ا. ز. ا. ف. ک. و م. ق. ح.) اصلاحات و پیشنهادات خود را بر روی نسخه اولیه ارائه و اعمال نموده‌اند. اصلاحات و ویرایش نهایی توسط ا. ف. ک. و م. ق. ح. در متن نهایی اعمال شده است. همچنین تمامی نویسندگان نسخه نهایی را بررسی نموده‌اند.

- Mahmoudi-Rad, M., & Najafzadeh, M. (2023). Experimental evaluation of the energy dissipation efficiency of the vortex flow section of drop shafts. *Scientific Reports*, 13(1), 1679.
- 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.
- Yu, D., & Lee, J. H. (2009). Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage. *Journal of hydraulic engineering*, 135(3), 164-174.
- Zhang, S., Wang, Y., & Law, A. W. K. (2025). Large eddy simulations of transient flow characteristics in a drop shaft with a scroll vortex intake. *Flow*, 5, E29.