



ارزیابی تجربی و عددی عملکرد فلومتر مخروطی با دماغه پیوسته در جریان تک فاز مایع

حسام جزیریان^۱، فرزاد جعفر کاظمی^{۲*}، حمیدرضا ربیعی‌فر^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشیار بازنشسته، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

چکیده

با توجه به اهمیت فزاینده اندازه‌گیری دبی در صنایع، بخصوص در پتروشیمی‌ها و آب و فاضلاب و نیاز آن‌ها به کاهش فضای نصب و بالا بردن دقت، بهبود فلومترهای موجود و تولید انواع جدید ضروری است. فلومتر مخروطی در دو دهه گذشته با ویژگی‌هایی نظیر کاهش طول اولیه مورد نیاز و افت فشار پایین‌تر نسبت به سایر انواع و قابلیت به کارگیری در جریان‌های دوفازی مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین تحقیقات متعددی جهت بهبود هندسه فلومتر صورت پذیرفته است. ولی یکی از مواردی که کمتر به آن پرداخته شده نحوه اتصال پایه فلومتر به بدنه (دماغه فلومتر) می‌باشد. از این رو در این پژوهش اقدام به آزمایش تجربی و حل عددی یک نمونه جدید که دارای دماغه پیوسته می‌باشد، و مقایسه آن با حالات استاندارد شامل نقطه‌ای، منحنی و زانویی شده است. با استفاده از نتایج حاصله از آزمایشات روابطی جهت تخمین افت فشار بین دو حسگر فلومتر و فشار از دست رفته ارائه گردید. محاسبات نشان داد خطای نسبی محاسبه افت فشار در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی ($5/88 \times 10^4$ تا $9/80 \times 10^4$) در حدود $0/73\%$ می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد حالت پیوسته با داشتن بیشترین میزان آشفتگی (حدود $3/5\%$ بیشتر از مقدار کمیته) سبب افزایش نوسانات در مقدار نشان داده شده توسط فشار سنج قرار گرفته در پایین دست جریان و خطا در محاسبه میزان ضریب تخلیه می‌شود. همچنین تغییر شکل دماغه فلومتر فقط سبب تغییراتی جزئی در اندازه گردابه‌ها شده است.

کلمات کلیدی: بررسی تجربی؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ مدلسازی آشفتگی؛ فلومترهای اختلاف فشاری؛ فلومتر مخروطی.

Experimental and numerical study of V-Cone flowmeter with continuous nose in single phase liquid flow

N1. Hesam Jazirian¹, N2. Farzad Jafarkazemi^{2,*}, N3. Hamidreza Rabieefar³

¹ Ph.D. Candidate, Mech. Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Emeritus Assoc. Prof., Mech. Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Assist. Prof., Civil. Eng., South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

With increasing importance of flow measurement in industries, especially in petrochemical and water and wastewater, and their need to reduce the installation space and increase the accuracy, it is necessary to improve the existing flowmeters and produce new types. In the last two decades, the V-Cone flowmeter has received the special attention of researchers with features such as reducing the required initial length, lower pressure drop compared to other types, and the ability to be used in two-phase flows. Also, several researches were done to improve the flowmeter geometry. But one of the things that is less discussed is how to connect the flowmeter stand to the body (flowmeter nose). Therefore, in this research, experimental and numerical study of a new case that has a continuous nose, and comparing it with standard types including pointed, curved and elbow, have been done. Using test results, correlations were proposed to estimate the pressure drop between two flowmeter sensors and the pressure loss. Calculations showed that the relative error of pressure drop calculation in the range of Reynolds numbers investigated (5.88×10^4 to 9.80×10^4) is about -0.73% . Numerical simulation showed that the continuous type with the highest level of disturbance (about 3.5% more than the minimum value) causes the increase of fluctuations in the value shown by the pressure gauge located downstream and the error in the calculation of the discharge coefficient. Also, changing the shape of the flowmeter nose caused only minor changes in the size of the vortices.

Keywords: Experimental study; CFD; Turbulence modeling; Differential pressure flowmeter; V-Cone.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۸۳۸۴۳۳۴۳؛ فکس: ۸۸۸۳۰۸۳۱ (۹۸-۲۱) +

آدرس پست الکترونیک: f_jafarkazemi@azad.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به اهمیت روز افزون اندازه گیری دبی جریان در صنایع، بخصوص صنایع نفت، گاز و آب و نیاز آن‌ها به کاهش فضای نصب و همچنین افزایش دقت، بهینه سازی فلومترهای قدیمی و همچنین ساخت و تولید انواع جدید امری ضروری است. بدین منظور مفهوم فلومتر مخروطی توسط محققان [۱] ارائه گردید. این فلومتر اختلاف فشاری در دو دهه گذشته با ویژگی‌هایی نظیر کاهش طول اولیه مورد نیاز و افت فشار پایین‌تر نسبت به سایر انواع و همچنین قابلیت به کارگیری در جریان‌های دوفازی مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است. سینج و همکاران [۲] عملکرد یک فلومتر مخروطی را در نسبت قطرهای مختلف به عنوان تابعی از عدد رینولدز به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ضریب تخلیه در این نوع از فلومتر تقریباً مستقل از عدد رینولدز می‌باشد. سینج و همکاران [۳] تاثیرات قرارگیری زانویی در بالادست فلومتر مخروطی را در چند حالت مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ضریب تخلیه حتی در اعداد رینولدز بالا آنچنان تحت تاثیر زانویی قرار نمی‌گیرد. بورکار و همکاران [۴] مدل جدیدی از فلومترهای مخروطی با نام فلومتر مخروطی دوطرفه را مورد بررسی قرار دادند. در هندسه مورد مطالعه آن‌ها دو مخروط هم شکل در پایه دایره‌ای خود با فاصله اندکی به یکدیگر متصل شده‌اند. آن‌ها محاسبات خود را در شرایط کاملاً توسعه یافته و در اعداد رینولدز متفاوت تکرار نمودند. ژنگ و همکاران [۵] محاسبه دبی را برای جریان دو فازی مایع-گاز با کسر حجمی پایین گاز که در حال عبور از یک فلومتر مخروطی است، بررسی کردند. آن‌ها توانستند بر مبنای تحلیل‌های آزمایشگاهی خود یک روش اندازه‌گیری آنلاین برای محاسبه دبی فاز مایع در محدوده کسر حجمی ۰ تا ۱۲/۲٪ ارائه دهند. فدایی و همکاران [۶] به مطالعه تجربی و عددی اندازه‌گیری جریان دوفازی با استفاده از دبی سنج روزنه‌ای پرداختند. مطابق با نتایج بدست آمده، افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز باعث افزایش ضریب تخلیه می‌شود. ضمناً آن‌ها نشان دادند در مقایسه با نتایج تجربی، مدل استاندارد کا-اپسیلون نتایج دقیقتری نسبت به سایر مدل‌های آشفستگی ارائه می‌دهد. نصیرالدین و همکاران [۷] تاثیرات بکارگیری یک نیم بیضوی در انتهای فلومتر مخروطی را مورد بررسی عددی قرار دادند. آن‌ها نتایج خود را

برای حالت‌های مختلف قرارگیری نیم بیضوی و در اعداد رینولدز ۱۰^۱ تا ۱۰^۶ مقایسه کردند. نصیرالدین و همکاران [۸] تاثیرات عدد رینولدز و ضخامت لایه مرزی بر روی عملکرد فلومتر مخروطی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا جریان را در لوله بدون در نظر گرفتن وجود فلومتر حل کردند. سپس پروفیل‌های سرعت بدست آمده در مقاطع مختلف را به عنوان شرط مرزی ورودی در تحلیل فلومتر در نظر گرفتند تا بدین صورت اثرات ضخامت لایه مرزی را بررسی کنند. آن‌ها نشان دادند مقدار ضریب تخلیه در اعداد رینولدز بالاتر از ۴۰۰۰ تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین ضخامت لایه مرزی در اکثر مواقع تاثیری بر عملکرد فلومتر ندارد. نصیرالدین و همکاران [۹] فلومتر مخروطی ویفری را به صورت تجربی تحلیل نمودند. بدین منظور از روش ردیابی ذرات بهره بردند. مطابق با نتایج بدست آمده توسط آن‌ها، ضریب تخلیه در این نوع فلومتر در زوایای راس مختلف مستقل از مقدار نسبت قطر معادل می‌باشد. ژائو و همکاران [۱۰] جریان گاز تر گذرنده از فلومتر مخروطی را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آن‌ها توانستند یک راه کار مطمئن و اقتصادی برای اندازه‌گیری چنین جریان‌هایی ارائه دهند. مطابق با نتایج حاصله مدل ارائه شده هنگامی که مقدار پارامتر لاکهارت مارتینلی بین ۰/۲ تا ۰/۱ قرار داشته باشد برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل استاندارد خواهد داشت. لی و بی [۱۱] مدل پیشین خود برای محاسبه دبی گاز در جریان دوفازی گاز تر گذرنده از یک فلومتر مخروطی را بهبود بخشیدند. آن‌ها ضریب دبی جرمی دوفاز که در کارهای قبلی خود [۱۲] تعریف کرده بودند را با استفاده از مدل جریان جدا شده اصلاح نمودند. بدین ترتیب توانستند دامنه کاربرد مدل قبلی خود را گسترده‌تر کنند.

همانگونه که در پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود یکی از نکات مهم در طراحی و ساخت فلومتر مخروطی بهینه سازی هندسه آن می‌باشد. در این زمینه یکی از مواردی که کمتر به آن پرداخته شده نحوه اتصال پایه فلومتر به بدنه (شکل دماغه فلومتر) است. از این رو در این پژوهش اقدام به آزمایش تجربی و حل عددی یک نمونه جدید که دارای دماغه پیوسته می‌باشد، شده است. بدین منظور ابتدا نمونه تحت بررسی در آزمایشگاه میترینگ و پرووینگ مجتمع آموزشی نفت محمود آباد کالیبره شده و مقدار ضریب تخلیه تعیین می‌شود. سپس فلومتر در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی عددی شده و نتایج با

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \quad (2)$$

که در روابط ۱ و ۲، q_m دبی جرمی، C ضریب تخلیه، β نسبت قطر معادل، ϵ ضریب تراکم پذیری، D قطر لوله و d قطر فلومتر در گلوگاه جریان می‌باشد. با توجه به ابعاد مشخص شده روی شکل ۱ مقدار نسبت قطر معادل برابر با ۰/۷۵ است. همچنین از آنجایی که سیال عامل مایع می‌باشد مقدار ضریب تراکم پذیری برابر با ۱ خواهد بود.

۲-۱- روش انجام آزمایش:

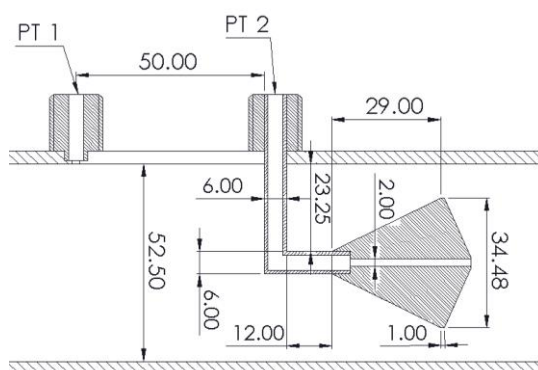
مدار طراحی شده جهت آزمایش مطابق با شکل ۲ می‌باشد. مطابق با شکل، آب موجود در مخزن در شرایط اتمسفریک قرار داشته و توسط پمپ وارد مدار می‌شود. در هر مرحله از آزمایش دبی جریان توسط فلومتر مخروطی اندازه‌گیری و با مقدار نشان داده شده توسط فلومتر مرجع (فلومتر الکترومغناطیسی) مقایسه شود. شکل ۳ نمایی از محل قرار گیری فلومتر مخروطی در آزمایشگاه میتیرنگ و پرووینگ نفت محمود آباد را نشان می‌دهد.

۲-۲- محاسبه ضریب تخلیه

مطابق با شکل ۴ الف، جهت کالیبراسیون فلومتر مخروطی ضریب تخلیه در محدوده اعداد رینولدز $5/88 \times 10^4$ تا $9/80 \times 10^4$ محاسبه شد. بدین منظور افت فشار بین دو حسگر فلومتر با استفاده از ترنسمیتر اختلاف فشار اندازه گرفته می‌شود. سپس با جایگذاری این مقدار و دبی اندازه گیری شده توسط فلومتر مرجع در روابط ۱ و ۲ مقدار ضریب تخلیه محاسبه می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تغییرات مقدار این ضریب کوچک بوده و در محدوده ۰/۸۱۶ تا ۰/۸۲۸ قرار گرفته است. بنابراین با مقایسه مقدار متوسط ضریب تخلیه حاصل از آزمایش (۰/۸۲۱) با مقدار ارائه شده در استاندارد ۵- ISO ۵۱۶۷ [۱۳] (۰/۸۲) می‌توان نتیجه گرفت فلومتر مخروطی حاضر با آنکه از لحاظ هندسی با فلومترهای تعریف شده در استاندارد متفاوت است ولی عملکردی مشابه آنان ارائه داده است.

داده‌های تجربی مقایسه می‌گردد. در نهایت جهت تعیین شکل بهینه دماغه، حل عددی برای سایر حالت‌های ذکر شده در استاندارد ISO ۵۱۶۷-۵ [۱۳] شامل حالت‌های نقطه‌ای^۱، منحنی^۲ و زانویی^۳ تکرار می‌شود. در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که از میان هندسه‌های موجود در استاندارد از بررسی حالت تخت^۴ به علت شباهت نسبی با هندسه مورد مطالعه (دماغه پیوسته) صرف نظر شده است.

۲- کالیبراسیون فلومتر و تعیین ضریب تخلیه



شکل ۱- هندسه فلومتر مخروطی دماغه پیوسته (تمام ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

شکل ۱ فلومتر مخروطی تحت آزمایش را نشان می‌دهد. این فلومتر از نوع اختلاف فشاری بوده که بر خلاف موارد مذکور در استاندارد ISO ۵۱۶۷-۵ [۱۳] دارای دماغه پیوسته می‌باشد. این امر سبب می‌شود که نتوان آن را جز موارد استاندارد در نظر گرفت. در این گروه از فلومترها دبی تئوری با اندازه‌گیری اختلاف فشار بین بالا دست و پایین دست فلومتر و قرار دادن آن در معادله برنولی، محاسبه می‌شود. سپس با ضرب این مقدار در ضریب تخلیه، دبی حقیقی بدست می‌آید. مطابق با استاندارد [۱۳] جهت محاسبه جریان جرمی از روابط ۱ و ۲ استفاده می‌شود.

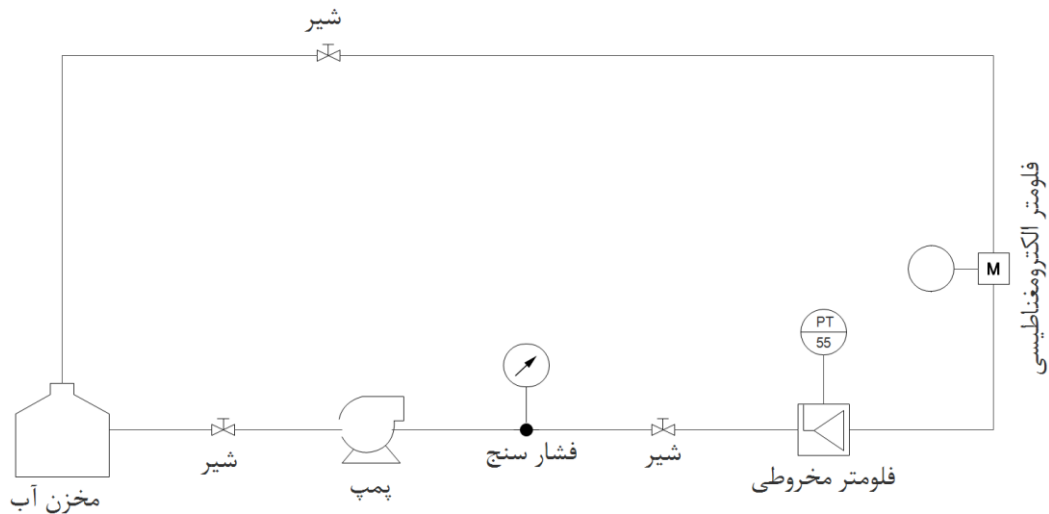
$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} (D\beta)^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (1)$$

³ Elbow

⁴ Flat

¹ Pointed

² Curved



شکل ۲- مدار طراحی شده جهت آزمایش‌ها

می‌تواند در زمان‌هایی که دسترسی به فشار سنجهای مناسب جهت اندازه‌گیری افت فشار وجود ندارد یا در مواردی که از فلومتر مخروطی به عنوان میکسر استفاده می‌شود، بکار گرفته شود.

$$\Delta p_{cone} = 3.0603 \frac{\rho v_{ave}^2}{2} + 0.0448 \quad (3)$$

محاسبات نشان داد خطای نسبی رابطه ۳ در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی ($5/88 \times 10^4$ تا $9/80 \times 10^4$) در حدود ۰/۷۳٪ می‌باشد.

مطابق با استاندارد ISO ۵۱۶۷-۵ [۱۳] جهت تخمین فشار از دست رفته (افت فشار بین ۱D بالادست و ۶D پایین دست فلومتر) از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$\Delta p_{loss} = (1.09 - 0.813\beta)\Delta p_{cone} \quad (4)$$

با بکارگیری رابطه ۴ فشار از دست رفته در محدوده ۰/۹۴ تا ۲/۵۵ kPa قرار خواهد گرفت. بنابراین رابطه ۵ با ترکیب روابط ۳ و ۴ جهت محاسبه این کمیت پیشنهاد می‌شود.

$$\Delta p_{loss} = 1.46 \frac{\rho v_{ave}^2}{2} + 0.0214 \quad (5)$$

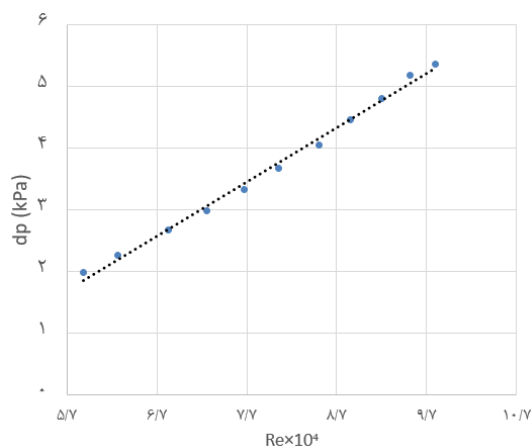
جهت محاسبه درصد خطای نسبی اندازه‌گیری دبی توسط فلومتر مخروطی از رابطه ۶ استفاده می‌شود.

$$RE\% = \frac{q_{mcone} - q_{mem}}{q_{mem}} \times 100 \quad (6)$$

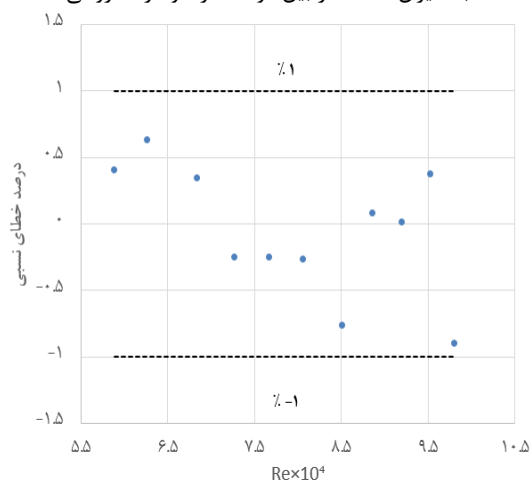


شکل ۳- محل نصب فلومتر مخروطی

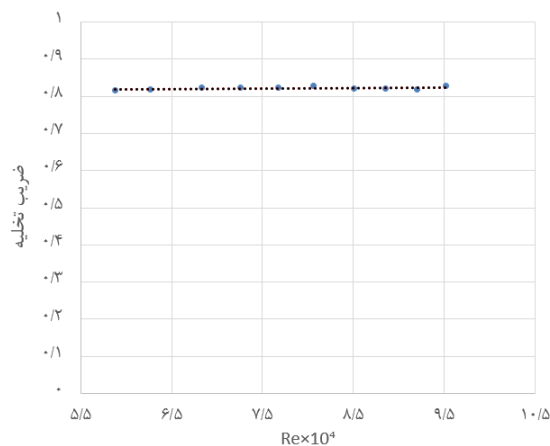
شکل ۴ ب میزان اختلاف فشار بین دو حسگر فلومتر مخروطی را نشان می‌دهد. با مشاهده دقت بالای فلومتر مخروطی، نیاز آن به طول ورودی کم (در حدود $5D$) [۸] و همچنین با در نظر گرفتن این نکته که افت فشار در این فلومتر بسیار کمتر از اکثر فلومترهای اختلاف فشاری موجود در صنایع می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت فلومتر مخروطی از لحاظ تئوری گزینه بسیار مناسبی جهت استفاده در صنایع می‌باشد. در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که افت فشار پایین در این فلومتر سبب شده جهت اندازه‌گیری اختلاف فشار نیاز به دستگاه‌های بسیار دقیق و با حساسیت بالا باشد. همچنین با توجه به رفتار تغییرات افت فشار بر حسب فشار دینامیکی در شکل ۴ ج، رابطه ۳ جهت تخمین افت فشار (بر حسب کیلو پاسکال) در فلومتر مخروطی پیشنهاد می‌گردد. این معادله



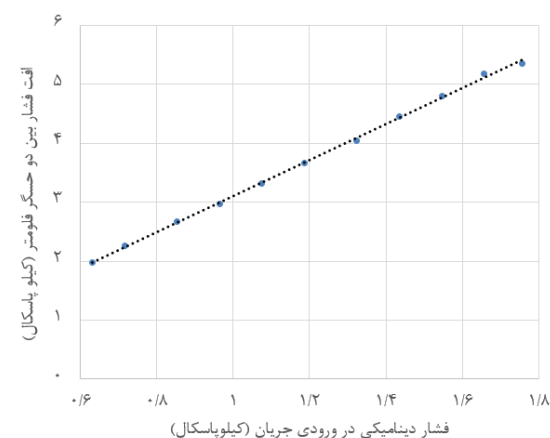
ب) میزان افت فشار بین دو حسگر فلومتر مخروطی



د) درصد خطای نسبی محاسبه دبی



الف) منحنی تغییرات ضریب تخلیه بر حسب عدد رینولدز



ج) تغییرات افت فشار بر حسب فشار دینامیکی

شکل ۴- نتایج آزمایشات انجام شده

کنار آزمایش تجربی انجام می‌شود. مراحل شبیه سازی عددی در ذیل شرح داده شده‌اند.

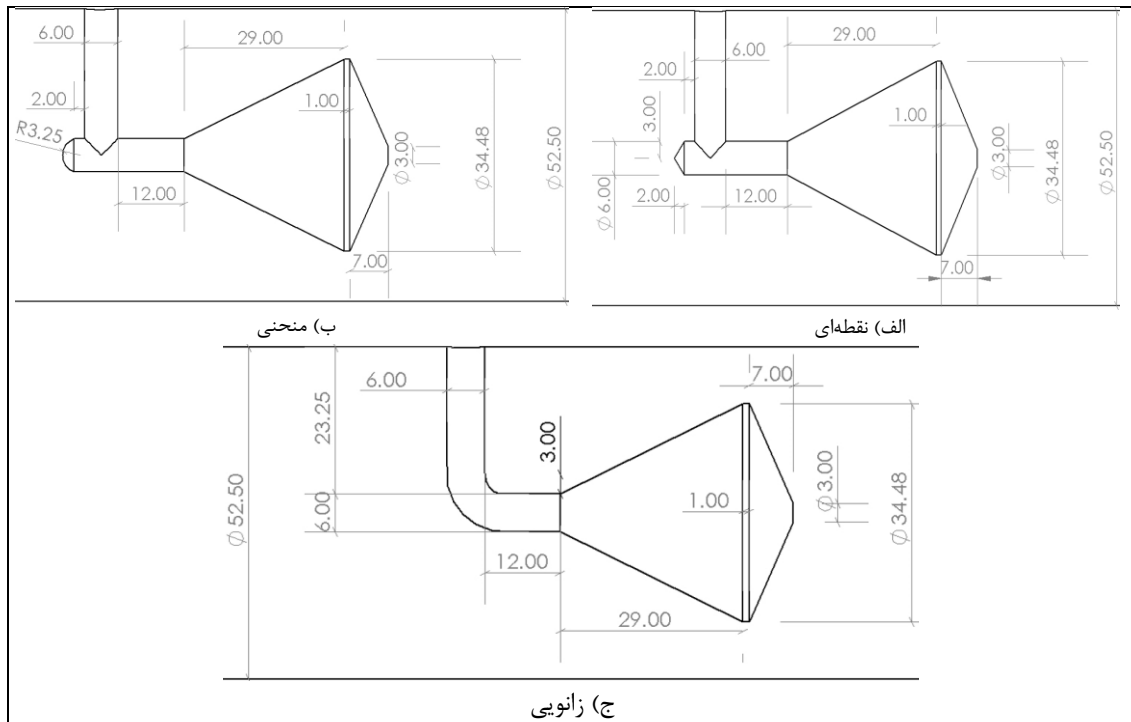
۳-۱- مدل فیزیکی

هندسه‌های مختلف فلومتر مخروطی شامل دماغه پیوسته، نقطه‌ای، منحنی و زانویی در نرم افزار سالید ورکس تولید شده و در شکل‌های ۱ و ۵ مشاهده می‌شوند. در تمامی حالات مورد بررسی با توجه به پژوهش‌های سینج و همکاران [۸] و جزئیات و همکاران [۱۴] طول بالادست فلومتر ۵D و پایین دست ۳D در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ د درصد خطای نسبی محاسبه دبی به وسیله فلومتر مخروطی بر حسب عدد رینولدز ورودی رسم شده است. همانگونه که مشهود است خطای اندازه‌گیری کوچک بوده و در محدوده $\pm 1\%$ قرار گرفته است.

۳- مدلسازی عددی

از آنجایی که پژوهش‌های تجربی دارای محدودیت‌هایی بوده که مشاهده و تعیین برخی مشخصات جریان نظیر میدان سرعت، میزان آشفتگی جریان، ساختارهای جریان و ... بسیار پر هزینه یا غیر ممکن می‌باشد لزوم توجه به مطالعات عددی امری ضروری است. بدین منظور در این مقاله حل عددی در



شکل ۵- سایر هندسه‌های مورد بررسی (تمامی ابعاد به میلی‌متر می‌باشند)

۳-۲- معادلات حاکم

جهت شبیه‌سازی سه بعدی جریان تک فاز، مطابق با روابط ۷ تا ۱۰ معادلات حاکم شامل پیوستگی و مومنتوم به همراه معادلات مدل آشفتگی $k-\omega$ SST که در پژوهش‌های پیشین [۱۴، ۱۵] کارکرد مناسب خود را در جریان‌های گذرنده از یک فلومتر مخروطی نشان داده است، با فرض آنکه متغیرهای متوسط نسبت به زمان دچار تغییرات نمی‌شوند (جریان ایستگاهی) و تراکم ناپذیری جریان، بکار گرفته می‌شوند.

$$\frac{\partial \bar{u}_j \omega}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\gamma}{\mu_t} P_k - \beta \omega^2 \quad (10)$$

که در رابطه ۱۰ خواهیم داشت:

$$P_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که جهت بکارگیری مدل آشفتگی $k-\omega$ SST سلول چسبیده به دیواره بایستی در زیر لایه آرام قرار گیرد. بدین منظور بایستی مقدار فاصله بی بعد شده سلول نخست از دیواره y^+ کمتر از ۱ باشد. این امر با اصلاح شبکه به صورت خودکار توسط نرم افزار

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} (P_k - \beta^* \omega k) \quad (9)$$

دیواره داخلی لوله و فلومتر

شرط مرزی عدم لغزش برای دیواره لوله و فلومتر بکار گرفته شده است. بنابراین در این مرزها مقدار تمامی مولفه‌های بردار سرعت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

شرایط مرزی آشفتگی

جهت تعیین شرایط مرزی معادلات آشفتگی، میزان قطر هیدرولیکی برابر ۵۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده و میزان شدت آشفتگی از رابطه ۱۴ تعیین می‌شود. با تعیین این دو پارامتر در ورودی جریان سایر مقادیر مورد نیاز با توجه به مدل آشفتگی بکار گرفته شده، توسط نرم افزار محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{16}{Re^{1/8}} \quad (14)$$

۴- حل عددی

۴-۱- تولید شبکه

مطابق با شکل ۶ شبکه محاسباتی سه بعدی و از نوع مثلثی/ترکیبی^۲ بوده که جهت تولید آن از نرم افزار ANSYS FLUENT بهره گرفته شده است. با ورود به نرم افزار FLUENT شبکه به چند وجهی^۴ تغییر یافته است. این عمل سبب کاهش تعداد سلول‌ها و افزایش سرعت پردازش می‌شود در حالیکه بر دقت حل مسئله تاثیر آنچنانی نمی‌گذارد. همچنین جهت بهبود محاسبات در مناطق با گرادیان‌های شدید شبکه محاسباتی در محدوده دیواره‌ها و از دماغه تا فاصله ۵D از انتهای فلومتر کوچکتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. جهت تعیین کیفیت شبکه محاسباتی از معیار کیفیت المان^۵ بهره گرفته می‌شود. مقدار این پارامتر بین ۰ تا ۱ بوده و مزیت آن نسبت به سایر معیارهای موجود، در ترکیبی بودن آن و در نظر گرفتن تمامی جوانب یک شبکه محاسباتی در یک کمیت می‌باشد. رابطه ۱۵ تعریف کیفیت المان برای یک شبکه سه بعدی را نشان می‌دهد.

$$Q = C \left[V / \sqrt{\left[\sum (L)^2 \right]^3} \right] \quad (15)$$

فلوننت پس از طی مرحله حدس اولیه ترکیبی^۱ و تعیین توزیع سرعت با استفاده از معادله لاپلاس، صورت می‌گیرد.

۳-۳- شرایط مرزی

ورودی

مطابق با رابطه ۱۱ با استفاده از قانون توان [۱۶] پروفیل سرعت توسعه یافته در مرز ورودی تخمین زده می‌شود.

$$v = \frac{v_{ave}}{2} \left(\frac{1}{n_0} + 1 \right) \left(\frac{1}{n_0} + 2 \right) \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{n_0} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، v پروفیل سرعت، v_{ave} سرعت متوسط و $\frac{r}{R}$ نسبت مختصات شعاعی به شعاع لوله در ورودی بوده و ضریب n_0 مطابق با نتایج تجربی [۱۷] برابر با ۷ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مطابق با رابطه ۱۲ مقدار سرعت متوسط از مقادیر دبی جرمی اندازه‌گیری شده توسط فلومتر الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود.

$$v_{ave} = \frac{\dot{m}_{em}}{\rho A} \quad (12)$$

همچنین در تمامی روابط خواص سیال ثابت در نظر گرفته شده و برای شرایط عملکردی ۱ atm و ۲۰°C خواهیم داشت:

$$\rho = 998.2 \frac{kg}{m^3} \text{ و } \mu = 1.003 \times 10^{-3} \frac{kg}{m.s}$$

خروجی

در انتهای لوله از شرط مرزی جریان خروجی^۲ بهره گرفته می‌شود. این شرط هنگامی به کار گرفته می‌شود که مقدار سرعت و فشار در مرز خروجی مشخص نباشد. مطابق با رابطه ۱۳ با توجه به آنکه در این پژوهش مرز خروجی به اندازه کافی از فلومتر دور است این شرط تبدیل به شرط گرادیان صفر در جهت افقی می‌شود.

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{outlet} = 0 \quad (13)$$

⁴ Polyhedral

⁵ Element quality

¹ Hybrid Initialization

² Outflow Boundary Condition

³ Tet/Hyb

در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که بعد از ورود شبکه تولید شده به نرم افزار فلونت، معیار همگرایی با توجه به آنکه جریان در قسمت پشتی فلومتر شدیداً آشفته بوده و نیاز به تعریف معیاری می‌باشد که علاوه بر ایجاد دقت بالا امکان رسیدن به آن در تمامی مسائل تعریف شده وجود داشته باشد، برای همه پارامترها برابر با 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- بررسی استقلال حل از شبکه

همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود جهت بررسی استقلال حل از شبکه، ۵ شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده و ضریب تخلیه برای هر کدام و در عدد رینولدز برابر $9/2 \times 10^4$ با مقدار تجربی (۰/۸۲۱) مقایسه گردیده است. ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد سلول‌ها از مورد ۴ به ۵ خطای نسبی محاسبه ضریب تخلیه کمتر از ۰/۲ درصد تغییر داشته است. بنابراین شبکه شماره ۴ به عنوان شبکه محاسباتی نهایی این پژوهش انتخاب می‌شود.

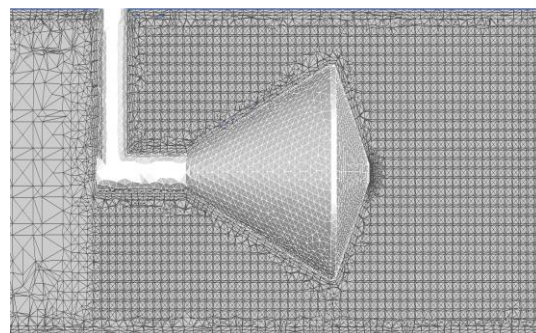
۴-۳- اعتبار سنجی

همانگونه که در قسمت پیشین مشاهده شد میزان خطای نسبی محاسبه ضریب تخلیه در محدوده مناسبی قرار گرفته است. جهت بررسی بیشتر مطابق با جدول ۳، این پارامتر در ۴ عدد رینولدز دیگر نیز محاسبه شده و با مقادیر تجربی نشان داده شده در شکل ۴ مقایسه گردیده است. انتخاب این اعداد به گونه‌ای بوده که تمامی بازه اعداد رینولدز مورد بررسی در این پژوهش تحت پوشش قرار گیرد. بنابراین از آنجایی که خطای نسبی برای تمامی موارد مورد بررسی کمتر از ۰/۵٪ می‌باشد، می‌توان گفت شبیه سازی عددی حاضر قابل قبول می‌باشد. در اینجا ذکر این نکته حائز اهمیت است که با افزایش عدد رینولدز و به دنبال آن نزدیک‌تر شدن جریان به جریان آشفته کاملاً توسعه یافته و کاهش نوسانات میزان خطای نسبی محاسبه ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. ولی به علت عواملی نظیر خطای قطع^۱، خطای مدلسازی به خصوص در معادلات آشفتگی و در نظر نگرفتن عوامل مخل جریان مانند اتصالات قبل و بعد از فلومتر وجود مقداری خطا اجتناب ناپذیر است.

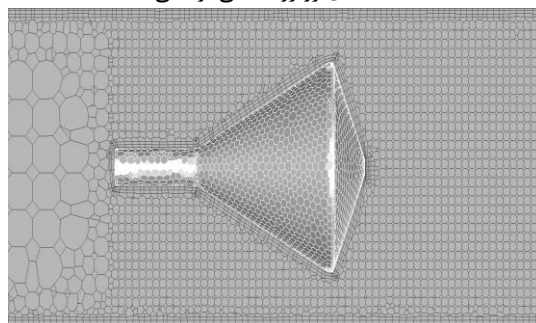
که در این رابطه C یک مقدار ثابت بوده که با توجه به نوع سلول تعیین می‌شود. همچنین عبارات V و L به ترتیب بیانگر حجم سلول و طول هر ضلع آن می‌باشند. مقدار کمینه پیشنهادی برای کیفیت المان معمولاً در حدود ۰/۳ می‌باشد. مطابق با جدول ۱ کیفیت تمامی شبکه‌های تولیدی در محدوده نسبتاً مناسبی قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- کیفیت شبکه‌های محاسباتی

شکل دماغه	محدوده کیفیت	سلول‌ها با کیفیت کمتر از ۰/۳	توضیحات
زانویی	۰/۳۳ تا ۱	-	-
منحنی	۰/۳۲ تا ۱	-	-
نقطه‌ای	۰/۲۹ تا ۱	۸	در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۳
پیوسته	۰/۲۹ تا ۱	۷	در محدوده ۰/۲۹ تا ۰/۳۳



الف) نمای روبرو (مثلی/ ترکیبی)

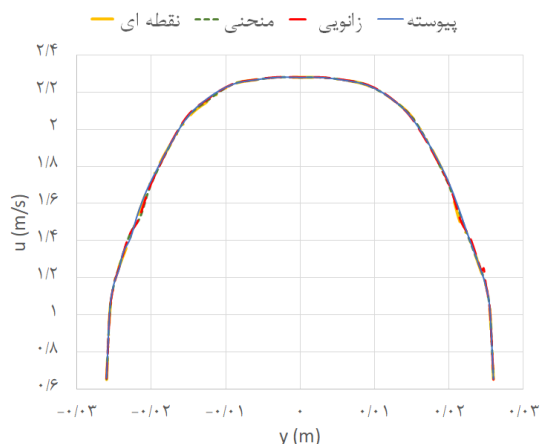


ب) نما از بالا (چند وجهی)
شکل ۴- شبکه محاسباتی

^۱ Truncation error

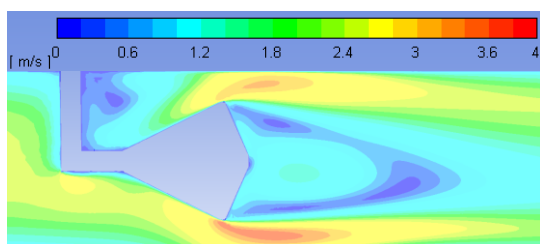
۵-۲- تغییرات فشار استاتیکی در طول لوله

در شکل ۹ تغییرات فشار استاتیکی در دیواره بالایی لوله رسم شده است. ملاحظه می‌شود نقطه کمینه فشار در حالات نقطه-ای و منحنی اندکی (حدود ۰/۱ کیلو پاسکال در محل سوراخ فشار سنج دوم) بالاتر از سایر هندسه‌ها می‌باشد. این امر گرچه در حالت نظری مفید بوده و سبب کاهش نیاز به وسایلی نظیر پمپ جهت جبران کاهش فشار می‌شود اما باعث می‌شود فشارسنج‌های دقیق‌تر و با حساسیت بالاتر نیاز باشد. همچنین بر خلاف نمونه‌های معمول افزایش سطح مقطع بعد از گلوگاه ناگهان روی نداده و یک سطح افقی به طول ۱ میلی‌متر در این ناحیه وجود دارد. با ثابت نگه داشتن سطح مقطع در این ناحیه یک وقفه کوتاه در روند کاهش فشار به وجود آمده است.



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت محوری در محل قرارگیری

سوراخ فشارسنج اول برای $Re=9/2 \times 10^4$



شکل ۸- توزیع سرعت در صفحه $z=0$ و برای $Re=9/2 \times 10^4$

۵-۳- توزیع آشفتگی

با مشاهده کانتور تغییرات مجذور انرژی جنبشی آشفتگی در شکل ۱۰ می‌توان گفت به علت متفاوت بودن سرعت‌ها در دو لبه انتهایی فلومتر (محل کوچکترین سطح مقطع) و جریان

جدول ۲- بررسی استقلال حل از شبکه

مورد	مثلی/ ترکیبی	چند وجهی	$C_{d_{num.}}$	$RE\%^*$
۱	۲۰۰۷۶۸۸	۶۳۰۷۲۵	۰/۸۷۳	۶/۳۰
۲	۳۰۰۰۴۳۷	۹۰۴۱۵۶	۰/۸۷۰	۵/۹۵
۳	۳۳۷۱۵۴۵	۱۰۹۱۲۲۷	۰/۸۶۴	۵/۲۰
۴	۴۵۷۰۳۴۶	۱۳۳۹۱۵۹	۰/۸۵۹	۴/۵۹
۵	۶۹۵۲۹۸۶	۱۹۸۱۹۳۸	۰/۸۶۰	۴/۷۵

$RE\% = \frac{C_{d_{num.}} - C_{d_{exp.}}}{C_{d_{exp.}}} \times 100$

جدول ۳- اعتبار سنجی نتایج عددی

عدد رینولدز	$C_{d_{num.}}$	$C_{d_{exp.}}$	$RE\%$
$5/9 \times 10^4$	۰/۸۵۸	۰/۸۱۸	۴/۸۵
$7/3 \times 10^4$	۰/۸۵۸	۰/۸۲۳	۴/۲۸
$8/5 \times 10^4$	۰/۸۵۹	۰/۸۲۷	۳/۸۱
$9/2 \times 10^4$	۰/۸۵۹	۰/۸۲۱	۴/۵۹
$9/8 \times 10^4$	۰/۸۵۹	۰/۸۲۸	۳/۷۱

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تغییرات اندازه سرعت

در شکل ۷ پروفیل سرعت محوری در مرکز لوله و در محل قرارگیری سوراخ فشار سنج اول برای ۴ هندسه مورد بررسی نشان داده شده است. مطابق با شکل ملاحظه می‌شود توزیع سرعت در حالت‌هایی که دارای لبه‌های تیز بوده‌اند (نقطه‌ای و پیوسته) مقداری یکنواخت‌تر از دو حالت دیگر می‌باشند. این امر سبب می‌شود که جریان به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر شده و می‌توان پیش‌بینی کرد مقدار ضریب تخلیه برای این شکل‌ها در سایر اعداد رینولدز نوسانات کمتری نسبت به سایر موارد مورد بررسی داشته باشد.

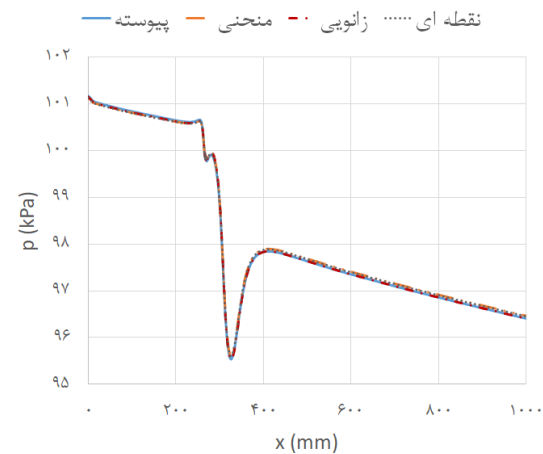
شکل ۸ کانتور تغییرات اندازه سرعت در عدد رینولدز برابر $9/2 \times 10^4$ را نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رفت سرعت در کناره‌های فلومتر افزایش یافته ولی بیشینه سرعت مقداری جلوتر از گلوگاه رخ داده است. همچنین پایه نگهدارنده فلومتر بر خلاف پژوهش‌های پیشین [۱۴، ۱۵] با کوچکتر شدن قطر لوله و ابعاد فلومتر، باعث عدم تقارن کانتور سرعت در قسمت بالایی و پایینی لوله و کاهش شتاب گیری جریان در قسمت بالایی شده است.

بیشینه مربوط به ناحیه قرمز رنگ مورد بحث در شکل ۱۰ می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که حالت پیوسته با داشتن لبه‌های مسطح و یکنواخت در دماغه خود بیشترین میزان آشفتگی (حدود ۳/۵٪ بیشتر از حالت منحنی) را در پایین دست جریان دارند. این افزایش در کارهای تجربی سبب افزایش نوسانات در مقدار نشان داده شده توسط فشار سنج دوم و در نتیجه خطا در محاسبه میزان ضریب تخلیه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در پژوهش‌های آزمایشگاهی هندسه منحنی با کمترین افزایش در میزان آشفتگی بیشترین دقت را نسبت به سایر موارد مورد بررسی خواهد داشت.

پایین دست، جریان ناپایدار شده و جریانی مشابه با جریان لایه برشی آزاد^۱ ایجاد می‌شود. همچنین وجود پایه نگهدارنده فلومتر از یک طرف سبب افزایش آشفتگی در نواحی اطراف خود شده ولی از طرف دیگر با بلوکه کردن جریان و کاهش سرعت باعث کاهش انرژی جنبشی آشفتگی در قسمتی از پایین دست فلومتر (ناحیه سبز رنگ در قسمت پشتی مخروط) شده است. در قسمت‌هایی که تحت تاثیر پایه نبوده‌اند ملاحظه می‌شود که جریان به راحتی شتاب گرفته و یک ناحیه شدیداً آشفته در پایین دست جریان (ناحیه قرمز رنگ در قسمت پشتی مخروط) ایجاد کرده است.

جدول ۴- محدوده انرژی جنبشی آشفتگی

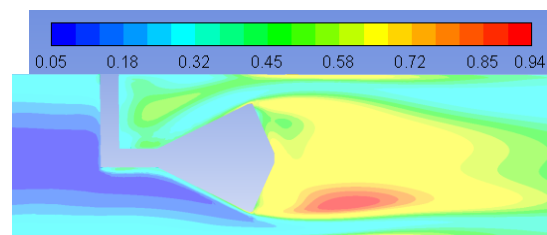
محدوده انرژی جنبشی آشفتگی (m ² /s ²)	هندسه فلومتر
۰/۸۶۳ تا ۰/۰۰۲	نقطه‌ای
۰/۸۵۴ تا ۰/۰۰۲	منحنی
۰/۸۷۴ تا ۰/۰۰۲	زانویی
۰/۸۸۴ تا ۰/۰۰۲	پیوسته



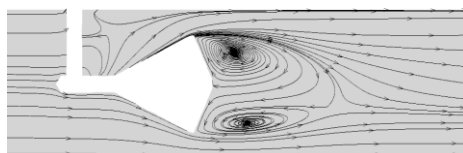
شکل ۹- منحنی تغییرات فشار استاتیکی در طول لوله و برای $Re=9/2 \times 10^4$

۴-۵- ساختارهای جریان

شکل ۱۱ و ۱۲ نمایی از خطوط جریان در صفحات $z=0$ و $y=0$ را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود با نزدیک شدن جریان به انتهای فلومتر، لایه مرزی از سطح جدا شده و ذرات سیال به محوطه پشت مخروط نفوذ کرده و گردابه‌هایی نظیر آنچه در جریان پشت یک استوانه ایجاد می‌گردد را به وجود می‌آورند. همچنین گردابه بالایی سبب شده کم شدن ارتفاع گردابه زیرین در صفحه $z=0$ و کشیدگی بیشتر آن در طول لوله شده ولی اندازه این گردابه‌ها در صفحه $y=0$ تقریباً یکسان است. در نهایت می‌توان گفت تغییر شکل دماغه فلومتر تاثیر خاصی بر ساختار گردابه‌ها در پایین دست فلومتر نداشته و فقط تغییراتی جزئی در اندازه آن‌ها رخ داده است.



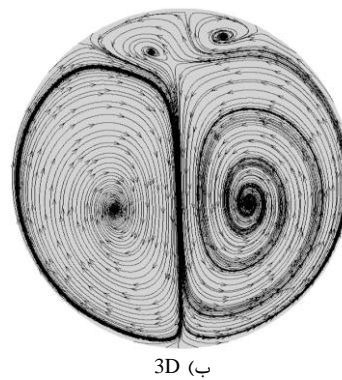
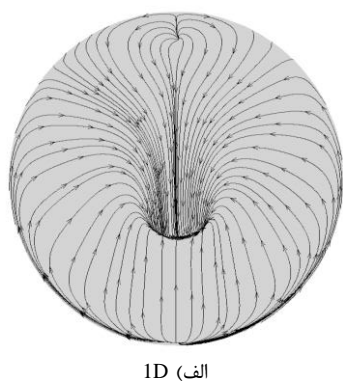
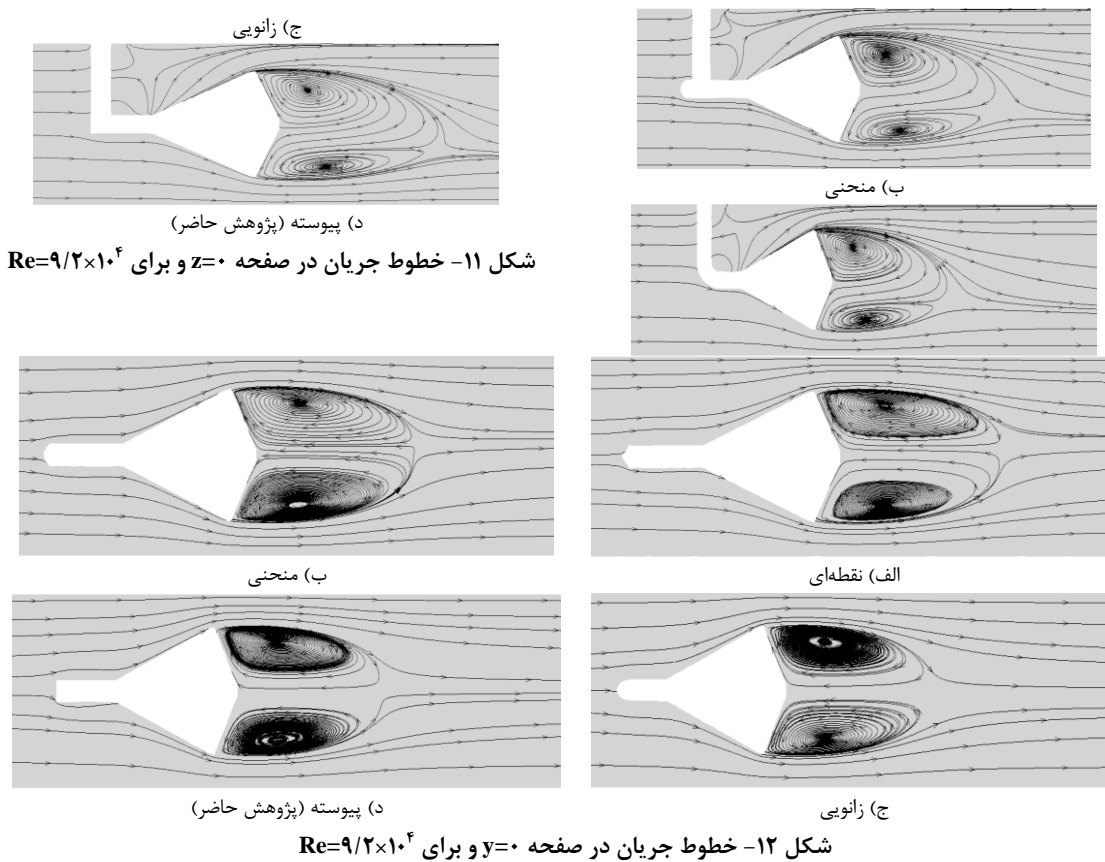
شکل ۱۰- توزیع مجدد انرژی جنبشی آشفتگی (m/s) برای حالت دماغه پیوسته در صفحه $z=0$ و برای $Re=9/2 \times 10^4$

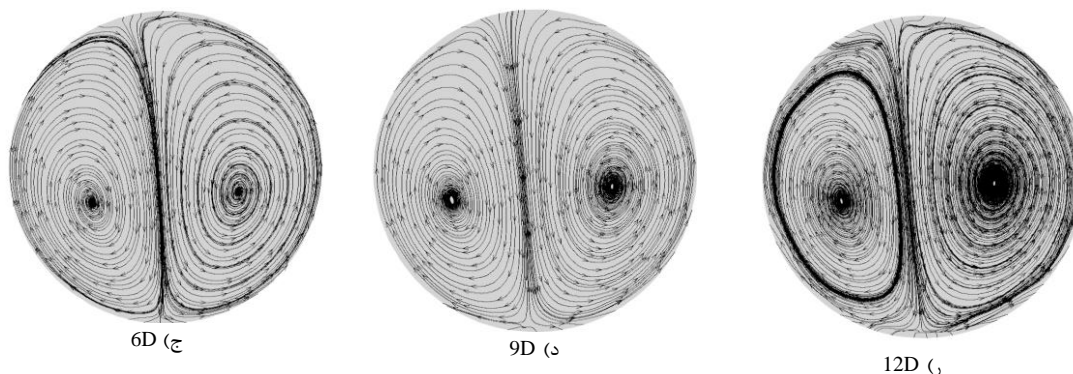


الف) نقطه‌ای

جهت بررسی و مقایسه بهتر هندسه‌های مورد مطالعه محدوده عددی انرژی جنبشی آشفتگی در جدول ۴ برای $Re=9/2 \times 10^4$ نشان داده شده است. مشخص است که مقدار

^۱ Free Shear Layer Flow





شکل ۱۳- خطوط جریان در صفحه $y-z$ برای $Re=9/2 \times 10^4$

نتایج با داده‌های تجربی مقایسه گشت. در نهایت جهت تعیین شکل بهینه دماغه، حل عددی برای سایر حالت‌های ذکر شده در استاندارد ISO ۵۱۶۷-۵ [۱۳] شامل حالت‌های نقطه‌ای، منحنی و زانویی تکرار گردید. نتایج حاصله عبارتند از:

۱- مطابق با نتایج آزمایشگاهی حداکثر مقدار افت فشار و فشار از دست رفته به ترتیب برابر $5/36 \text{ kPa}$ و $2/55 \text{ kPa}$ می‌باشد. این مقدار پایین در مقایسه با سایر انواع رایج سبب شده جهت اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو حسگر فلومتر مخروطی نیاز به دستگاه‌های بسیار دقیق و با حساسیت بالا باشد.

۲- روابطی تجربی جهت تخمین افت فشار بین دو حسگر فلومتر و فشار از دست رفته ارائه گردید. محاسبات نشان داد خطای نسبی محاسبه افت فشار در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی ($5/88 \times 10^4$ تا $9/80 \times 10^4$) در حدود $0/73\% -$ می‌باشد.

۳- با یکنواخت تر بودن پروفیل سرعت در هندسه‌های نقطه‌ای و پیوسته در محل قرارگیری سوراخ فشار سنج اول می‌توان پیشبینی کرد مقدار ضریب تخلیه برای این حالات در سایر اعداد رینولدز نوسانات کمتری نسبت به دو حالت دیگر داشته باشد.

۴- پایه نگهدارنده فلومتر با کوچکتر شدن قطر لوله و ابعاد فلومتر، باعث عدم تقارن کانتور سرعت در قسمت بالایی و پایینی لوله و کاهش شتاب گیری جریان در قسمت بالایی شده است.

۵- کمتر بودن افت فشار در حالات نقطه‌ای و منحنی نسبت به سایر هندسه‌ها گرچه در حالت نظری مفید بوده و سبب کاهش نیاز به وسایلی نظیر پمپ جهت جبران کاهش فشار

در شکل ۱۳ روند توسعه ساختارهای عرضی جریان نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در ابتدا و در فاصله ۱D از انتهای فلومتر برخورد جریان به مخروط سبب انحراف خطوط عرضی جریان شده است. پس از طی فاصله ۳D این انحراف سبب ایجاد دو گردابه بزرگ در قسمت پایینی و دو گردابه کوچک در قسمت بالایی لوله گردیده است. پس از طی مسافت ۶D گردابه‌های بزرگ و کوچک در سمت چپ و راست لوله به یکدیگر پیوسته و بعد از آن دیگر تغییری در ساختار گردابه‌ها ایجاد نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت فلومتر مخروطی حاضر (دماغه پیوسته) در حالت کاملاً توسعه یافته سبب ایجاد دو گردابه غیر متقارن در صفحه $y-z$ شده است. این گردابه‌ها به علت نیروی جاذبه، بیشتر به سمت پایین لوله متمایل بوده و اندازه آن در سمت راست لوله بیشتر است.

در نهایت می‌توان گفت همانگونه که انتظار می‌رفت و در اشکال ۱۱ تا ۱۳ به خوبی قابل مشاهده است فلومتر مخروطی به خوبی سبب اختلاط جریان می‌شود. از همین روی در بسیاری از کاربردهای صنعتی از آن به عنوان مخلوط کن (میکسر) استفاده می‌شود.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به آزمایش تجربی و حل عددی یک نمونه جدید از فلومتر مخروطی که دارای دماغه پیوسته می‌باشد، پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا نمونه تحت بررسی در آزمایشگاه میترینگ و پرووینگ مجتمع آموزشی نفت محمود آباد کالیبره شده و مقدار ضریب تخلیه تعیین گردیده است. سپس فلومتر در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی عددی شده و

نسبت قطر معادل	β	شدت آشفتنگی	I
ضریب تراکم پذیری	ε	انرژی جنبشی آشفتنگی، m^2/s^2	k
ویسکوزیته دینامیکی، kg/m.s	μ	دبی جرمی اندازه گیری شده توسط فلومتر الکترومغناطیسی، kg/s	\dot{m}_{en}
ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s	ν	فشار استاتیکی، Pa	p
چگالی، kg/m^3	ρ	سوراخ فشار سنج اول	P T_1 P
نرخ اضمحلال آشفتنگی، m^2/s^3	ω	سوراخ فشار سنج دوم دبی جرمی، kg/s	T_2 q_m

می شود اما باعث می شود فشارسنج های دقیق تر و با حساسیت بالاتر نیاز باشد.

۶- حالت پیوسته با داشتن لبه های مسطح و یکنواخت در دماغه خود بیشترین میزان آشفتنگی را در پایین دست جریان دارند. این افزایش در کارهای تجربی سبب افزایش نوسانات در مقدار نشان داده شده توسط فشار سنج دوم و در نتیجه خطا در محاسبه میزان ضریب تخلیه می شود.

۷- هندسه منحنی با کمترین افزایش در میزان آشفتنگی بیشترین دقت در محاسبه ضریب تخلیه را نسبت به سایر موارد مورد بررسی خواهد داشت.

۸- تغییر شکل دماغه فلومتر تاثیر خاصی بر ساختارهای جریان در پایین دست نداشته و فقط تغییراتی جزئی در اندازه گردابه ها رخ داده است.

۹- فلومتر مخروطی دماغه پیوسته در حالت کاملاً توسعه یافته سبب ایجاد دو گردابه غیر متقارن در صفحه y-z شده است. این گردابه ها به علت نیروی جاذبه بیشتر به سمت پایین لوله متمایل بوده و اندازه آن در سمت راست لوله بیشتر است.

مراجع

- [1] Miller RW (1989) Flow Measurement Engineering Handbook. second ed. McGraw Hill Publishing Company, New York, pp. 7.1-7.8.
- [2] Singh SN, Seshadri V, Singh RK, Gawhade R (2006) Effect of upstream flow disturbance on the performance characteristics of a V-Cone flowmeter, Flow Meas. Instrum. 17(5): 291-297
- [3] Singh Rajesh Kumar, Singh SN, Seshadri V(2010) CFD prediction of the effects of the upstream elbow fittings on the performance of cone flowmeters, Flow Meas. Instrum. 21: 88-97
- [4] Borkar Kishor, Venugopal A, Prabhu SV (2013) Study on the design and performance of a bi-directional cone flowmeter, Flow Meas. Instrum. 34: 151-159
- [5] Zheng Xuebo, Sun Xiaodong, Bai Bofeng (2018) Flow rate measurement of low GVF gas-liquid two-phase flow with a V-Cone meter. Exp. Therm. Fluid Sci. 91: 175-183
- [6] فدایی مهدی، عاملی فروغ، هاشم آبادی سیدحسین (۱۳۹۸) مطالعه تجربی و شبیه سازی CFD اندازه گیری جریان دوفازی با استفاده از دبی سنج روزنه ای. پژوهش نفت. شماره ۱۰۸
- [7] Nasiruddin Sheikh, Singh SN, Veeravalli SV, Hegde S (2019) Shape optimization of the cone body for the improved performance of the V-cone flowmeter: A numerical study. Flow Meas. Instrum. 66: 111-118
- [8] Nasiruddin Sheikh, Singh SN, Veeravalli SV, Hegde S (2020) Effect of Reynolds number and boundary layer thickness on the performance of V-cone flowmeter using CFD. Flow Meas. Instrum. 73: 101728
- [9] Nasiruddin Sheikh, Singh SN, Veeravalli SV, Hegde S (2020) Flow characteristics of back supported V-

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری به عنوان " مدل سازی عددی و تجربی فلومتر مخروطی در جریان های تک فاز و دو فاز " بوده و تحت حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب می باشد.

از همکاری صمیمانه مسئولین و کارکنان وزارت نفت و مجتمع آموزشی نفت محمود آباد به ویژه جناب آقای دکتر ایقانی معاون محترم مدیر در آموزش و بهبود منابع انسانی و همچنین آقایان مهندس سیاح نژاد و مهندس کوپایی در به ثمر رسیدن این پژوهش قدردانی می کنیم.

فهرست علائم و نشانه ها

عدد رینولدز	Re	علائم انگلیسی
درصد خطای نسبی	$RE\%$	A سطح مقطع لوله، m^2
مولفه های بردار سرعت، m/s	u, v, w	$c_{d,c}$ ضریب تخلیه
سرعت متوسط، m/s	v_{ave}	D قطر لوله، m
		d قطر فلومتر در گلوگاه، m
علائم یونانی		g شتاب گرانشی، m/s^2

- [۱۴] جزیرئیان حسام، جعفرکاظمی فرزاد، ربیعی فر حمیدرضا (۱۴۰۰) ارزیابی عددی عملکرد فلومتر مخروطی در دو حالت تقارن محوری و سه بعدی. پنجمین همایش ملی اندازه گیری جریان سیالات در صنایع نفت، گاز، پالایش، پتروشیمی و آب، تهران
- [۱۵] جزیرئیان حسام، جعفرکاظمی فرزاد، ربیعی فر حمیدرضا (۱۴۰۰) مطالعه عددی ساختارهای طولی و عرضی جریان در فلومتر مخروطی. دهمین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی و نفت، کرمانشاه
- [16] Jaroslav Š (2016) Contribution to investigation of turbulent mean-flow velocity profile in pipe of circular cross-section. AIP Conference Proceedings 1768, 020010
- [17] Zagarola MV, Smits AJ (1998) Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. J. Fluid Mech. 373: 33 – 79
- cone flowmeter (wafer cone). Flow Meas. Instrum. 73: 101750
- [10] Zhao Fan, Li Shanshan, Zheng Xuebo, He Denghui, Bai Bofeng (2021) A modified model for wet gas flowrate measurement considering entrainment downstream of a cone meter. Flow Meas. Instrum. 77: 101839
- [11] Li Shanshan, Bai Bofeng (2022) Two-phase mass flow coefficient of the cone flow meter. 3rd International Symposium on Thermal-Fluid Dynamics (Online). 28-30
- [12] He Deng-Hui, Bai Bo-Feng (2014) Two-phase mass flow coefficient of V-Cone throttle device. ETF Science. 57: 77-85
- [13] ISO 5167-5, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 5: Cone meters, First ed., 2016.