

## Research Paper

# Investigation of Effective Parameters on Energy Dissipation Due to Impinging Jet in Confined Spaces

Ali Babakhani<sup>1</sup>,Ali Attarzadeh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant professor of Hydraulic Engineering, Civil Department, Engineering Faculty, Zanjan University, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Assistant professor of Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

[10.22125/IWE.2022.359628.1669](https://doi.org/10.22125/IWE.2022.359628.1669)

Received:  
**October 9, 2021**  
Accepted:  
**January 21, 2023**  
Available online:  
**December 30, 2023**

**Keywords:**  
**Energy Dissipation,**  
**impinging jet,**  
**Chamber, Flow-3D.**

## Abstract

Energy dissipation due to impinging jets in a confined space is used in many industrial and civil applications. In this research, using Flow-3D software, numerical simulation of the flow of impinging jets has been carried out and factors such as the position of the jet, the diameter and height of the jet entering the chamber have been investigated on the amount of energy dissipation. To investigate of the position of the jet, the inlet jet to the chamber is placed in 4 different positions. Also, the effect of the height of the inlet jet to the chamber, and the diameter of the inlet pipe on the parameters of the jet velocity in the axis of the turbulent kinetic energy and the amount of energy loss has been investigated.

## 1. Introduction

The diffusion of impinging jets in confined spaces is always accompanied by high energy dissipation, so this phenomenon is widely used in many industrial applications such as reducing flow energy in water and wastewater networks and urban drainage systems.

Energy dissipation due to jets has been extensively explored in the literature. Albertson et al. (1948), Cola (1965) conducted extensive experiments on impinging jets and reported a proposed diversion angle of the jet and air entrainment rate in a fully developed regime that can lead to optimum energy dissipation. Camino et al. (2011) investigated the performance of a novel stacked drop manhole. The energy dissipation rate of the stacked drop manhole was 50–90% under various flow conditions. The experiment conducted by Rajaratnam et al. (1993) on a vertical shaft jet showed that a jet diverted through a circular wall would develop like an unsymmetrical jet in a confined space. In this research, to achieve further information on the energy dissipation procedure by focusing on effective parameters

\* **Corresponding Author:** Ali Babakhani

**Address:** Civil Engineering Department, Zanjan University, Iran

**Email:** Babakhani@Znu.ac.ir

**Tel:** +24-33054433, +989127440492

for energy dissipation, a series of numerical simulations of the flow of impinging jets has been carried out.

## 2. Materials and Methods

In this research, numerical simulation of the flow of impinging jets has been carried out by Flow 3D, which is a sophisticated tool that provides insight into complex hydraulic problems that would be difficult to visualize and illustrate or quantify with other software. To validate the numerical results, (Camino et al. 2009) velocity distribution laboratory data were used. The most common turbulence models such as LES, RNG, and K- $\epsilon$  were explored to detect the best model for the main simulations. Subsequently achieving the optimum model to simulate, parameters such as the position of the jet, the diameter, and the height of the jet entering the chamber have been investigated on the amount of energy dissipation. To investigate the position of the jet, the inlet jet to the chamber is placed in 4 different positions. Also, the effect of the height of the inlet jet to the chamber, and the diameter of the inlet pipe on the parameters of the jet velocity in the axis of the turbulent kinetic energy and the amount of energy loss has been investigated. In these simulations, the inlet jet to the waste chamber has been investigated at 4 different depths and with 4 different nozzle diameters.

## 3. Results

In this paper, a series of numerical simulations of the flow of impinging jets has been carried out to detect effective parameters on energy dissipation. The results show that the energy dissipation rate ascends significantly by reducing the diameter of the inlet pipe. However, by shrinking the diameter of the inlet pipe extremely, the chamber performance would face a decline rate in energy dissipation. According to the above results, the ratio  $L/D=3.7$ , where  $L$  is the dimensions of the waste chamber and  $D$  is the diameter of the inlet pipe (equal to 102 mm), is recommended. Also, the energy dissipation rate goes through up with the increase in the depth of the foundation. However, with an excessive increase, no noticeable change in energy dissipation can be observed. For  $Y_t/L=2.44$ , where  $Y_t$  indicates the depth of the footing, the loss chamber has optimal performance. The results of investigating the position effect also showed that the highest energy loss is related to the placement of the jet tube in the tank adjacent to the outlet tube of the waste chamber.

## 4. Discussion and Conclusion

According to results illustrated by the software, it can be concluded that once the jet stream enters the chamber, two velocity regions of the potential core and the radial decrease of the velocity are formed. This phenomenon plays an important role in the energy dissipation mechanism. Another important thing is worth mentioning, By pondering the result, it could be figured out, Simultaneous while the dimensions of the jet and chamber have an undeniable effect on energy dissipation, it could not claim there is a continuous trend in their effect on energy dissipation, so the excessive increase of chamber dimensions or  $Y_t$  can lead to conflict results, therefore it seems to be essential optimizing the parameter values to achieve a more accurate result

## 5. Six important references

- 1) Albertson, M., Dai, Y., Jensen, R. and Rouse, H. (1948). "Diffusion of submerged jets". Transactions of the ASCE Paper No. 2409: 639\_664.
- 2) Camino, G. A., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2012). "Jet diffusion inside a confined chamber". Journal of Hydraulic Research Vol. 50, No. 1
- 3) Cola, R. (1965). "Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin". Proc. XXI IAHR congress, Vol. I, paper 1.52, IAHR, Leningrad, pp. 1-13.
- 4) Muler, G., (2020). "Energy dissipation through entrained air compression in plunging jets". Journal of Hydraulic Research, Vol 58 (3).
- 5) Rajaratnam, N., Johnston, G. A. and Barber, M. A. (1993). Energy dissipation by jet diffusion in stormwater drop shafts, Canadian Journal of Civil Engineering 20, 374-379.

- 6) Rinaldi, P. and Valentin, F. (2005). "Non-dimensional scaling of turbulent jets in confined spaces". Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management, Taylor and Francis Group, London, pp. 319\_324.

## مدلسازی عددی جریان جت‌های برخوردی محصورشده در سازه مستهلک‌کننده

### انرژی

علی باباخانی<sup>۱\*</sup>، علی عطارزاده<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

مقاله پژوهشی

### چکیده

استهلاک انرژی ناشی از جت‌های برخوردی در فضای محصورشده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Flow-3D اقدام به شبیه‌سازی عددی جریان جت‌های برخوردی و بررسی عواملی همچون موقعیت قرارگیری جت، قطر و ارتفاع جت ورودی به اتاقک اتلاف بر میزان استهلاک انرژی شده است. به همین منظور ابتدا با بهره‌گیری از اطلاعات مدل آزمایشگاهی و پس از تعریف شرایط مرزی لازم، صحت‌سنجی نتایج مدل عددی مذکور انجام پذیرفت. برای بررسی موقعیت قرارگیری جت، جت ورودی به اتاقک اتلاف در ۴ موقعیت مختلف قرار داده شده است. همچنین اثر ارتفاع جت ورودی به اتاقک اتلاف و قطر لوله ورودی بر روی پارامترهای سرعت جت در محور جت انرژی جنبشی آشفته‌گی و نیز میزان اتلاف انرژی بررسی شده است. بدین صورت که جت ورودی به اتاقک اتلاف در ۴ عمق پایاب مختلف و با ۴ قطر نازل متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با ورود جریان جت به اتاقک دو ناحیه سرعتی هسته پتانسیل و نقصان شعاعی سرعت شکل می‌گیرد. همچنین غالباً با کاهش قطر لوله ورودی، اتلاف انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این وجود با کاهش بیش از حد قطر لوله ورودی، اتاقک عملکرد مناسبی نخواهد داشت. طبق نتایج فوق نسبت  $L/D=3.7$  که در آن  $L$  ابعاد اتاقک اتلاف و  $D$  قطر لوله ورودی (برابر با ۱۰۲ میلی‌متر) می‌باشد، توصیه می‌شود. همچنین نتایج بررسی اثر افزایش عمق پایاب بر میزان اتلاف انرژی نشان داد که در ابتدا با افزایش عمق پایاب تا حد معینی، میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد با این وجود با استمرار افزایش عمق پایاب دیگر تاثیر چشمگیری بر میزان اتلاف انرژی مشاهده نشد. بطوریکه به ازای  $Y_t/L=2.44$  که در آن  $Y_t$  نشانگر عمق پایاب است اتاقک اتلاف دارای عملکرد بهینه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی عددی، استهلاک انرژی، جت برخوردی، اتاقک اتلاف، Flow-3D

## مقدمه

انتشار جتهای برخوردی در فضاهای محصورشده همواره توأم با استهلاک انرژی زیادی است، این پدیده کاربرد فراوانی در صنعت دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از این نوع جتها برای خنک‌کننده‌ها و کاهش انرژی جریان در شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب و سیستم‌های زهکشی شهری اشاره کرد. در پدیده انتشار جت، انرژی جنبشی جت بوسیله فرایند پخش استهلاک می‌یابد. فهم مکانیزم استهلاک انرژی مهمترین موضوع برای طراحی پوششهای حفاظتی از قبیل دال بتنی، طراحی ابعاد اتاقک‌های اتلاف و یا برای تخمین فرایند تکامل حفره آبستگي در استخرهای برخوردی بدون پوشش می‌باشد. جتهای برخوردی می‌تواند بر حسب مرزهای جامد قرار گرفته در اطراف آن به دو دسته جتهای برخوردی در فضای محصورشده و فضای نامحصور تقسیم شوند. جتهای برخوردی محصورشده در شرایطی تشکیل می‌شوند که مرزهای جامد اطراف آن توسعه جت را محصورشده می‌کند. مهمترین تفاوتی که بین جتهای برخوردی محصورشده و نامحصور وجود دارد میزان سیالی است که از محیط اطراف به درون جت منتقل می‌شود. (هارتوگ و هاسلر (1973)).

مطالعات زیادی روی رفتار جتها انجام شده‌است. آلبرتسون و همکاران (۱۹۴۸) آزمایشات گسترده‌ای روی جت هوا انجام دادند و زاویه انتشار جت در محدوده جریان توسعه‌یافته را، ۱۴ درجه پیشنهاد دادند. کولا و همکاران (۱۹۶۵) بر روی انحراف جت قائم آب نزدیک کف استخر مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که جریان جت در حین ورود به یک استخر آب بصورت تقریباً خطی داخل آن پخش خواهد شد. هارتوگ و هاسلر (۱۹۷۳) در تحقیقات خود نشان داد که در جتهای آزاد ریزشی هر چند که کشش هوا اتفاق می‌افتد ولی یک محدوده هسته تا تراز عمق انتهایی باقی خواهد ماند. بلتاس و راجاراتنام (۱۹۷۷) مطالعه‌ای در مورد جتهای برخوردی انجام دادند و محدوده انحراف در جتهای

دایره‌ای هوا را مشخص کردند. آنها برای جتهای با سرعتهای بین ۴۵ تا ۹۰ متر بر ثانیه، از فاصله ۸۶ درصد از محل ورود جت، انحراف آن را مشاهده کردند. مک-کیوک و اروین (۱۹۸۱) بصورت آزمایشگاهی رفتار جت دایره‌ای آب با شدت آشفته‌گی از ۰/۳ تا ۸ درصد که ابتدا وارد هوا و سپس به یک استخر وارد می‌شد را بررسی کردند. آنها نشان دادند که انقباض هسته و انتشار نه فقط به سرعت جت بستگی دارد بلکه به شدت آشفته‌گی نیز بستگی دارد. اروین و فالوی (۱۹۸۷) زاویه انتشار و طول انحلال جت در هوا را مطالعه کردند و نشان دادند که نرخ انتشار خارجی ۳ تا ۴ درصد و نرخ نقصان هسته داخلی ۰/۵ تا ۱ درصد است. راجاراتنام (۱۹۹۳) تحقیقی گسترده روی جتی که وارد شفت قائم می‌شد انجام داد. در آزمایشات ایشان از جت ورودی برخوردی قائم و دایروی و شکل فضای محصورشده دایروی استفاده شد. در این آزمایشات نقصان سرعت مرکزی جت بررسی گردید. با بررسی الگوی جریان مشاهده شد که جت منحرف‌شده در امتداد دیوارهای استوانه مثل یک جت دیواره‌ای آشفته غیرمتقارن بالا خواهد آمد. براساس گزارش آنانداله در سال ۱۹۹۵، زمانیکه سرعت جت برخوردی و در نتیجه نرخ نقصان سرعت آن بتواند پیش‌بینی شود، میزان خوردگی و فرسایش در پایه‌ها و پی سد نیز می‌تواند تخمین زده شود. بنابراین بوه‌ر در سال ۱۹۹۸ به بررسی نقصان سرعت جتهای توسعه یافته و توسعه نیافته پرداخته است. در این تحقیق رابطه‌ای جدید برای طول انحلال جت توسعه دادند. یکی از مهمترین تحقیقات در زمینه استهلاک انرژی جت در فضایی با محدودیت در کناره‌ها توسط مانسو و همکاران (۲۰۰۴) و مانسو (۲۰۰۶) انجام شد. این محققان، آزمایشاتی بر روی جت قائم مستغرق که وارد یک اتاقک دایروی شکل می‌گردید، انجام دادند و میزان افت انرژی و تغییرات سرعت و شدت آشفته‌گی را بررسی نمودند و دریافتند که جریان جت در سرعتهای بالا، باعث ایجاد هوادهی بداخل استخر برخوردی می‌شود. در ادامه گراناتا و همکاران (۲۰۰۹)، میزان استهلاک



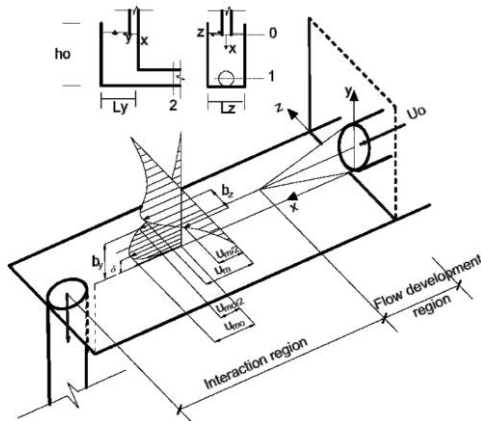
لی و همکاران (۲۰۱۹) ویژگی‌های جریان و اتلاف انرژی یک جت افست در یک حوضچه اتلاف مستطیلی شکل را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق یک مدل‌سازی عددی از یک جت افست مستغرق دایره‌ای در یک اتاقک اتلاف مستطیلی ارائه می‌کند و پارامترهای طراحی مختلف (موقعیت افست ورودی، ضریب زبری، و عرض و طول اتاقک) را بر روی توزیع سرعت جت بررسی می‌کند. نتایج حاصل از مدل عددی نشان می‌دهد که زمانی که ارتفاع افست کمتر از نیمی از عمق پایاب است، میزان اتلاف با ارتفاع افست کاهش می‌یابد. علاوه بر این، عرض حوضه و طول حوضچه بر نرخ کاهش سرعت و اتلاف انرژی تأثیر می‌گذارد. همچنین مطالعه بررسی زبری نیز نشان داد که Riprap نصب شده در کف حوضچه تأثیر کمی بر اتلاف انرژی در موارد مورد مطالعه دارد.

مولر (۲۰۲۰) به بررسی اتلاف انرژی ناشی از جت مستغرق همراه با تداخل هوای داخل جت پرداخت. در این تحقیق ترمودینامیک تراکم حباب هوا به عنوان یک مکانیسم جدید اتلاف انرژی معرفی شده است.

راکیب و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی میزان اتلاف انرژی در سازه‌های هیدرولیک با هد پایین پرداختند. در این مقاله، کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای طراحی هیدرولیکی دو سرریز سرریز-S-333N و S-71 در فلوریدا جنوبی ارائه شد و چندین جایگزین اتلاف انرژی پیشنهاد و ارزیابی شد که شامل منحرف کننده جریان برای جلوگیری از فرورفتن جت با جریان بالا به پایین و جزیره جداسازی جریان برای جلوگیری از رقابت جت های جریان از سرریزهای موجود بود.

مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که عمده‌ی تحقیقات صورت گرفته در زمینه زاویه انتشار جت، طول انحلال و تداخل هوا می‌باشند و به موضوع استهلاک انرژی ناشی از جتهای برخوردی در فضاهای محصور شده، کمتر پرداخته شده است این در حالی است که جتهای برخوردی در فضاهای محصور شده کاربرد

انرژی جت های ریزشی ورودی به یک اتاقک اتلاف مستطیلی شکل را بررسی نمودند. کامینو در سال ۲۰۱۱، یک سری آزمایشاتی بر روی جت مستغرق قائم ورودی به یک اتاقک اتلاف مستطیلی شکل انجام داد که در این آزمایشات نقصان سرعت بیشینه جت و میزان افت انرژی بررسی گردید. ایشان اعتقاد داشتند که اثرات عدد رینولدز در پخش جت (اعداد رینولدز موجود در این کار) قابل چشم پوشی است. به علاوه، کشش هوا بداخل شفت بطور صحیح مدل‌سازی نشده است و این مساله نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. براساس تحقیقات راجارانتام و همکاران در سال ۱۹۹۳ و لیو و همکاران در سال ۲۰۰۶ افت انرژی بوسیله پخش جت در فواصل کوتاه از خروجی جت می‌تواند بسیار موثر باشد. بعلاوه براساس مطالعات راجارانتام در سال ۱۹۷۶ روی جت-های محصور شده در مجراهای عبور هوا نشان داده‌اند که یک گردابه پایدار یا یک محدوده چرخشی تشکیل می‌شود که سرانجام به یک جریان لوله کاملاً توسعه یافته منجر می‌شود. در تحقیقی توسط کاروالهو و لآندرو در سال ۲۰۱۲ مشخصات هیدرولیکی آگوی دایره‌ای با یک دریچه کنترل در پایین دست آن مورد بررسی قرار گرفت. نیانتیکی و همکاران (۲۰۱۵) طی یک مطالعه تجربی ساختارهای جریان جت های افست آشفته سه بعدی با استفاده از تکنیک سرعت سنجی تصویر ذرات مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که وجود جریان برگشتی بر توزیع میانگین سرعت و تنش‌های رینولدز تأثیر بسزایی دارد. ما و همکاران (۲۰۱۷) پارامترهای موثر بر اتلاف انرژی در دراپ منهول‌ها را مورد بررسی قرار دادند. ایشان میزان اتلاف انرژی در این منهول‌ها را وابسته‌ی به نوع رژیم جریان ورودی به منهول دانستند که در این مطالعه جریان ورودی به منهول به ۴ نوع رژیم جریان ریزشی، جریان اوریفیسی، جریان تحت فشار خروجی و شرایط منهول کاملاً مستغرق طبقه‌بندی شده است. در این مطالعه میزان اتلاف انرژی برای انواع رژیم های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



شکل (۱) ساختار سرعت جت دیواره‌ای دایره‌ای داخل فضای محصورشده (کامینو ۲۰۱۱)

در مقطع صفر شکل (۱) کل انرژی در واحد حجم در خروجی جت  $E_T$  برابر است با

$$E_T = \rho g h_0 + \frac{\rho U_0^2}{2} \quad \text{معادله (۱)}$$

که  $h_0$  عمق آب داخل فضای محصورشده،  $\rho$  دانسیته آب و  $g$  شتاب جاذبه است. همچنین  $\frac{\rho U_0^2}{2}$  فشار دینامیکی در سطح ورودی جت است. فرض می‌شود که توزیع فشار در فضای محصورشده هیدرواستاتیکی است یعنی فشار پیرومتری در محل ۰ و محل ۱ ثابت باقی می‌ماند. در معادله ۲ رابطه سرعت نسبی در هر نقطه دلخواه به فاصله  $z$  از مرکز جت و در معادله ۳ رابطه سرعت نسبی هر نقطه دلخواه به فاصله  $y$  از دیواره برخوردی جت ارائه شده است.

$$\frac{u}{u_m} = g_1(\eta_z) = \exp(-0.693\eta_z^2) \quad \text{معادله (۲)}$$

$$\frac{u_m}{u_{mo}} = f_1(\eta_y) = \exp(-0.693\eta_y^2) \quad \text{معادله (۳)}$$

در روابط فوق  $f_1$  به یک تابع دلالت می‌کند و

$$\eta_y = \frac{y}{b_y} \quad \text{که } b_y \text{ فاصله‌ای از جهت } y \text{ است که در آن}$$

$$u_m = \frac{u_{mo}}{2} \quad \text{بطور مشابه، تغییر سرعت } u \text{ در محور } z$$

می‌توان به شکل  $\frac{u}{u_m} = g_1(\eta_z)$  نشان داده شود که در

$$\text{آن } \eta_z = \frac{z}{b_z} \quad \text{و } b_z \text{ فاصله‌ای در جهت } z \text{ است که در}$$

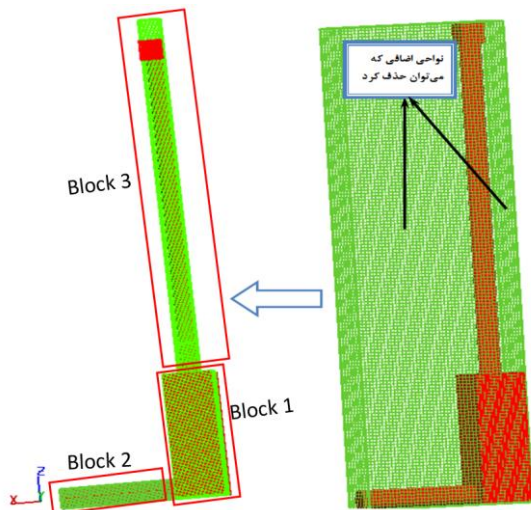
بسیار زیادی در سازه‌های استهلاک انرژی در صنعت آب و فاضلاب دارند. بر این اساس انجام تحقیقات مفصل در زمینه تاثیر سایر عوامل موثر همچون عمق پایاب و محل قرارگیری نازل بر ساختار میدان جریان جت‌های برخوردی در محیط‌های محدود و استهلاک انرژی ناشی از انتشار جت، ضروری بنظر میرسد. موضوعی که در این تحقیق با تمرکز بر میزان استهلاک انرژی ناشی از جت به آن پرداخته شده است.

### روش محاسبه سرعت و افت‌های انرژی

در این قسمت به نحوه محاسبه سرعت و میزان اتلاف انرژی جنبشی پرداخته می‌شود از آنجائیکه استهلاک انرژی در فضای محصورشده اساساً بر اساس پخش جت اتفاق می‌افتد (Rajaratnam, 1993). بر این اساس معادلات حاکم بر انتشار جت و توزیع سرعت جت در راستای انتشار ارائه شده است. یک جت دایره‌ای با قطر  $d$  از یک نازل با یک سرعت تقریباً یکنواخت  $U_0$  مماس بر دیواره خارج می‌شود که یک جت دیواره‌ای سه‌بعدی یا یک جت دیواره‌ای گرد را ایجاد می‌کند. در راستای محور مرکزی توسعه جت، دو محدوده مجزا شکل می‌گیرد: محدوده هسته پتانسیل و هسته نقصان شعاعی (Rajaratnam, 1976). بطوریکه در محدوده پایین‌دست هسته پتانسیل، در ناحیه جریان توسعه یافته، توزیع سرعت متوسط زمانی در محور مرکزی شبیه به محور در جهت  $y$  در صفحه مرکزی که  $z = 0$  است می‌باشد. از اینرو سرعت در صفحه مرکزی  $U_m$ ، ( $z = 0$ ) می‌تواند توسط سرعت بیشینه آن  $U_{mo}$  و  $\frac{u_m}{u_{mo}} = f_1(\eta_y)$  بدون بعد شود. در شکل (۱) شماتیکی از ساختار سرعت جت دیواره‌ای دایره‌ای داخل فضای محدود ارائه شده است.

### مدل FLOW-3D

نرم افزار FLOW-3D ورژن ۱۰، قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارا می باشد. معادله های حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم، که برای جریان آشفته، تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت بیان می شود. در این شبیه سازی برای حذف نواحی مازادی که نیازی به محاسبات آن نیست در مش بندی حذف گردید به همین منظور سه بلوک مجزا در نظر گرفته شد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) حذف نواحی مازاد محاسباتی و بلوک های مختلف

### شرایط مرزی بلوک ها

در شکل (۴) شرایط مرزی اعمال شده در بلوک شماره ۱ مربوط به اتاقک اتلاف را نشان می دهد. شرایط مرزی که مربوط به دیواره های اتاقک اتلاف می باشد Wall در نظر گرفته شده است ولی از آنجائیکه لوله خروجی متصل به یکی از دیواره های اتاقک اتلاف می باشد برای فراهم کردن امکان جاری شدن جریان از اتاقک اتلاف به لوله خروجی Symmetry در نظر گرفته شد. همچنین  $Z_{min}$  این بلوک با توجه به اینکه چسبیده به کف اتاقک اتلاف می باشد Wall در نظر گرفته شده است و  $Z_{max}$  نیز به علت اینکه وجه ارتباطی بین بلوک شماره ۱ و ۳ می باشد. Symmetry

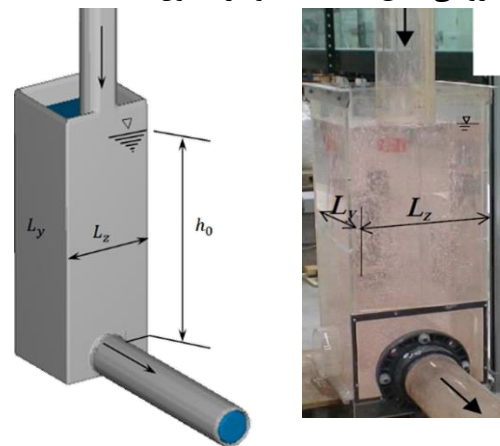
آن  $u = \frac{u_m}{2}$  در محدوده جریان کاملاً توسعه یافته،  $u_m$  یک نسبت معکوس با  $x$  دارد و هر دو مقیاس طول (جهت  $y$  و  $z$ ) بصورت خطی در جهت طولی  $x$  رشد می کنند. شار انرژی جنبشی  $E$  و طول  $x$  در معادله (۴) ارائه شده است.

$$E = \int_0^{L_y} \int_{-\frac{L_z}{2}}^{+\frac{L_z}{2}} \rho \frac{u^2}{2} u dy dz \quad \text{معادله (۴)}$$

که  $L_y$  و  $L_z$  به ترتیب طول و عرض سطح مقطع فضای محصور شده هستند. محدوده های انتگرالگیری از اثر چرخش داخل فضای محصور شده چشم پوشی می کنند.

### مشخصات مدل آزمایشگاهی و عددی

در این تحقیق برای مدلسازی از ابعاد مدل آزمایشگاهی کامینو (۲۰۱۱) استفاده شده است. در شکل (۲) نمایی از مدل تولید شده در نرم افزار Flow 3D ارائه شده است که ابعاد سازه و لوله ورودی و خروجی طبق مقاله کامینو در جدول (۱) آمده است.



شکل (۲) نمایی از مدل آزمایشگاهی و مدل ایجاد در نرم

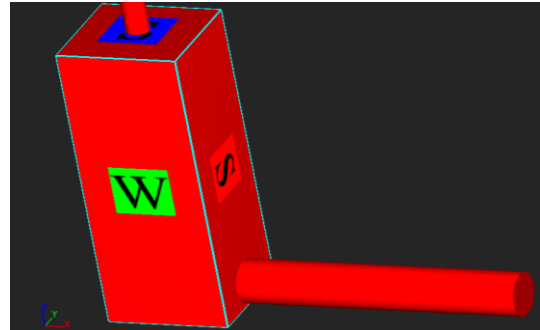
### افزار Flow 3D

جدول (۱) ابعاد سازه و لوله ورودی و خروجی

قطر لوله ورودی (mm)	$L_y \times L_z$ (m)	$h_0$ (m)	قطر لوله خروجی (mm)
۱۰۲	۰/۳۸*۰/۳۸	۰/۹	۱۵۲

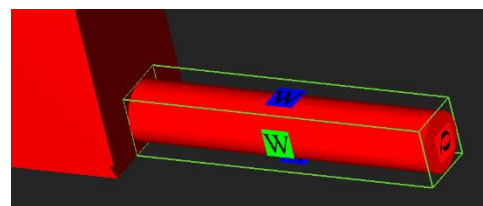


در نظر گرفته شد تا ارتباط مناسبی بین این دو بلوک در راستای Z برقرار گردد.



شکل (۴) شرایط مرزی اعمال شده در بلوک شماره ۱

بلوک شماره ۲ برای شبکه‌بندی لوله‌ی خروجی ایجاد گردید، در  $X_{min}$  این بلوک برای انطباق با بلوک شماره ۱ در محل اتصال بلوک‌ها، Symmetry در نظر گرفته شده است. در  $X_{max}$  این بلوک را که منطقه‌ی خروج است. سیال Volume flow rate در نظر گرفته شده است. از طرفی، بایستی مقدار دبی خروجی از اتاقک اتلاف تحت کنترل و تنظیم باشد. برای این منظور مقدار دبی ورودی در گزینه‌ای که در شکل مشخص شده است وارد می‌شود. در شکل (۵) شرایط مرزی اعمال شده در وجوه مختلف بلوک شماره ۲ نشان داده شده است.



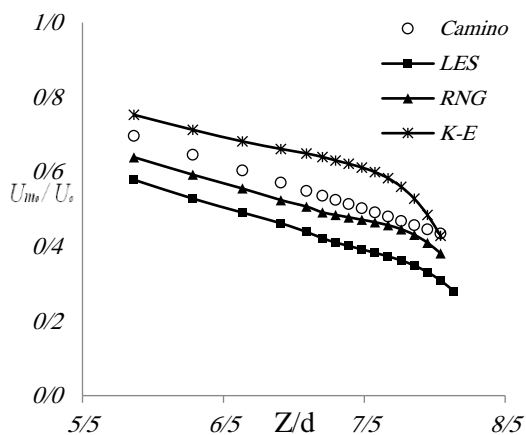
شکل (۵) شرایط مرزی اعمال شده در بلوک شماره ۲

برای تعیین شرایط مرزی  $Y_{min,max}$  و  $Z_{min,max}$  می‌توان از شرط مرزی Wall استفاده نمود.

در بلوک (۳) شرط مرزی  $Y_{min,max}$  و  $X_{min,max}$  دیواره در نظر گرفته شد. این بلوک در راستای Z صفحه مشترکی با بلوک شماره ۱ دارد، بنابراین در این مرز مشترک بایستی شرط مرزی طوری اتخاذ گردد که همخوانی مناسبی بین دو بلوک برقرار گردد. بنابراین شرط مرزی  $Z_{min}$  این بلوک،

### بررسی مدل‌های آشفتگی

برای یافتن بهترین مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی، از نتایج سرعت در مرکز جت برای مدل‌های مختلف آشفتگی از نرم‌افزار Flow 3D استفاده شده است. مقایسه این نتایج در شکل (۶) آمده است.



شکل (۶) نتایج سرعت بیشینه جت در امتداد ریزش جت برای مدل‌های آشفتگی مختلف

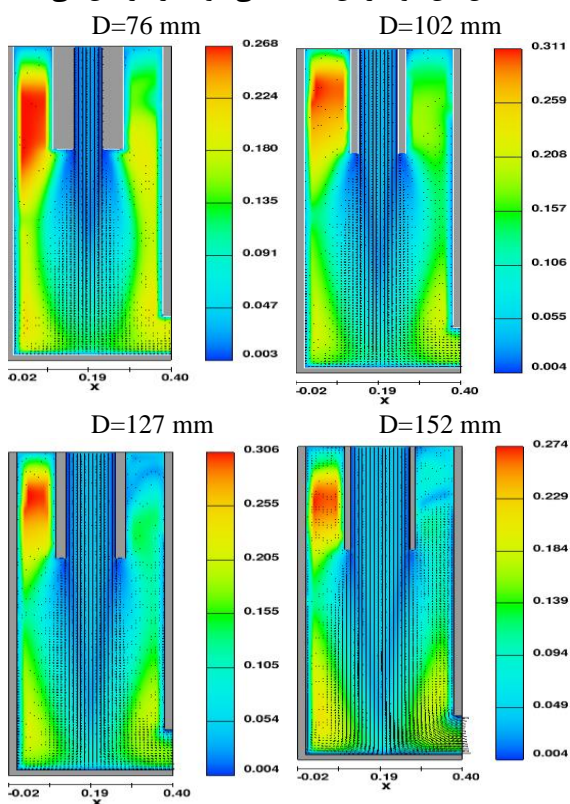
شکل (۶) نشان می‌دهد بهترین نتایج مربوط به مدل آشفتگی RNG با ( $R^2=0.92$ ) می‌باشد که می‌توان علت آنرا توانایی این مدل برای حل محیط‌های چرخشی عنوان کرد. شایان ذکر است مدت زمان مدل سازی با استفاده از مدل RNG، ۲۸ ساعت بوده است این در حالی است که مدت زمان مدل‌سازی برای مدل‌های k-ε، LES، به ترتیب ۱۶ ساعت و با ( $R^2=0.83$ ) و ۱۲ ساعت با ( $R^2=0.75$ ) طول کشید، که خود حاکی از زمانبر بودن فرآیند حل توسط مدل RNG می‌باشد.

در این تحقیق به منظور یافتن حالت بهینه موقعیت جت ورودی، قطر و ارتفاع بهینه جت چندین مدل عددی شبیه‌سازی شد که جزئیات آنها در جدول ارائه شده است.



می‌یابد. از طرفی از آنجائیکه جریان بالارونده در اثر تداخل با جریان جت اصلی موجب اتلاف انرژی می‌گردد، با کاهش انرژی جریان بالارونده از شدت تداخل نیز کاسته شده و میزان اتلاف انرژی جریان جت اصلی کاهش می‌یابد. بنابراین تعیین قطر بهینه لوله ورودی و یا ابعاد بهینه اتاقک اتلاف ضروری بنظر می‌رسد. در اینجا نسبت  $L/D=3.7$  (L ابعاد اتاقک اتلاف و D قطر لوله ورودی (برابر با ۱۰۲ میلی‌متر) می‌باشد، توصیه می‌شود.

طبق نتایج شکل (۸)، با کاهش قطر لوله ورودی اتلاف انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بطوریکه در پی کاهش قطر لوله ورودی، سرعت جریان جت ورودی افزایش می‌یابد و بر میزان قدرت و ابعاد گردابه‌ها نیز افزوده می‌شود. بنابراین از آنجائیکه هم جریان نزولی جت و هم جریان‌های چرخشی و بالارونده افزایش یافته است، در نهایت میزان اتلاف انرژی که از تداخل این دو جریان حادث می‌شود نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۷) طول مقیاس آشفتگی برای قطر مختلف لوله ورودی

D=76 mm

D=102 mm

جدول (۲) جزئیات مدل‌های شبیه‌سازی شده

توضیحات	تعداد حالات	پارامتر مورد بررسی
۱۵۲، ۱۲۷، ۱۰۲، ۷۶ میلی‌متر (D)	۴	قطر لوله ورودی
۰/۹۷، ۰/۹۳، ۰/۸۷، ۰/۸ متر (Y <sub>t</sub> )	۴	عمق پایاب
موقعیت جت‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.	۴	موقعیت جت ورودی

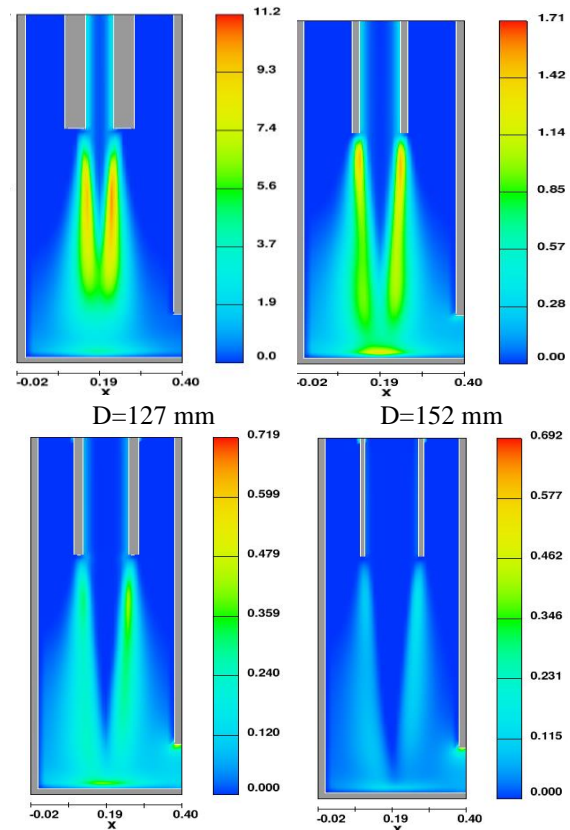
## نتایج و بحث

در این بخش عوامل موثر بر میزان استهلاک انرژی در اتاقک اتلاف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور با معلوم بودن سرعت بیشینه در آستانه جت، سرعت در امتداد خط مرکزی جت بدست می‌آید. در ادامه سرعت نقاط اطراف محور جت با یک نسبتی از فاصله آستانه تا مرکز جت تبعیت می‌کنند. با محاسبه سرعت در تمام نقاط، انرژی جنبشی ابتدا و انتهای اتاقک اتلاف و در نتیجه میزان استهلاک انرژی بدست خواهد آمد.

### بررسی اثر قطرهای متفاوت لوله ورودی

در شکل (۷) و شکل (۸) نتایج طول مقیاس آشفتگی و میزان اتلاف انرژی آشفتگی به ازای قطرهای مختلف لوله ورودی ارائه شده است. طبق شکل (۷) با کاهش قطر لوله فضای مانور برای توسعه گردابه‌ها که یکی از عوامل اصلی اتلاف انرژی است، افزایش می‌یابد. در نتیجه طول مقیاس آشفتگی افزایش می‌یابد. بطوریکه جریان خروجی از جت پس از برخورد به کف، فضای بیشتری برای تولید گردابه‌هایی با مقیاس بزرگتر دارد. با این وجود با کاهش بیش از حد قطر لوله ورودی اتاقک اتلاف عملکرد مناسبی نخواهد داشت. بطوریکه در این حالت ابعاد نسبی اتاقک نسبت به قطر لوله افزایش چشمگیری می‌یابد و در نتیجه جریان ورودی پس از برخورد با کف، با طی مسیر طولانی‌تری، به جداره‌های جانبی برخورد کرده و بخشی از انرژی جریان بالارونده مستهلک می‌گردد و ابعاد گردابه‌ها کاهش

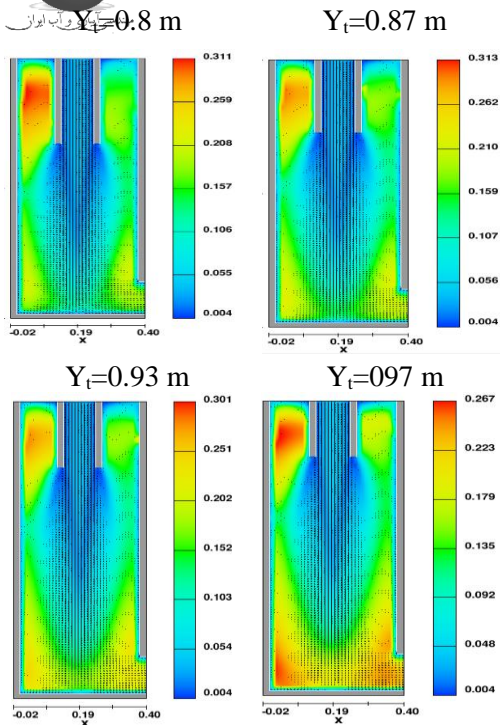
در شکل (۱۱) نمونه ای از میزان اتلاف انرژی در نزدیکی نازل (خروجی جریان جت) نشان داده شده است. همانطوریکه در محدوده داخل خط چین مشخص می‌باشد این ناحیه مرز مشترک دو جریان جت پائین-رونده و گردابه‌های بالارونده می‌باشد لذا در این محدوده بیشترین اتلاف انرژی از تداخل دو جریان پائین‌رونده و بالارونده که جهت حرکت مخالف دارند حادث می‌گردد. این درگیری دو جریان در آستانه ورود جت به فضای اتاقک دارای بیشترین مقدار خود می‌باشد چرا که از طرفی جت در آستانه بیشترین سرعت را داراست و از طرفی گردابه‌های بالارونده نیز به بیشترین مقیاس خود رسیده‌اند و دارای قدرت آشفتگی می‌باشند. لازم بذکر است توسعه جت بدین صورت می‌باشد که در خط مرکزی جت با ورود به اتاقک اتلاف پس از طی مسافتی که بسته به عمق پایاب دارد بخشی از مومنوم جت توسط این دیواره کاهش می‌یابد. در ادامه‌ی حرکت، جت پس از برخورد به کف اتاقک بخش عظیمی از آن به سمت راست منحرف شده و پس از برخورد به دیواره مقابل به سمت بالا حرکت می‌کند که این چرخش جریان خود باعث تشکیل گردابه‌هایی در این ناحیه می‌گردد. همانطوریکه که در شکل (۱۲) مشهود است.



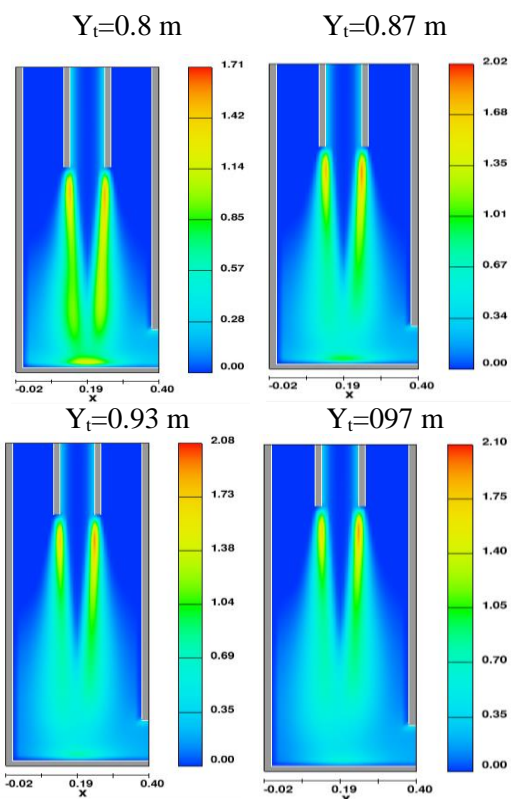
شکل (۸) اتلاف انرژی آشفتگی برای قطر مختلف لوله ورودی

### بررسی اثر عمق پایاب

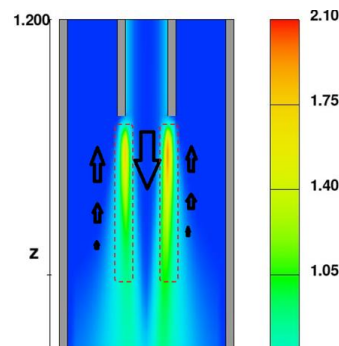
در شکل (۹) طول مقیاس آشفتگی به ازای عمق پایاب‌های مختلف لوله ورودی و در شکل (۱۰) نتایج میزان اتلاف انرژی آشفتگی ارائه شده‌است. همانطوریکه در شکل (۹) مشخص است جریان جت پس از چرخش به سمت دیواره مقابل به سمت بالا حرکت کرده است و هر چه از کف اتاقک فاصله می‌گیرد ابعاد گردابه‌های تشکیل‌یافته بزرگتر می‌گردد که به نوبه خود در اتلاف انرژی جت پائین‌رونده نقش بسزایی دارد. از طرفی انرژی آشفتگی متناسب با نواسانات سرعت و میزان تلاطم ایجاد شده می‌باشد. مطابق با شکل (۱۰)، میزان تلاطم در مرز مشترک بین جت پائین‌رونده و گردابه‌های بالارونده می‌باشد و بیشترین مقدار این پارامتر پس از طی مسیر از آستانه جت حاصل می‌گردد چراکه برای ایجاد تلاطم باید مقداری از مسیر طی شده تا از مومنوم کاسته شده و جریان به تلاطم حداکثری برسد.



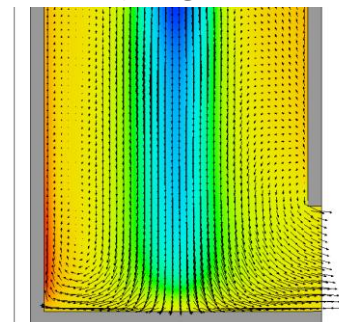
شکل (۹) طول مقیاس آشفستگی به ازای عمق پایاب -  
های مختلف لوله ورودی



شکل (۱۰) میزان اتلاف انرژی آشفستگی به ازای عمق  
پایاب‌های مختلف



شکل (۱۱) نمونه ای از میزان اتلاف انرژی در نزدیکی  
نازل (خروجی جریان جت)



شکل (۱۲) رفتار جریان جت پس از برخورد به کف  
اتاقک اتلاف

بطور کلی با توجه به نتایج بدست آمده می توان مشاهده کرد که با افزایش عمق پایاب همواره میزان اتلاف انرژی افزایش خواهد یافت. بطوریکه با افزایش عمق پایاب جت ورودی مسیر طولانی را طی کرده، و با توسعه بیشتر در این مسیر طولانی بخش قابل توجهی از سرعت مرکزی جت کاهش یافته و از طریق توزیع مومنوم به اطراف مستهلک می گردد. این در حالیست که پس از حدی دیگر با افزایش عمق پایاب تغییری محسوس در اتلاف انرژی مشاهده نمی شود. به ازای  $Y_1/L=2.44$  که در آن نشانگر  $Y_1$  عمق پایاب است اتاقک اتلاف دارای عملکرد بهینه می باشد. همچنین افزایش عمق پایاب منجر به افزایش فضای مانور گردابه های ایجاد شده در اتاقک اتلاف می باشد. بطوریکه طول گردابه های ایجاد شده در عمق پایاب ۰/۹۳ و ۰/۹۷ در کنج های اتاقک اتلاف به میزان حدود ۲۰ درصد افزایش می یابد. این در حالیست که در عمق پایاب کمتر جریان جت ورودی بلافاصله به کف اتاقک برخورد کرده و

دقت بیشتر در نتایج می‌توان دریافت که طول این نواحی به ازای عمق پایاب‌های متفاوت تغییر می‌کند. بطوریکه که با افزایش عمق پایاب طول این نواحی نیز افزایش می‌یابد. همچنین رابطه خطی ارائه شده برای ناحیه نقصان شعاعی سرعت نیز تغییر می‌کند.

جدول (۳) سرعت مرکزی جت در امتداد ریزش جت برای

عمق پایاب‌های مختلف

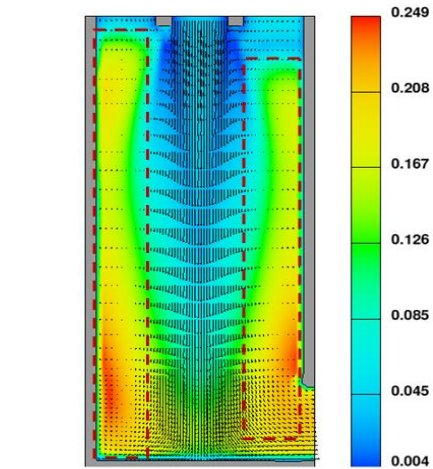
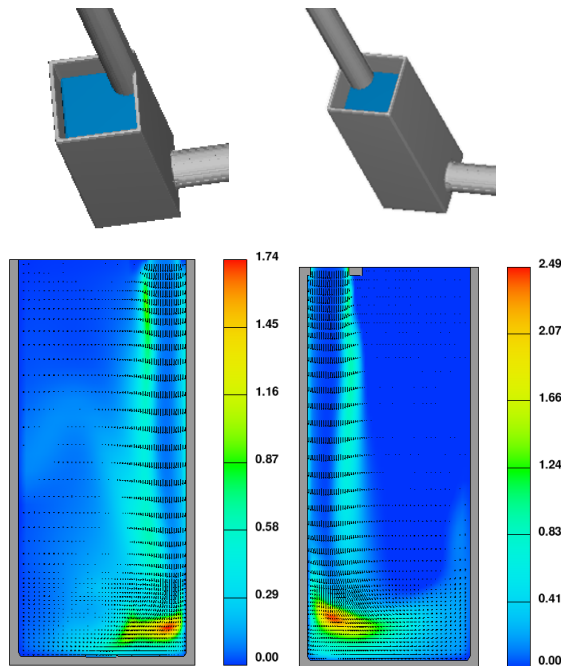
$Um0$ (m/s)	$Um0$ (m/s)	$Um0$ (m/s)	$Um0$ (m/s)	Z (m)
$Y_i=97/0$	$Y_i=93/0$	$Y_i=87/0$	$Y_i=8/0$	0/0
00/0	00/0	00/0	00/0	00/0
-32/0	-40/0	-53/0	-70/0	02/0
-58/0	-71/0	-90/0	-15/1	06/0
-90/0	-05/1	-28/1	-55/1	11/0
-03/1	-18/1	-41/1	-67/1	15/0
-26/1	-41/1	-63/1	-85/1	20/0
-59/1	-73/1	-91/1	-05/2	30/0
-97/1	-06/2	-14/2	-17/2	40/0
-14/2	-17/2	-20/2	-20/2	50/0
-20/2	-21/2	-22/2	-23/2	60/0
-22/2	-23/2	-24/2	-25/2	70/0
-24/2	-25/2	-25/2	-26/2	80/0
-26/2	-26/2	-26/2	-26/2	90/0
-26/2	-26/2	-26/2	-26/2	00/1
-27/2	-27/2	-27/2	-27/2	10/1
-27/2	-27/2	-27/2	-27/2	20/1

نکته قابل توجه دیگر بزرگتر بودن ابعاد گردابه‌ها در سمت چپ نسبت به سمت راست می‌باشد که علت آن فرار بخشی از جت از لوله خروجی در سمت راست می‌باشد که این عامل باعث کاهش ابعاد گردابه‌های سمت راست می‌گردد. این مورد به وضوح در شکل (۱۳) شکل (۱) به نمایش در آمده است.

فضای توسعه زیادی ندارد. نتایج نشان می‌دهد طبق لجندهای شکل (۹) که طول مقیاس آشفتگی به ازای عمق پایاب پائین بیشتر می‌باشد. با دقت در این اشکال می‌توان دریافت که طول مقیاس آشفتگی در محدوده- ای به میزان قابل توجه افزایش می‌یابد که بالای تراز جریان ورودی جت می‌باشد. لذا به علت اینکه در این ناحیه جریان بالارونده با جریان اصلی جت ورودی برخوردی نمی‌کند بنابراین از انرژی آن گرفته نشده و ابعاد آن توسعه می‌یابد که البته این توسعه اثری در استهلاک انرژی کل جت نخواهد داشت. برای اینکه اندرکنشی بین این گردابه‌های در تراز بالا و جریان پائین رونده حادث نمی‌شود. بنابراین یک جریان گسترده بالارونده شکل می‌گیرد که تغذیه آن از طریق میزان انرژی و سرعت جریان جت ورودی انجام گرفته و میزان توسعه آن به ابعاد فضای اطراف و اتافک اتلاف بستگی دارد. با پیشروی جریان بالارونده، این جریان با جریان نزولی اصلی جت تداخل خواهد داشت. که بر اثر این تداخل سرعت جریان جت اصلی گرفته شده و از انرژی آن کاسته می‌شود. که این کاهش مازاد بر کاهش سرعت مرکزی جت به علت توسعه آن در راستای عمقی می‌باشد. بنابراین ابعاد اتافک اتلاف و طول گردابه و قدرت جریان بالارونده تاثیر بسزایی در میزان اتلاف انرژی خواهند داشت.

همانطوریکه ذکر شد در حالتی که عمق پایاب کم است یک پدیده متناقض پیش می‌آید بطوریکه طول مقیاس آشفتگی در ترازهای بالاتر از تراز خروجی جت افزایش می‌یابد ولی این افزایش بدلیل عدم تداخل جریان‌ها اثر کاهشی در میزان انرژی ورودی نخواهد داشت. بنابراین تقویت جریان‌های بالارونده شرط کافی برای استهلاک بیشتر انرژی نمی‌باشد، بلکه در صورتی موثر است که در محدوده تداخل جریان‌ها صورت گیرد. در جدول (۳) سرعت مرکزی جت در امتداد ریزش جت برای عمق پایاب‌های مختلف آمده است. نتایج جدول (۳) نیز نشان می‌دهد که دو ناحیه سرعتی هسته پتانسیل و نقصان شعاعی سرعت شکل می‌گیرد و با





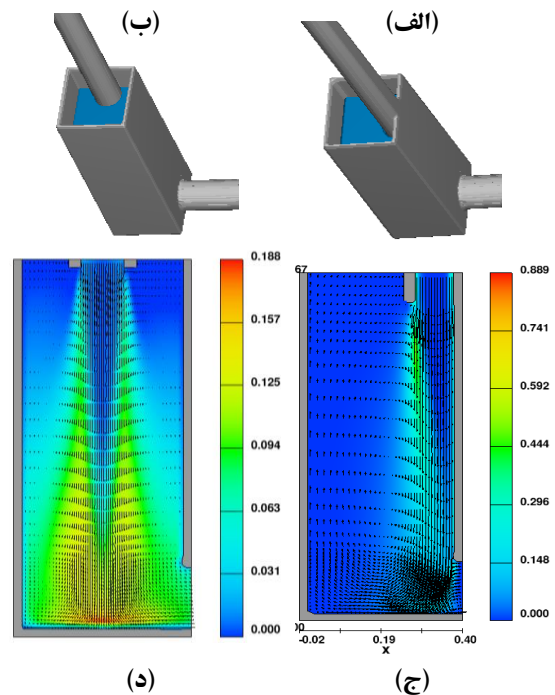
شکل (۱۳) عدم تقارن در ابعاد گردابه‌های تشکیل شده در طرفین جت ورودی

شکل (۱۴) نتایج اتلاف انرژی در موقعیت‌های مختلف جت ورودی به اتاقک اتلاف

شکل (۱۴-الف) توسعه جت در این حالت بدین صورت می‌باشد که جت پس از ورود به اتاقک اتلاف از سمت چپ چسبیده به دیواره حرکت می‌کند و بخش از مومنوم جت توسط این دیواره کاهش می‌یابد. در ادامه‌ی حرکت، جت پس از برخورد به کف اتاقک بخش عظیمی از آن به سمت راست منحرف شده و پس از برخورد به دیواره مقابل به سمت بالا حرکت می‌کند که این چرخش جریان خود باعث تشکیل گردابه‌هایی در این ناحیه می‌گردد. این شکل نشان‌دهنده میزان اتلاف انرژی آشفتگی برای موقعیت جت در مجاورت دیوار متصل به لوله خروجی می‌باشد. همانطوریکه در محدوده داخل خط چین این شکل مشخص می‌باشد این ناحیه مرز مشترک دو جریان جت پائین‌رونده و گردابه‌های بالارونده می‌باشد لذا در این محدوده بیشترین اتلاف انرژی از تداخل دو جریان پائین‌رونده و بالارونده که جهت حرکت مخالف دارند حادث می‌گردد. این درگیری دو جریان در آستانه ورود جت به فضای اتاقک بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد چرا که از طرفی جت در آستانه بیشترین سرعت را داراست و از طرفی گردابه‌های بالارونده نیز به بیشترین مقیاس خود

#### بررسی اثر موقعیت جت ورودی

در این مرحله برای بررسی اثر موقعیت جت ورودی به اتاقک اتلاف یک سری شبیه‌سازی‌هایی انجام شد. در شکل (۱۴) نتایج اتلاف انرژی در موقعیت‌های مختلف جت ورودی به اتاقک اتلاف ارائه شده است.



(د)

(ج)

بودن برای تشکیل گردابه ها و جریان های بالارونده با قدرت بیشتر، در ادامه این جریانهای بالارونده نیز به میزان قابل توجهی انرژی جریان را می کاهد.

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر پارامترهایی چون عمق پایاب و قطر لوله ورودی و موقعیت قرارگیری لوله ورودی جت بر میزان استهلاک انرژی در اتافک اتلاف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می دهد دو ناحیه ی رفتاری متفاوت در کاهش سرعت جت در راستای مرکزی (ناحیه هسته پتانسیل و نقصان سرعت شعاعی) مشاهده گردید و با دقت بیشتر در نتایج می توان دریافت که طول این نواحی به ازای عمق پایابهای متفاوت تغییر می کند. بطوریکه که با افزایش عمق پایاب طول این نواحی نیز افزایش می یابد. همچنین رابطه خطی ارائه شده برای ناحیه نقصان شعاعی سرعت نیز تغییر می کند. نکته قابل توجه دیگر بزرگتر بودن ابعاد گردابه ها در سمت چپ نسبت به سمت راست می باشد که علت آن فرار بخشی از جت از لوله خروجی در سمت راست می باشد که این عامل باعث کاهش ابعاد گردابه های سمت راست می گردد. همچنین غالباً با کاهش قطر لوله ورودی، اتلاف انرژی تا حدود ۱۵ درصد افزایش می یابد. البته با کاهش بیش از حد قطر لوله ورودی (یا به عبارتی افزایش بیش از حد ابعاد اتافک اتلاف) این اتافک عملکرد مناسبی نخواهد داشت. بنابراین تعیین قطر بهینه لوله ورودی و یا ابعاد بهینه اتافک اتلاف ضروری بنظر می رسد. همچنین نتایج نشان داد که یک ناحیه مرز مشترک بین دو جریان جت پائین رونده و گردابه های بالارونده بوجود می آید، لذا در این محدوده بیشترین اتلاف انرژی از تداخل دو جریان پائین رونده و بالارونده که جهت حرکت مخالف دارند حادث می گردد. این درگیری دو جریان در آستانه ورود جت به فضای اتافک بیشترین مقدار خود را دارا ی باشد.

رسیده اند و دارای قدرت آشفتگی می باشند. شکل (۱۴-ب) نشان دهنده میزان اتلاف انرژی آشفتگی برای موقعیت جت در مرکز اتافک اتلاف می باشد. همانطوریکه در مشخص می باشد این دو ناحیه مرز مشترک دو جریان جت پائین رونده و گردابه های بالارونده می باشد لذا در این محدوده بیشترین اتلاف انرژی از تداخل دو جریان پائین رونده و بالارونده که جهت حرکت مخالف دارند حادث می گردد. منتهی اتلاف عمقی سرعت در این حالت نسبت به حالت دیواره ها کمتر است. نکته قابل توجه در این شکل بزرگتر بودن ابعاد گردابه ها در سمت چپ نسبت به سمت راست می باشد که علت آن فرار بخشی از جت از لوله خروجی در سمت راست می باشد که این عامل باعث کاهش ابعاد گردابه های سمت راست می گردد. شکل (۱۴-ج) نشان - دهنده نتایج میزان اتلاف انرژی آشفتگی برای جت واقع در گوشه سمت راست دیوار مقابل می باشد. همانطوریکه در مشخص می باشد این ناحیه به علت احاطه شدن از دو طرف توسط دیوارها و برخورد جت با این دیوارها و عدم امکان انحراف جت به اطراف دارای بیشترین اتلاف را می باشد. از طرفی در این ناحیه ابعاد گردابه دارای کمترین ابعاد خواهد بود. چون گردابه ها فضایی برای بزرگ شدن ندارند. شکل (۱۴-د) نشان دهنده میزان اتلاف انرژی آشفتگی برای موقعیت جت واقع در گوشه سمت راست دیوار چسبیده به لوله خروجی می باشد. همانطوریکه در شکل مشخص می باشد این ناحیه به علت محدود شدن از دو طرف توسط دیوارها، برخورد جت با این دیوارها و عدم امکان انحراف جت به اطراف دارای بیشترین اتلاف را می باشد. از طرفی در این ناحیه ابعاد گردابه دارای کمترین ابعاد خواهد بود. چون گردابه ها فضایی برای بزرگ شدن ندارند.

طبق نتایج بدست آمده بیشترین اتلاف انرژی بین ورودی جت و آستانه لوله خروجی مربوط به حالت موقعیت (د) می باشد که علت آن مجاورت با دو دیواره می باشد که بخش قابل توجهی از سرعت جت از دو راستا گرفته می شود و در ادامه با توجه به فضای کافی

تصور و پیش‌بینی‌ها بوده است. بطوریکه طول مقیاس آشفتگی در ترازهای بالاتر از تراز خروجی جت افزایش می‌یابد ولی این افزایش بدلیل عدم تداخل جریان‌ها اثر کاهشی در میزان انرژی ورودی نخواهد داشت. بنابراین تقویت جریان‌های بالارونده شرط کافی برای استهلاک بیشتر انرژی نمی‌باشد، بلکه در صورتی موثر است که در محدوده تداخل جریان‌ها صورت گیرد.

با افزایش عمق پایاب همواره میزان اتلاف انرژی تا ۲۰ درصد افزایش خواهد یافت. این در حالیست که پس از حدی دیگر با افزایش عمق پایاب تغییری محسوس در اتلاف انرژی مشاهده نمی‌شود. بنابراین تعیین عمق پایاب مناسب نیز کمک بسزایی در عملکرد بهینه اتلاف خواهد داشت.

همچنین نتایج نشان می‌دهد طول مقیاس آشفتگی با افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابد. این یافته بر خلاف

### منابع

- Albertson, M., Dai, Y., Jensen, R. and Rouse, H. (1948). "Diffusion of submerged jets". Transactions of the ASCE Paper No. 2409: 639\_664.
- Beltaos, S. and Rajaratnam, N. (1977). "Impingement of axisymmetric developing jets" Journal of Hydraulic Research 14 (4): 311\_326.
- Bohrer, J. G., Abt S.R. and Wittler, R. J. (1998). "Predicting Plunge Pool Velocity Decay of Free Falling, Rectangular Jet". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 10.
- Burattini, P., Antonia, R. A., Rajagopalan, S. and Stephens, M. (2004). "Effect of initial conditions on the near field development of a round jet". Experiments in Fluids, No 37: 56\_64.
- Camino, G. A., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2012). "Jet diffusion inside a confined chamber". Journal of Hydraulic Research Vol. 50, No. 1
- Carvalho, R. F. and Leandro, J. (2012). "Hydraulic Characteristics of a Drop Square Manhole with a Downstream Control Gate". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 138, No. 6.
- Cola, R. (1965). "Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin". Proc. Xxi IAHR congress, Vol. I, paper 1.52, IAHR, Leninegrad, pp. 1-13.
- Ervine, D. A., Falvey, H. R. and Withers, W. (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors". Journal of Hydraulic Research 35(2): 257-279.
- Granata F., DeMarinis G., Gargano R., Hager W. H. (2011). "Performance of Circular Drop Manholes in Ventilation Absence". 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia.
- Gutmark, G., Wolfshtein, M. and Wagnanski, I. (1978). "The plane turbulent impinging jet". Journal of Fluid Mechanics 88(4): 737-756.
- Hartung, F. and Häusler, E. (1973). "Scours on stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams". Proc. of the 11th Congress on Large Dams, Vol. Q41 R3, ICOLD, Madrid, and pp. 39\_56.
- Holdhusen, J. S. (1948). Discussion of "Diffusion of submerged jets" by Albertson et al. (1948), Transactions of the ASCE Paper No. 2409: 665\_671.
- Khatsuria R. M., (2005). "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators". Marcel Dekker Publication,
- Li, P., Zhu, D., Krywiak, D., Yue, D. (2019). "Flow characteristics and energy dissipation of an offset jet in a rectangular storm-water pond" Canadian Water Resources Journal, Vol 44 (3): 307-318
- Liu, P., Li, F. and Yin, W. (2003). "Experimental study on controlling parameters of flow patterns downstream of high dams". Vol. Theme D, IAHR, pp. 839\_844.
- Manso, P., Bollaert, E. and Schleiss, A. J. (2004). "Experimental investigation on high velocity jet characteristics and its influence on plunge pool scour". Hydraulics of dams and river structures, Balkema, Tehran, Iran, pp. 173\_180.
- Martins, R. (1977). "Kinematics of the free jet in the field of hydraulic structures (in Portuguese)". Vol. Memória LNEC No. 486, LNEC, Lisbon.





McKeogh, E. J. and Ervine, D. A. (1981). "Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets". *Chemical Engineering Science* 36: 1161\_1172.

Muler, G., (2020). "Energy dissipation through entrained air compression in plunging jets". *Journal of Hydraulic Research*, Vol 58 (3).

Rakib, Z., Zeng, J., Ansar, M., and Hajimirzaie, S. (2022) "Energy Dissipation Design of Low-Head Hydraulic Structures Using Computational Fluid Dynamics Model. *World Environmental and Water Resources Congress2022*.

Rajaratnam, N. (1976). "Turbulent jets, Vol. 5 of *Developments in Water Science*", Elsevier.

Rajaratnam, N., Johnston, G. A. and Barber, M. A. (1993). Energy dissipation by jet diffusion in stormwater drop shafts, *Canadian Journal of Civil Engineering* 20, 374-379.

Rinaldi, P. and Valentin, F. (2005). "Non-dimensional scaling of turbulent jets in confined spaces". *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Taylor and Francis Group, London, pp. 319\_324.

Tachie, M, F., Clark, Sh., Malenchak J., Muluye, G, Y. (2015) "Experimental study of the flow structures of 3D turbulent offset jets". *Journal of Hydraulic Research*, 53 (6).

Whittaker J. G. and Schleiss A., "Scour Related to Energy Dissipaters for High Head Structures" Zurich, 1984.