http://mechanics.journals.modares.ac.ir
مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص ص ۳۰-۴۲

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۱/۱/۲۹
پذیرش ۹۱/۴/۳۰
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

بررسی تجربی و عددی جریان آشفته غیردائم در مجرای نوسان ساز یک دبی‌سنج نوسانی به همراه استخراج نمودار مشخصه

حمید مددکن[۱]، علیرضا فدایی تهرانی[۲]، مهدی نیلی احمد آبادی[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، m.nili@cc.iut.ac.ir

چکیده- در این مقاله، مجرائی خاص معرفی شده که در آن، جت آب ورودی، پس از زمان کوتاهی شروع به نوسان کرده و باعث نوسانات منظم سرعت و فشار می‌شود. با توجه به وجود رابطه خطی بین سرعت جت ورودی و فرکانس نوسانات آن، با اندازه‌گیری فرکانس فشار می‌توان دبی جریان را محاسبه کرد. به منظور بررسی میدان جریان سیال در هندسه موجود دبی‌سنج نوسانی و یافتن موقعیت بهینه قرارگیری حسگرهای اندازه‌گیری نوسان، حل معادلات ناویر-استوکس آشفته و غیر دائم توسط نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس به‌طریق عددی انجام شده است. پس از بررسی استقلال حل از شبکه، قابلیت دو مدل آشفتگی کا-اپسیلون و اس‌اس‌تی در شبیه‌سازی غیردائم جریان، بررسی شده است. سپس، بر اساس بررسی کیفیت سیگنال دریافتی از چند نقطه، موقعیت مناسب قرارگیری حسگر مشخص شده است. با ساخت اولین نمونه دبی‌سنج نوسانی در ایران و قراردادن حسگر فشار و حسگر پیزوالکتریک در نقطه مناسب، بستر آزمونی فراهم شده و نتایج شبیه‌سازی عددی صحت‌سنجی شده‌اند. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی نشان داده است که مدل اس‌اس‌تی برای این جریان نتایج بهتری دارد. در نهایت، با انجام آزمایش در دبی‌های مختلف و دریافت و پردازش سیگنال‌های فشار، نمودار مشخصه سیستم (فرکانس نوسانات جت ورودی- سرعت جت ورودی) استخراج شده است.

کلیدواژگان: دبی‌سنج نوسانی، شبیه‌سازی عددی جریان آشفته، کا-اپسیلون، اس‌اس‌تی (انتقال تنش برشی)، حسگر فشار.

Experimental and numerical investigation of unsteady turbulent flow in a fluidic oscillator flow meter with derivation of characteristic diagram

H. Madadkon[1], A. Fadaei Tehrani[2], M. Nili-Ahmadabadi[3*]

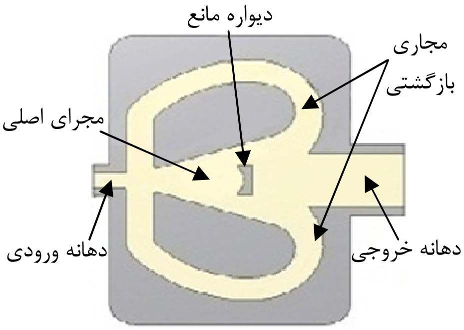
1- MSc Student, Dept. of Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
2- Assoc. Prof., Dept. of Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
3- Assist. Prof., Dept. of Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran. m.nili@cc.iut.ac.ir

Abstract- In this article, a special duct is introduced in which, inlet water jet initiates to oscillate after a short time and it causes the velocity and pressure to oscillate regularly. Considering that there is a linear relationship between the inlet jet velocity and its oscillations frequency, the flow rate can be calculated by measuring the pressure frequency. In order to study flow field inside the current geometry of fluidic oscillator and also to find an optimum location for sensor to detect the pressure oscillation, the unsteady turbulent Navier-Stokes equations are solved by ANSYS CFX software. Having studied grid independency, capability of K-ε and SST turbulence models for numerical simulation of unsteady flow inside the fluidic oscillator is considered. Then, according to the quality of pressure signals of some points, suitable position of sensor is identified. This flow meter is manufactured for the first time in Iran. Using this prototype and inserting the pressure and Piezoelectric sensors at the suitable point, the numerical simulation results are validated by the experimental data. Comparison between the numerical and experimental results shows that the SST model is more suitable for this flow simulation. Finally, by performing experiments in different flows, acquiring and processing pressure signals, the flow meter characteristic diagram (inlet jet oscillations frequency- inlet jet velocity) are derived.

Keywords: Fluidic Oscillator Flow Meter, Turbulence Numerical Simulation, K-ε, SST (Shear Stress Transport), Pressure Sensor.

۱- مقدمه

مجرای نوسان‌ساز یک دبی‌سنج نوسانی به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل دارای مجرای ورودی، مجرای خروجی، مجراهای بازگشتی، دیواره مانع و مجرای اصلی است. جریان با ورود به مجرای اصلی و برخورد به دیواره مانع، منحرف می‌شود. بخشی از جریان به سمت خروجی و بخشی دیگر به سمت مجراهای بازگشتی حرکت می‌کند. خروجی این مجراها به سمت نازل ورودی جریان است. پس از زمان کوتاهی، به واسطهٔ برخورد جریان مجراهای بازگشتی به جت جریان ورودی، جت جریان بین دو دیواره مجرای اصلی به یک سمت منحرف می‌شود. در نتیجه سرعت جریان سیال در مجرایی که جت به سمت آن منحرف شده افزایش یافته و با برخورد با جت ورودی باعث انحراف آن به سمت دیواره دیگر مجرای اصلی می‌شود و این روند همچنان تکرار می‌شود. این مسئله باعث ایجاد نوسان پایدار جت جریان ورودی در طول زمان و در داخل مجرای اصلی می‌شود. با توجه به متقارن بودن هندسه، اثر کواندا[1] باعث انحراف جت جریان به یک سمت می‌شود [۱]. بر این اساس هنگامی که یک جت سیال وارد هندسه‌ای واگرا (مانند ورودی دیفیوزر) شود، تمایل پیدا می‌کند که به یکی از دو دیواره جانبی نزدیک شود. با توجه به نوسانی بودن سیال در درون این سیستم و هچنین عملکرد آن در سرعت‌های مختلف، دو عدد بدون بعد رینولدز (رابطه ۱) و اشتروهال (رابطه ۲) برای توضیح شرایط سیستم ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۱ نمای کلی از هندسه نوسان‌ساز ارائه شده

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (۱)$$

$$St = \frac{f L}{V} \quad (۲)$$

طول مشخصه و سرعت مشخصه در این اعداد بدون بعد، به ترتیب عرض دهانهٔ ورودی به مجرای اصلی و سرعت ورودی سیال از این دهانه است. عدد رینولدز معادل با نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج در میدان جریان سیال است و از این‌رو معیاری برای بیان شرایط جریان از نظر آشفته یا آرام بودن می‌باشد. به طور عمده در جریان‌هایی که به دلیل برخی ناپایداری‌ها نوساناتی در سیال و یا در گردابی‌های موجود در جریان به وجود می‌آید، برای توضیح شرایط حاکم بر سیستم از عدد اشتروهال استفاده می‌شود.

هندسه‌ای که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته و همچنین موارد مشابهی که توسط دیگران طراحی شده، کاربردهای متنوعی دارد. ویژگی نوسان‌سازی این نوع هندسه به طور وسیعی در عملگرها، مخلوط کننده‌ها، اندازه‌گیری دبی جریان مایع یا گاز، به عنوان حافظه و تجهیزات کنترلی[۱]، خنک‌سازی پره توربین یا چیپ‌های الکترونیکی [۲] و منبع انرژی توسط مرتعش کردن حسگرهای پیزوالکتریک [۳]، کاربرد دارد. در این پژوهش هندسه نوسان‌ساز در کاربرد اندازه‌گیری دبی آب مورد بررسی قرار گرفته‌است. از مزایای این نوع دبی‌سنج می‌توان به عدم وجود عضو متحرک در درون ساختار آن (که عمر بیشتر و هزینه تعمیر و نگهداری کمتر را در بر خواهد داشت)، ماهیت دیجیتالی عملکرد (فرکانس نوسانات جت سیال در درون مجرای اصلی) و ماهیت خطی بودن بین دبی عبوری و نوسانات سیال، اشاره کرد.

لوا و همکارش [۴] با طراحی یک هندسه ساده (شکل ۲ الف) و دارای قابلیت تغییر پارامترهای هندسی مانند عرض مانع، فاصله آن تا دهانه ورودی و عرض دهانه ورودی، و انجام آزمایش و شبیه‌سازی توسط مدل کا-اپسیلون[2]، پارامترهای هندسی بهینه به منظور داشتن نوسان کامل در محدوده وسیع‌تری از عدد رینولدز (۵۰۰ تا ۲۰۰۰۰) را به دست آوردند. هم‌چنین در این مقاله محل مناسب قرارگیری حسگر فیلم‌داغ[3] (برای اندازه‌گیری سرعت گاز) براساس ارائه چند معیار به دست

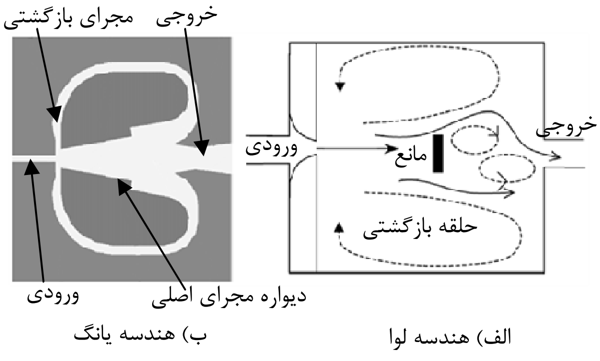
1. Coanda Effect

2. K-ε

3. Hot-Film Sensor

آمد. بوچر [۵] با بررسی دو نوع هندسه نوسان‌ساز به عنوان دبی‌سنج و تغییر پارامترهای هندسی، محدوده دبی قابل اندازه‌گیری به‌خصوص در دبی‌های کم را افزایش داد. عملکرد این نوع دبی‌سنج تا رینولدز ۴۵۰۰۰ بررسی شده‌است. یانگ و همکارانش [۱] با اصلاح دیواره مجرای اصلی توسط ایجاد یک پله در آن و بهینه‌سازی برخی از پارامترهای هندسی در یک هندسه بدون دیواره مانع (شکل ۲ ب)، سیگنال‌هایی با نسبت سیگنال به نویز بیشتری به دست آوردند. به معنای آن که کیفیت سیگنال دریافتی در فرکانس نوسان جت سیال نسبت به نویزهای ایجاد شده در آن که به خاطر اغتشاشات موجود در جریان است، کاهش می‌یابد. در این‌جا محدوده عملکرد نوسانی سیستم بین دبی‌های Lit/min ۶ و Lit/min ۲۰ (اعداد رینولدز تقریباً کمتر از ۴۵۰۰۰) می‌باشد. آزول [۲] نیز با به‌کارگیری هندسه‌ای خاصی، از خاصیت نوسانی آن به منظور ایجاد اغتشاش در جریان نزدیک به دیواره (لایه‌مرزی) و در نتیجه بهبود شرایط انتقال حرارت به منظور خنک‌سازی بهتر در پره توربین، استفاده کرد.

در مقاله پیش‌رو مجرایی با هندسه متفاوت از مقالات علمی بیان شده، برای استفاده در کاربرد دبی‌سنج ارائه شده است. این هندسه برای جهت‌دهی مناسب‌تر جریان ورودی از ترکیبی از داشتن مانع و مجرای بازگشتی بهره می‌برد. از این‌رو نسبت به مدل‌های قبلی در محدوده بیشتری از عدد رینولدز (۳۰۰ تا حدود ۵۰۰۰۰، که با احتساب ابعاد هندسی، محدوده دبی بین Lit/h ۱۲/۵ و m^3/h ۲/۵ می‌شود) ایجاد نوسان پایدار در طول زمان می‌کند. همچنین فرکانس ایجاد شده از نوسان سیال در محدوده مورد نظر، کمتر از ۵۰Hz بوده و در محدوده نویز ناشی از برق شهر قرار نمی‌گیرد، که در مقایسه با طرح یانگ [۱] و آزول [۲] با حداکثر فرکانس ۷۰Hz، مناسب‌تر است.



شکل ۲ هندسه ارائه شده توسط لوا [۴] و یانگ [۱]

در این پژوهش و بر اساس این هندسه، یک نمونۀ آزمایشگاهی دبی‌سنج نوسانی طراحی و ساخته شده است. با توجه به آشفته بودن جریان موجود در سیستم در اکثر محدوده عدد رینولدز عملکردی، توسط دو روش از روش‌های مدل‌سازی جریان‌های آشفته، شبیه‌سازی عددی انجام گرفته و نتایج آن با یکدیگر و همچنین با نتایج آزمایش‌های تجربی به دست آمده از نمونه ساخته شده، مقایسه شده‌است. نوسان جت جریان ورودی سیال بین دو دیواره مجرای اصلی به معنی تغییر پریودیک مقادیر مولفه‌های سرعت جریان و در نتیجه نوسان فشار سیال است. برای تشخیص موقعیت مناسب قرارگیری حسگر اندازه‌گیری فشار، از طریق شبیه‌سازی عددی، نمودار فرکانس‌های سیگنال‌های فشار در نقاط مختلف هندسه شکل ۱، بر اساس یک معیار جدید نسبت به کارهای قبلی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار مشخصه سیستم دبی‌سنج (فرکانس نوسانات جت سیال نسبت به سرعت جریان ورودی) توسط شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی، استخراج و مقایسه شده است.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات اصلی حاکم

فرم برداری معادلات پیوستگی و مومنتوم برای جریان سیال لزج و تراکم‌ناپذیر به صورت زیر نوشته می‌شود [۶].

$$\nabla.\rho\vec{V}=0 \qquad (۳)$$

$$\rho\frac{D\vec{V}}{Dt}=-\vec{\nabla}p+\vec{B}+\mu\nabla^2\vec{V} \qquad (۴)$$

به‌طور عمده از روش حجم محدود[۱] برای شبیه‌سازی و گسسته‌سازی معادلات جریان سیال استفاده می‌شود.

۲-۲- مدل‌سازی آشفتگی

در صورتی‌که کمیت‌های فیزیکی موجود در معادله ناویر-استوکس (معادله ۴) در حالت جریان آشفته، مجموع دو عبارت متوسط و نوسانی در نظر گرفته شده (تجزیه رینولدز[۲]) و از دو طرف این معادله به‌صورت زمانی متوسط‌گیری شود، معادله ناویر-استوکس به صورت رابطه (۵) در خواهد آمد [۷].

1. Finite Volume Method
2. Reynolds Decomposition

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right)=\bar{B}_i-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i'u_j'}\right) \qquad (۵)$$

عبارت آخر در سمت راست معادله ۵ که بیان‌گر متوسط حاصل‌ضرب کمیت‌های نوسانی سرعت می‌باشد، تنش رینولدز[1] بر واحد جرم نام دارد که طبق فرضیه بوزینسک[2] مولفه‌های آن متناسب با گرادیان‌های سرعت متوسط و لزجت آشفتگی می‌باشد (رابطه ۶). در مدل‌های آشفتگی مبتنی بر تنش رینولدز، با ارائه روابطی برای محاسبه لزجت آشفتگی (υ_t) و از طریق رابطه بوزینسک، معادله ناویر-استوکس قابل حل خواهد بود.

$$R_{ij}=\overline{u_i'u_j'}=-\upsilon_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i}\right)+\frac{2}{3}K\delta_{ij} \qquad (۶)$$

از جمله این مدل‌ها، مدل‌های دو معادله‌ای است که با ارائه معادلاتی برای انرژی جنبشی آشفتگی (K)، نرخ اضمحلال آشفتگی (ε) و یا فرکانس آشفتگی (ω)، باعث محاسبه لزجت آشفتگی می‌شوند. در این پژوهش دو مورد از این نوع مدل‌ها در کاربرد مورد نظر مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرد :

مدل کا-اپسیلون: یکی از مدل‌های برجستهٔ آشفتگی، مدل کا-اپسیلون می‌باشد. این مدل به عنوان یک مدل همه منظوره در کدهای CFD[3] و یک مدل استاندارد توصیه شده در کاربردهای صنعتی به کار می‌رود. این مدل توانسته است برای بسیاری از مسائل نسبتاً پیچیده مهندسی جواب‌های قابل قبولی بدهد. اگرچه کا-اپسیلون می‌تواند در جریان‌های محصور به دیواره مورد استفاده قرار گیرد، اما در مدل‌سازی جریان‌های پیچشی، جریان‌های با کرنش بسیار بزرگ و سریع و لایه‌های مرزی تشکیل شده بر روی سطوح دارای شعاع انحنای کوچک و مسیرهای واگرا (مسیرهای واقع در مسیر گرادیان فشار معکوس)، ضعیف عمل می‌کند. در این مدل رابطه (۷) برای به دست آوردن لزجت آشفتگی ارائه می‌شود [۷].

$$\upsilon_t=C_\mu\frac{K^2}{\varepsilon} \qquad (۷)$$

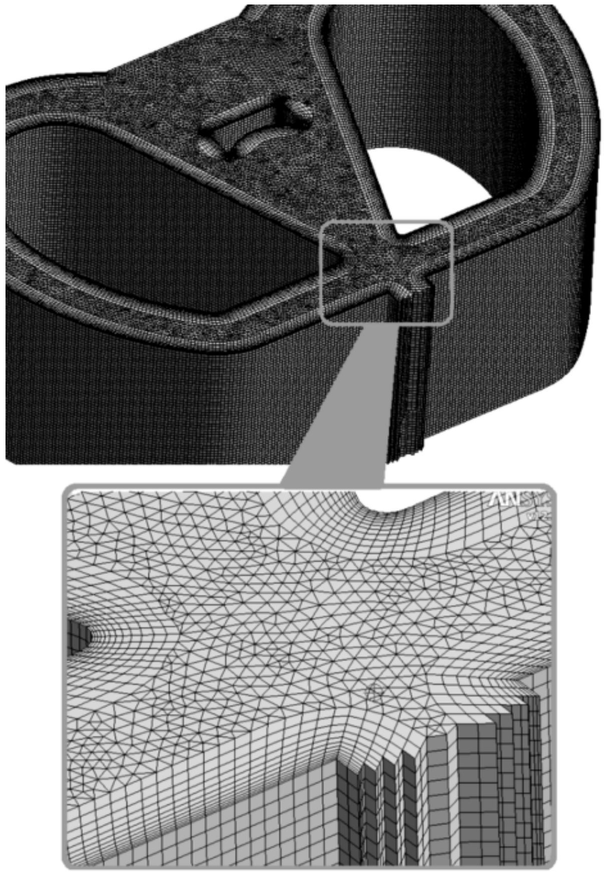
مدل اس‌اس‌تی یا انتقال تنش برشی[4]: مدل‌های استاندارد معادله‌ای اغلب در پیش‌بینی شروع و مقدار جدایش، در گرادیان‌های فشار نامطلوب دچار شکست می‌شوند. مدل اس‌اس‌تی برای این منظور طراحی شده است. این مدل به‌طور هم‌زمان توانایی بالای مدل کا-امگا در نواحی با عدد رینولدز پایین (نزدیک به دیواره) و توانایی بالای کا-اپسیلون در نواحی با رینولدز بالا (دور از دیواره) را در اختیار گرفته‌است. در اس‌اس‌تی، مدل‌های کا-امگا و کا-اپسیلون توسط یک تابع آمیختگی[5] با یکدیگر جمع می‌شوند. این تابع به گونه‌ای طراحی شده که در نزدیکی دیواره دارای مقدار یک (استفاده از مدل کا-امگا) و در نواحی دور از دیواره دارای مقدار صفر (استفاده از مدل کا-اپسیلون) می‌باشد [۷]. با توجه به جدایش جریان در دیواره مجرای اصلی، به نظر می‌رسد اس‌اس‌تی گزینه مناسبی برای بررسی شبیه‌سازی این جریان باشد، که البته در ادامه بررسی می‌گردد.

۲-۳- شبکه‌بندی حوزه حل

چون هندسه ارائه شده، شکل منحنی‌وار دارد، برای تطبیق بیشتر و یکنواختی بهتر، از شبکه مثلثی در صفحه استفاده می‌شود. همچنین به واسطه آن که شکل در راستای عمود بر شکل دو بعدی به طور یکنواخت بیرون آمده[6] است، بنابراین خطوط جریان سیال نیز در لایه‌های عمود بر شکل دو بعدی هندسه شکل ۱ شرایط تقریباً یکسانی خواهند داشت. بنابراین شبکه مثلثی در سطح به صورت لایه لایه در راستای عمود به سطح تکرار می‌شود. به این نوع شبکه‌بندی به اصطلاح شبکه‌بندی روبشی[7] می‌گویند. در نزدیکی دیواره نیز از شبکه مخصوص لایه مرزی استفاده می‌شود (شکل ۳).

تابع دیواره استفاده شده در این شبیه‌سازی عددی، تعمیم یافته روش لاندر-اسپالدینگ [۸] است. در تابع دیواره، توسط فرمول‌های تجربی، بین ویسکوزیته محدوده زیرلایه و وضعیت‌های نزدیک دیوار برای استفاده در معادلات سرعت متوسط و انتقال آشفتگی، اتصال برقرار می‌شود. این فرمول‌ها مقادیر نزدیک دیواره مانند تنش برشی دیواره را به متغیرهای وابسته در سلول آن به‌گونه‌ای متصل می‌کنند که فرض شود در محدوده لایه مرزی، منطقه کاملاً آشفته واقع شده است.

1. Reynolds Stress
2. Boussinesq Hypothesis
3. Computational Fluid Dynamics
4. Shear Stress Transport (SST)
5. Blending Function
6. Extrude
7. Sweep Meshing



شکل ۳ شبکه‌بندی هندسه نوسان‌ساز دبی‌سنج نوسانی

در حل عددی، توابع دیواره فقط باید در نواحی زیرلایه لزج[1] و حائل[2] مورد استفاده قرار گیرند، بنابراین فاصله اولین گره محاسباتی از دیواره و همچنین تعداد المان‌های موجود در لایه مرزی اهمیت زیادی دارد. معادله لگاریتمی سرعت نزدیک دیواره به صورت زیر است:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} ln\, y^+ + C \quad (۸)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau \Delta y}{\mu} \quad (۹)$$

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2} \quad (۱۰)$$

در مورد مقدار y^+ در مراجع مختلف با نظر به مدل آشفتگی مورد استفاده برای شبیه‌سازی، توصیه‌هایی شده است. با توجه به این که در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس[3] استفاده شده است، الگوریتم‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی مدل‌های مختلف آشفتگی در کنار دیواره بررسی می‌شود. در مدل کا-اپسیلون همواره از تابع دیواره رابطه (۸)، اما با الگوریتم تابع دیواره قابل درجه‌بندی[4] استفاده می‌گردد. در این الگوریتم، در حد پایینی y^+ محدودیتی وجود ندارد؛ به این معنا که اگر شبکه مورد استفاده ریزتر از حدی بود که برای تقریب محدوده توابع دیواره نیاز است (برای صفحه صاف صیقلی اولین گره محاسباتی حداقل بین ۳۰ تا ۵۰ قرار گیرد [۷])، در این روش المان‌های اضافی نزدیک دیواره در نظر گرفته نمی‌شود. در مدل‌های مبتنی بر مدل کا-امگا، مانند اس‌اس‌تی از تابع دیواره خودکار[5] استفاده می‌شود. در این حالت از الگوریتمی استفاده می‌گردد که بین فرمولاسیون رینولدز پایین (حل مستقیم لایه مرزی بدون استفاده از توابع دیواره) در مقادیر y^+ خیلی کم، و فرمولاسیون تابع دیواره (رابطه ۸) در مقادیر بیشتر y^+ به‌طور خودکار تغییر حالت می‌دهد. با این‌که در این روش برای ارضای صحت توابع دیواره باید y^+>۳۰۰ باشد، اما به منظور استفاده از تمام مزایای فرمولاسیون اس‌اس‌تی و پیش‌بینی دقیق جدایش، بهتر است y^+≤۲ باشد [۹]. همچنین توصیه می‌گردد تعداد شبکه‌بندی‌های داخل لایهٔ مرزی حداقل ۱۰ عدد باشد [۹،۷].

برای اعتبارسازی نتایج عددی، بررسی حساسیت حل به شبکه از اهمیت زیادی برخوردار است. به گونه‌ای که با ریز کردن شبکه‌بندی، مقدار تابع هدف به دست آمده در حل عددی، مستقل از اندازهٔ المان‌ها باشد. به منظور بررسی استقلال حل عددی به اندازه شبکه، برای هر مدل آشفتگی به‌کار رفته، شبکه‌بندی در سه اندازه تولید شده که در جدول‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. در این‌جا به دلیل اهمیت فرکانس نوسانات جت سیال (همچنین نوسان فشار یا سرعت)، این عامل به عنوان معیار انتخاب شبکه‌بندی مناسب، استفاده شده است.

در این پژوهش با تغییر y^+ از ۲ به ۳۰ تغییری در فرکانس نوسانات جت جریان با شبیه‌سازی توسط روش SST، حاصل نشده است. بنابراین در این مسئله حساسیت به شبکه‌بندی لایه مرزی، در این محدوده y^+ وجود ندارد. همچنین تعداد لایه‌های مورد استفاده در محدوده لایه مرزی، ۱۱ عدد در نظر گرفته شده است.

1. Sub-Layer Viscose
2. Buffer Layer
3. ANSYS CFX
4. Scalable Wall Function
5. Automatic Wall Function

جدول ۱ اثر اندازه شبکه‌ها بر حل میدان جریان توسط مدل اس‌اس‌تی در سرعت ورودی ۱۰m/s (Re=۴۲۱۴۰)

اندازه شبکه‌بندی	تعداد المان‌ها	فرکانس نوسانات (Hz)
درشت	۴۹۰۵۰۰	۳۶/۰۸
متوسط	۱۱۸۸۹۰۰	۳۴/۱۸
ریز	۱۸۸۷۰۶۰	۳۴/۱۸

جدول ۲ اثر اندازه شبکه‌ها بر حل میدان جریان توسط مدل کا-اپسیلون در سرعت ورودی ۱۰m/s (Re=۴۲۱۴۰)

اندازه شبکه‌بندی	تعداد المان‌ها	فرکانس نوسانات (Hz)
درشت	۴۹۰۵۰۰	۲۹/۳۰
متوسط	۱۱۸۸۹۰۰	۳۱/۲۵
ریز	۱۸۸۷۰۶۰	۳۳/۲۰

در استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای (مانند دو مدل بیان شده) در مقایسه با مدل‌های صفر معادله‌ای یا روش حل جریان آرام، به شبکه ریزتری نیاز می‌باشد، چون متغیرهای آشفتگی (مانند K، ε و غیره) در جریان‌های رایج مهندسی تحت گرادیان‌های مکانی شدیدتری قرار دارند. بنابراین چنانچه حتی جواب مستقل از شبکه است، به منظور محاسبه جزئیات دقیق متغیرهای آشفتگی، باید شبکه به اندازه کافی ریز باشد [۷]. با توجه به جدول ۱، با این‌که از شبکه درشت به متوسط در روش اس‌اس‌تی تنها حدود ٪۵ افزایش در مقدار فرکانس مشاهده می‌شود و با ریزتر کردن شبکه‌بندی از حالت متوسط به ریز، تغییری در مقدار فرکانس نوسانات ایجاد نمی‌شود، پس می‌توان هر سه شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز را انتخاب کرد. چون شبکه ریز هزینه محاسباتی زیادی در بر دارد و بنابر نکته بیان شده در بالا، از نوع متوسط استفاده شده است. با توجه به جدول ۲ نیز می‌توان مشاهده کرد از شبکه درشت به متوسط ٪۶/۶۶ و از شبکه درشت به ریز ٪۶/۲۴ در فرکانس نوسان سیال تغییر ایجاد شد. با توجه به مطالب بیان شده برای روش کا-اپسیلون نیز از شبکه‌بندی متوسط استفاده می‌گردد.

۲-۴- شرایط مرزی و شرایط اولیه حل

شرایط مرزی حل عبارتست از: سرعت جت سیال ورودی به مجرای اصلی با توجه به مقدار مورد نیاز در بررسی شبیه‌سازی بین ۰/۱m/s تا ۱۳m/s، فشار مطلق سیستم ۱atm، فشار نسبی خروجی صفر. شرط مرزی خروجی به گونه‌ای است که در صورت وجود جریان بازگشتی (ناشی از گردابه‌های احتمالی در آن محدوده)، اجازه بازگشت جریان به داخل سیستم داده شود. برای انجام این امر، شرط مرزی خروجی در نرم‌افزار به صورت اپنینگ[1] تنظیم می‌گردد. فرایند حل به صورت گذرا و گام‌های زمانی[2] با توجه به میزان تغییرات متغیرهای جریان در واحد زمان (در حل‌های مختلف و با سرعت‌های متفاوت)، بین ۱ms و ۴۰ms می‌باشد. شرایط اولیه نیز عبارتست از : سرعت ورودی برابر مقدار تعیین شده در شرط مرزی (در جهت x) و فشار نسبی اولیه صفر می‌باشد. شدت آشفتگی[3] به مقدار ٪۵ تعیین شده است [۹،۴].

سیال مورد استفاده در این شبیه‌سازی عددی، آب با چگالی ۹۹۷ kg/m^3 و لزجت دینامیکی ۸/۸۹۹×۱۰$^{-۴}$ $N.s/m^2$ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

در شکل ۴ نمایه سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی توسط روش اس‌اس‌تی و در سرعت ورودی ۱۰m/s نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، جریان با ورود به مجرای اصلی و برخورد به دیواره مانع، منحرف شده و با ایجاد یک جریان در مجرای بازگشتی باعث انحراف جت ورودی به سمت دیگر می‌شود.

۳- معرفی و تعیین موقعیت مناسب حسگرها

در انجام این آزمایش برای اندازه‌گیری نوسان فشار ناشی از نوسان جت سیال ورودی، از دو نوع حسگر مبدل فشار و ورق پیزوالکتریک استفاده شده است. هر دوی این حسگرها بر مبنای تغییرات فشار سیستم، سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کنند. ورودی حسگر مبدل فشار، فشار نسبی[4] ۱bar تا ۱/۶bar و خروجی آن ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر می‌باشد. هنگامی که فشاری بر یک کریستال قطبی شده[5] وارد شود، تغییر شکل مکانیکی کریستال منجر به تولید بار الکتریکی می‌گردد که به این پدیده اثر پیزوالکتریک گفته می‌شود [۱۰]. در این‌جا از ورق پیزوالکتریک به قطر ۲۷mm و ضخامت ۰/۵mm نیز استفاده شده است که دارای خروجی ولتاژ می‌باشد.

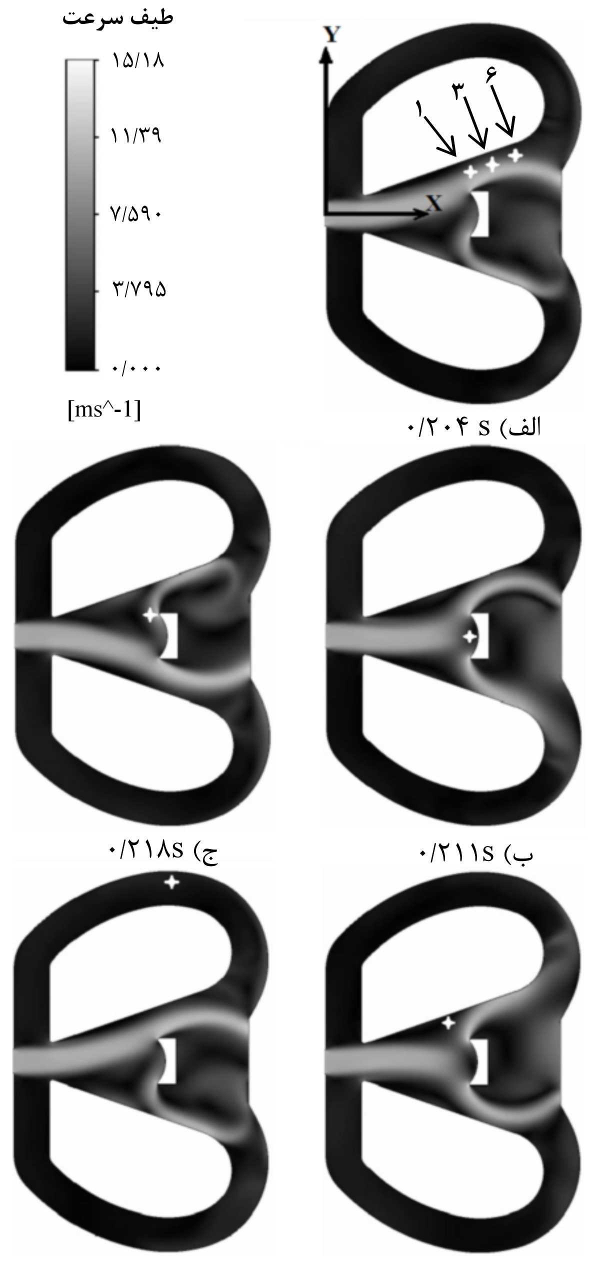
1. Opening
2. Time Step
3. Turbulence Intensity
4. Gauge Pressure
5. Polarized Crystal

قبل از ساخت نمونه آزمایشگاهی دبی‌سنج، برای تعیین موقعیت مناسب قرارگیری حسگر فشار از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. با انجام یک حل عددی اولیه توسط مدل اس‌اس‌تی که هنوز توسط نتایج تجربی صحت‌سنجی نشده است، نمایه[1] سرعت بررسی شده و با توجه به موقعیت کیفی نوسان جت سیال در مجرای دبی‌سنج، موقعیت‌های مناسبی که قابلیت تشخیص نوسانات را دارند تعیین می‌شوند (شکل ۴). در این شکل، شش نقطه در کنار دیواره مجرای اصلی و بعد از مانع (شکل ۴ قسمت الف، که در آن نقطه ۲ بین ۱ و ۳ و نقاط ۴ و ۵ بین ۳ و ۶ قرار دارند)، دو نقطه در جلوی مانع و محل برخورد جت سیال به آن (شکل ۴ قسمت‌های ب و ج)، نقطه کنار دیواره مجرای اصلی و قبل از مانع (شکل ۴ قسمت د) و نقطه‌ای در مجرای بازگشتی (شکل ۴ قسمت ه) نشان داده شده است. سپس سیگنال تغییرات فشار نقاط مذکور در حوزه فرکانس مقایسه و بررسی شده، تا نقطه مناسب انتخاب گردد.

سرعت جت سیال ورودی به مجرای اصلی ۱۰m/s و گام‌های زمانی حل گذرا ۱ms می‌باشد. همچنین در شرایط اولیه سرعت ورودی ۱۰m/s (در جهت x) می‌باشد.

برای بررسی سیگنال‌های به دست آمده از نوسانات فشار از تبدیل فوریه سریع[2] استفاده می‌شود. تبدیل فوریه توسط این الگوریتم قادر خواهد بود با سرعت زیادی یک سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل کرده و طیف فرکانس‌های موجود در آن را استخراج کند. این ابزار در پردازش سیگنال، این قابلیت را ایجاد می‌کند که محدوده فرکانسی سیگنال مطلوب، و همچنین محدوده فرکانسی سیگنال‌های نامطلوب یا نویز[3] به راحتی تشخیص داده شوند. محور افقی نمودار FFT فرکانس‌های موجود در یک سیگنال و محور عمودی توان هر کدام از آن فرکانس‌ها را نشان می‌دهد [۱۱].

در نمودار FFT (شکل ۵، قسمت ب و د) هر چه فرکانس مربوط به سیگنال نوسان اصلی جت سیال نسبت به بقیه فرکانس‌های سیستم دارای توان بیشتری باشد، نقطه‌ای که از آن سیگنال دریافت می‌شود برای نصب حسگر مناسب‌تر است، چون در این حالت اثر نویزها بر عملکرد سیستم کمتر وارد می‌شود.



شکل ۴ نمایه سرعت در بخش‌های مختلف یک دوره زمانی، با روش مدل‌سازی اس‌اس‌تی در سرعت ورودی ۱۰m/s

همچنین در دبی‌های عبوری کم که فرکانس نوسانات خیلی کم است، توان فرکانس اصلی نیز بسیار کاهش می‌یابد و باعث گم شدن فرکانس نوسان اصلی در بین نویزهای موجود در طیف فرکانسی می‌گردد. برای این منظور از نسبت PAR[4] [۱۲] به

1. Contour
2. Fast Fourier Transform (FFT)
3. Noise
4. Peak-to-Average power Ratio

عنوان معیار مقایسه نقاط انتخابی شکل ۵ با یکدیگر، استفاده می‌شود. نسبت PAR توان فرکانس با توان بیشتر (در این‌جا فرکانس سیگنال اصلی نوسان جت سیال) به توان میانگین همه فرکانس‌ها در نمودار FFT می‌باشد. بیشتر بودن عدد این نسبت به معنای آن است که میزان اثرگذاری فرکانس اصلی سیگنال نسبت به سیگنال‌های با فرکانس‌های دیگر (نویزها)، بیشتر است. لازم به ذکر است که نقاط این شکل بر اساس نمایه به دست آمده از یک شبیه‌سازی اولیه و در موقعیت‌هایی که قابلیت حس‌کردن نوسان جت سیال ورودی را دارد، انتخاب شده است.

بنابر جدول ۳ مشاهده می‌شود که نقطه الف-۳ شکل ۴ برای قرارگیری حسگر فشار مناسب‌تر است. به عنوان مثال می‌توان نمودار فشار نسبی-زمان و FFT آن را در نقاط الف-۳ و هـ شکل ۴ با یکدیگر مقایسه کرد (شکل ۵). کیفیت بهتر سیگنال بر اساس معیار بیان شده، در نقطه الف-۳ در شکل ۴ به وضوح قابل مشاهده است.

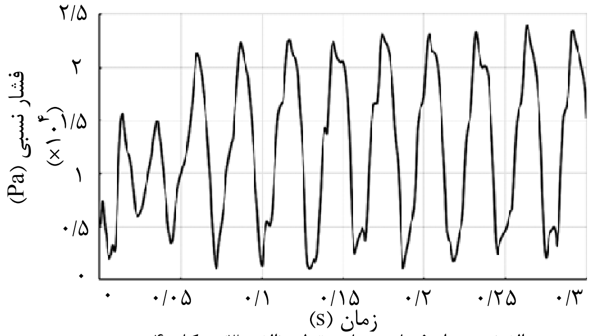
۴- آزمون تجربی و مقایسه با نتایج حل عددی

۴-۱- ساخت و آماده‌سازی تجهیزات آزمایش

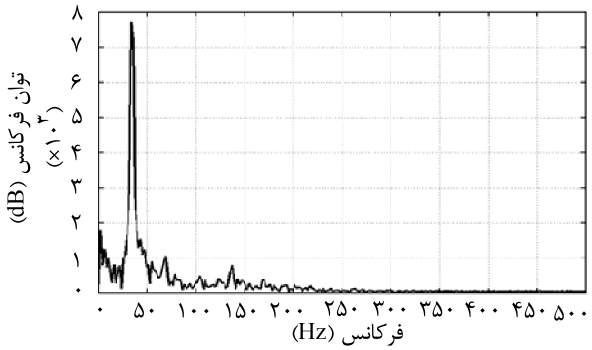
به منظور ایجاد بستری برای آزمون و بررسی جواب‌های عددی، همچنین برای آگاهی از چگونگی عملکرد این سیستم نوسان‌ساز، نمونه‌ای از دبی‌سنج نوسانی با هندسه نشان داده شده در شکل ۱ ساخته شده است. حسگرها نیز با توجه به نتایج به دست آمده، در نقطه الف-۳ شکل ۴ قرار گرفته و تغییرات فشار استاتیک را اندازه‌گیری می‌کنند.

جدول ۳ مقادیر نسبت PAR در نقاط شکل ۴

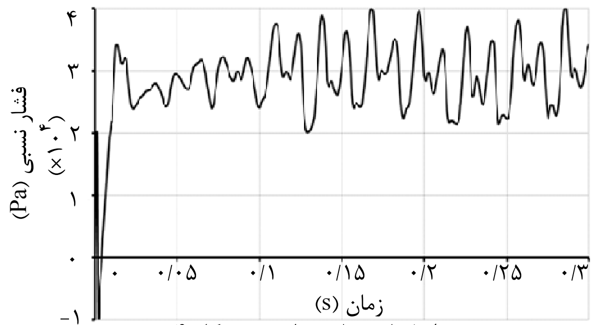
شماره نقطه	مختصات (x,y) (mm)	PAR (dB)
الف-۱	(۴۲/۳,۷/۸)	۱۴/۶۹۹
الف-۲	(۴۳/۳,۸/۱)	۱۴/۹۲۶
الف-۳	(۴۴/۳,۸/۵)	۱۵/۰۶۵
الف-۴	(۴۵/۳,۸/۹)	۱۵/۰۴۸
الف-۵	(۴۶/۳,۹/۲)	۱۴/۶۷۲
الف-۶	(۴۷/۳,۹/۶)	۱۴/۰۴۰
ب	(۳۹/۲,۰)	۱۳/۸۷۵
ج	(۳۸/۱,۳/۳)	۱۰/۸۸۳
د	(۳۷/۳,۵/۹)	۱۲/۰۷۴
هـ	(۴۰,۲۶/۵)	۱۲/۰۸۸



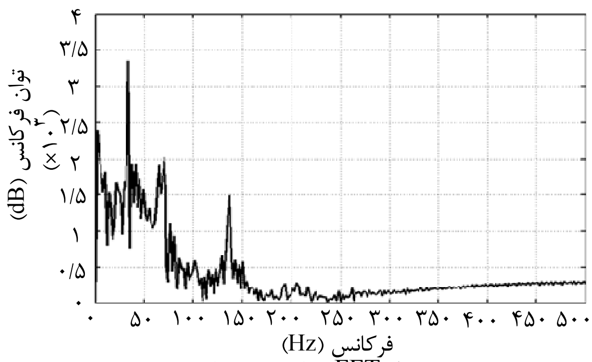
الف) نمودار فشار- زمان نقطه (الف-۳) شکل ۴



ب) نمودار FFT نقطه (الف-۳) شکل ۴



ج) نمودار فشار- زمان نقطه (هـ) شکل ۴

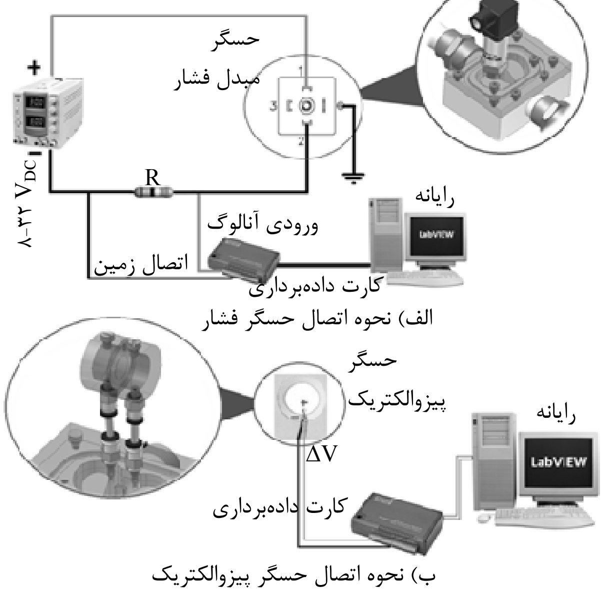


د) نمودار FFT نقطه (هـ) شکل ۴

شکل ۵ سیگنال فشار- زمان نقطه (الف-۳) و نقطه (هـ) شکل ۴، در حوزه زمان و فرکانس

در شکل ۶ قسمت الف نمای شماتیک میز آزمون در استفاده از حسگر مبدل فشار و قسمت ب آن شکل نمای شماتیک آزمایش با حسگر پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. در

شکل ۷ نیز نمای تجهیزات آزمایش در استفاده از حسگر فشار مشاهده می‌شود.



شکل ۶ نمای شماتیک میز آزمایش تجهیزات اندازه‌گیری نوسان فشار توسط حسگر مبدل فشار و حسگر پیزوالکتریک

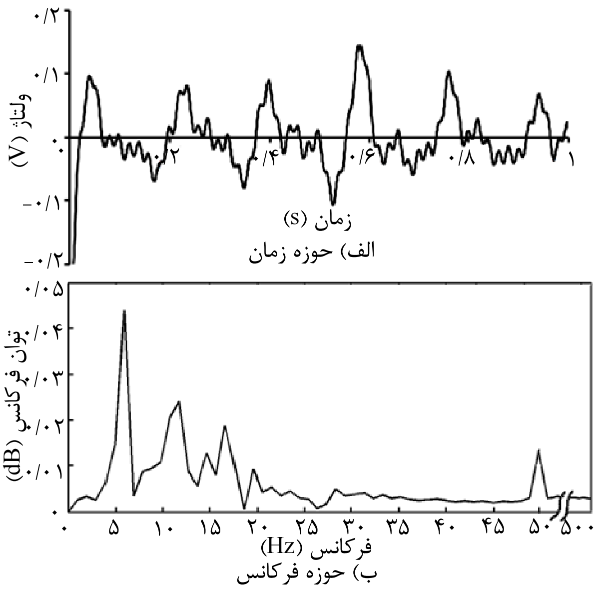
شکل ۷ تجهیزات آزمایش در استفاده از حسگر فشار

۴-۲- دریافت و تحلیل سیگنال‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی

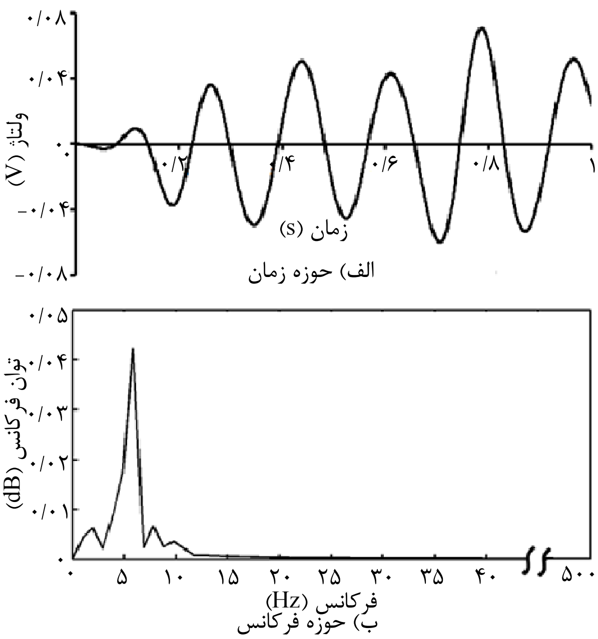
با تبدیل خروجی الکتریکی حسگرها به زیر مجموعه‌ای از محدوده صفر تا ۱۰ ولت (محدوده ورودی کارت داده‌برداری[1])، اطلاعات به صورت پیوسته (آنالوگ) نمونه‌برداری می‌شود. با توجه به بررسی‌های اولیه توسط شبیه‌سازی عددی، فرکانس نوسان جت سیال کمتر از ۵۰Hz است. پس بنابر اصل نایکویست حداقل فرکانس داده‌برداری باید ۱۰۰Hz باشد. البته برای دریافت سیگنالی با نسبت سیگنال به نویز بیشتر، داده‌برداری با فرکانس بیشتری انجام می‌شود [۱۱]. در این‌جا نمونه‌برداری از داده‌های پیوسته با فرکانس ۱kHz انجام شده و در نتیجه به شکل گسسته (دیجیتال) به رایانه انتقال می‌یابد. سپس داده‌های دریافتی، توسط نرم‌افزار لب‌ویو[2] به صورت سیگنال‌هایی در حوزه زمان نمایش داده شده و ذخیره می‌گردد. با استفاده از کدهای موجود در نرم‌افزار متلب[3]، پردازش سیگنال‌های دریافتی از نتایج آزمایش و شبیه‌سازی عددی انجام می‌گیرد. در ابتدا با به دست آوردن نمودار FFT، محدوده فرکانس نوسان اصلی و محدوده نویزهای سیگنال فشار تشخیص داده می‌شود (شکل ۸). در این شکل با توجه به این که در محدوده ۵۰Hz تا ۵۰۰Hz تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود، برای بهتر نشان دادن بخش‌های مهم (کمتر از ۵۰Hz)، نمودار FFT مختصر شده است. براساس این نمودار یک فیلتر پایین‌گذر[4] [۱۱] تعریف شده و نویزهای موجود را تا حد زیادی کاهش می‌دهد (شکل ۹). مزیت استفاده از این روش وقتی آشکار می‌شود که نویزهایی با فرکانس مشخص دارای توانی بیشتر از توان فرکانس اصلی باشند (مانند نویز ۵۰Hz ناشی از برق شهر). لازم به ذکر است که فرکانس قطع در این فیلترها، در اطراف فرکانسی که دارای توان بیشینه است تعریف شده است.

با توجه به این که هدف استفاده از حسگر در این نوع دبی‌سنج صرفاً اندازه‌گیری فرکانس نوسانات فشار است (و مقدار فشار سیال اهمیتی ندارد)، نیاز به کالیبراسیون (تعیین رابطه خطی یا غیرخطی بین فشار و ولتاژ) حسگرها نیست، و از این‌رو نمودار سیگنال‌های شکل‌های ۸ و ۹ بر حسب ولتاژ ورودی به رایانه نمایش داده شده است.

1. Data Acquisition (DAQ) Card
2. LabVIEW
3. MATLAB
4. Low pass Filter



شکل ۸ نمودار یک سیگنال فیلتر نشده در حوزه زمان و فرکانس



شکل ۹ نمودار یک سیگنال فیلتر شده در حوزه زمان و فرکانس

۴-۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی و استخراج نمودار مشخصه سیستم

با انجام روند بیان شده، ابتدا در یک سرعت ورودی (۱۰m/s) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش اس‌اس‌تی و روش کا-اپسیلون با نتیجه به دست آمده در آزمایش عملی، مقایسه می‌گردد (جدول ۴).

جدول۴ نتایج عددی و آزمایش عملی فرکانس نوسانات سیال با سرعت ورودی ۱۰m/s (*Re*=۴۲۱۴۰)

روش محاسبه	فرکانس نوسانات سیال (Hz)	خطا (%)
نتیجه آزمایش	۳۴/۵۴	صفر
کا-اپسیلون	۳۱/۲۵	۹/۵۳
اس‌اس‌تی	۳۴/۱۸	۱/۰۷

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که انحراف فرکانس نوسانات جت سیال در روش کا-اپسیلون نسبت به نتایج تجربی، بیشتر از روش اس‌اس‌تی می‌باشد. با توجه به وابستگی بیشتر روش کا-اپسیلون به اندازه شبکه‌بندی (جدول ۲)، و همچنین خاصیت روش اس‌اس‌تی در مدل‌سازی بهتر جدایش جریان از دیواره، این روش برای مدل‌سازی جریان موجود در مجرای دبی‌سنج مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

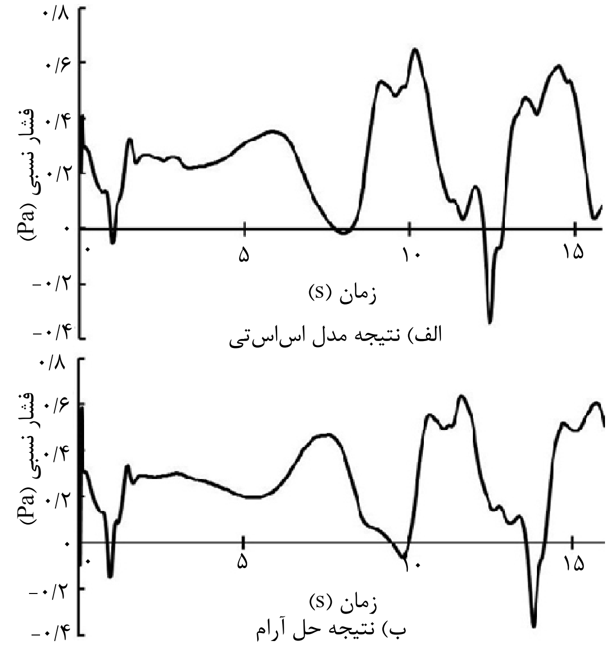
نکته مهم دیگر، شبیه‌سازی در اعداد رینولدز کم می‌باشد. به‌طور کلی آشفتگی در جریان داخلی بر اساس عدد رینولدز برابر با ۲۳۰۰ سنجیده می‌شود [۱۳]، اما با توجه به ساختار هندسی موجود امکان آن وجود دارد که جریان زودتر به مرز آشفتگی برسد. از این‌رو حل عددی در اعداد رینولدز پایین‌تر از ۲۳۰۰ توسط هر دو روش جریان آرام[1] و اس‌اس‌تی انجام می‌گیرد. علت این امر عدم اطلاع دقیق از رینولدز گذار از جریان آشفته به آرام می‌باشد. برای اعداد رینولدز نزدیک به گذار، دو روش اس‌اس‌تی و آرام نتایج مشابهی را، هم از نظر فرکانس نوسان جت سیال ورودی (جدول ۵) و هم از نظر شکل سیگنال‌های دریافتی، نشان می‌دهند.

به عنوان نمونه نمودار فشار-زمان به دست آمده از روش اس‌اس‌تی و حل به طریق جریان آرام، در عدد رینولدز ۳۰۰، در شکل ۱۰ مقایسه شده است. این شکل مشابهت عملکرد دو روش را در اعداد رینولدز پایین نشان می‌دهد. در دو عدد رینولدز دیگر نیز نتیجه‌ای مشابه شکل ۱۰ به دست آمده است.

جدول ۵ مقایسه عملکرد روش اس‌اس‌تی و آرام در اعداد رینولدز پایین‌تر از ۲۳۰۰

عدد رینولدز در دهانه ورودی	فرکانس (Hz) از طریق روش اس‌اس‌تی	فرکانس (Hz) از طریق روش حل آرام
۳۰۰	۰/۲۷۰۷	۰/۲۷۰۷
۱۰۵۳	۰/۸۷۸۹	۰/۸۷۸۹
۱۸۹۶	۱/۵۶۳	۱/۵۶۳

1. Laminar



شکل ۱۰ مقایسه نتیجه شبیه‌سازی در عدد رینولدز ۳۰۰ (حاصل از نقطه الف-۳ شکل ۴)

شکل ۱۱- الف، نمودار فرکانس جت ورودی- سرعت جت ورودی در نقطه الف-۳ شکل ۴ که توسط حسگر مبدل فشار و شبیه‌سازی عددی به دست آمده را نشان می‌دهد. برازش خطی[1] توسط روش حداقل مربعات[2]، بر داده‌های تجربی به دست آمده در این شکل انجام می‌گیرد. با توجه به معیار R^2[3] (که هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده تطابق بیشتر نتایج بر معادله برازش شده است) [۱۴]، نقاط نمودار با دقت بسیار زیادی از روند معادله خط رابطه (۱۱) تبعیت می‌کنند (R^2=۰/۹۹۸).

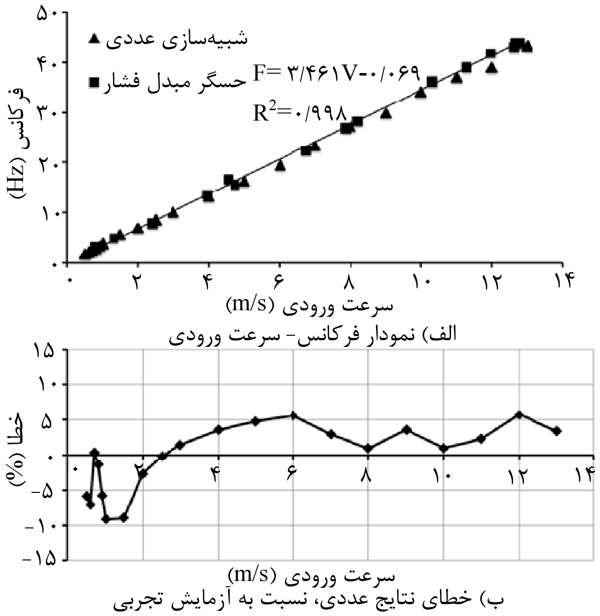
$$f = 3.461 u_{in} - 0.069 \qquad (۱۱)$$

با توجه به شکل ۱۱- ب، خطای شبیه‌سازی عددی در محدوده سرعت‌های مختلف، نسبت به خط برازش شده با نقاط حسگر فشار، ارائه شده است. بیشترین اندازه خطا در این محدوده سرعت، ٪۹/۱ و خطای میانگین اندازه خطاها در سرعت های مختلف نیز ٪۳/۸۳ می‌باشد. که نتایج قابل قبولی خواهد بود.

1. Linear Fitting
2. Least Square Method
3. R-squared criterion

۴-۴- بررسی عملکرد حسگر پیزوالکتریک

حسگر مبدل فشار به صورت تجاری و استاندارد شده موجود بوده و ویژگی‌های عملکردی آن مشخص می‌باشد. بنابراین در اینجا چگونگی عملکرد ورق پیزوالکتریک، که دارای هیچ‌گونه برگه مشخصه‌ای[4] نیست، با آن مقایسه می‌شود.

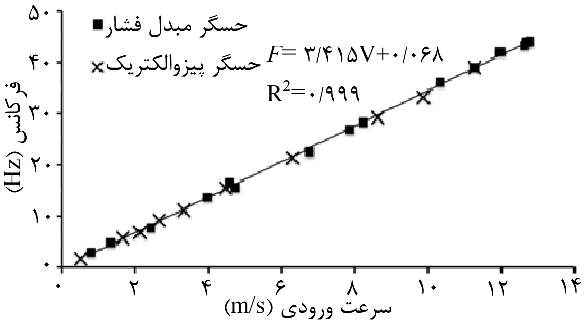


شکل ۱۱ نمودار فرکانس- سرعت ورودی، برای نتایج عددی و تجربی با حسگر فشار و خطای نتایج عددی، نسبت به آزمایش تجربی

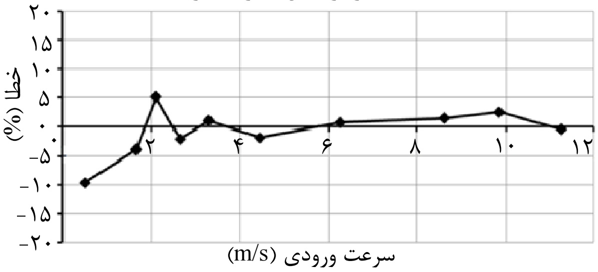
ارزان بودن، عدم نیاز به منبع تغذیه، انعطاف‌پذیری از نظر شکل، اندازه و ابعاد، داشتن خروجی ولتاژ در محدوده مناسب کارت دریافت داده (بین صفر تا ۱۰ ولت) و نسبت سیگنال به نویز بالا، از مزایای این نوع حسگر می‌باشد. به منظور بررسی صحت عملکرد ورق پیزوالکتریک در اندازه‌گیری نوسانات فشار، نتایج حاصل از آزمایش با آن در سرعت‌های مختلف، توسط نتایج قابل اطمینان به دست آمده از حسگر مبدل فشار صحت‌سنجی می‌شود (شکل ۱۲).

در این شکل مشاهده می‌گردد که نتایج حسگر پیزوالکتریک نیز با دقت بسیار خوبی (R^2=۰/۹۹۹) خطی شده است. حداکثر اندازه خطای ایجاد شده در طول این محدوده سرعت، ٪۹/۶۶ و میانگین خطاها ٪۲/۸۹ می‌باشد.

4. Datasheet



الف) نمودار فرکانس- سرعت ورودی



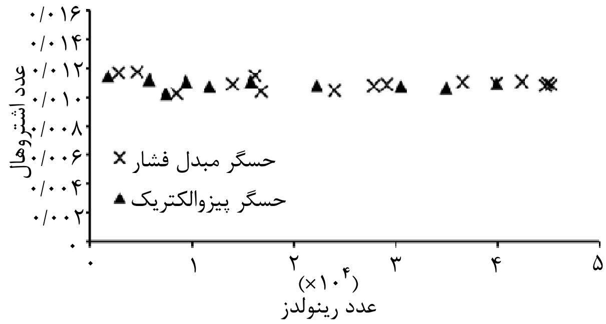
ب) خطای آزمایش حسگر پیزوالکتریک نسبت به حسگر فشار

شکل ۱۲ نمودار فرکانس- سرعت ورودی برای نتایج آزمایش با حسگر فشار و حسگر پیزوالکتریک و خطای نتایج آزمایش

با بررسی اعداد بدون بعد حاکم بر این سیستم، این نتیجه حاصل می‌شود که با تغییر عدد رینولدز، عدد اشتروهال در آن محدوده، مقدار نسبتا ثابتی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به رابطه (۲) و نمودار شکل ۱۳، ثابت بودن عدد اشتروهال در این محدوده مؤید تناسب مستقیم بین سرعت جریان ورودی و فرکانس نوسان آن و همچنین خطی بودن عملکرد سیستم می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله در ابتدا نوعی دبی‌سنج که صرفاً براساس نوسان سیال در داخل آن، عمل می‌کند، معرفی شد.



شکل ۱۳ نمودار عدد اشتروهال بر حسب عدد رینولدز

سپس عملکرد یک مدل از دبی‌سنج‌های نوسانی، به منظور ساخت آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور هندسه‌ای که خاصیت ذاتی آن ایجاد نوسان پایدار در جت جریان ورودی است، ارائه شد. برای بررسی چگونگی عملکرد و شکل سیال جریان در داخل مجرای دبی‌سنج و همچنین تعیین محل مناسب قرارگیری حسگرهای مبتنی بر اندازه‌گیری فشار، شبیه‌سازی عددی انجام گرفت. با توجه به آشفتگی جریان در محدوده وسیعی از عدد رینولدز عملکردی سیستم، از دو مدل کا-اپسیلون و اس‌اس‌تی استفاده شد. با توجه به قابلیت‌های خوب در حل عددی و همچنین تطابق مناسب با نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی، مدل اس‌اس‌تی مناسب‌تر تشخیص داده شد.

با استفاده از معیار PAR، که برابر نسبت توان فرکانس با توان بیشتر در نمودار FFT به میانگین توان همه فرکانس‌های موجود در سیگنال (در این‌جا سیگنال فشار حاصل از نتایج شبیه‌سازی) می‌باشد، موقعیت مناسب قرارگیری حسگرها به دست آمد.

با ساخت یک نمونه دبی‌سنج نوسانی، براساس نتایج به دست آمده از حل عددی اولیه، زمینه انجام آزمایش‌های تجربی فراهم شد. با انجام آزمایش در محدوده دبی‌های مختلف، نتایج شبیه‌سازی عددی، با نتایج حاصل از حسگر مبدل فشار مقایسه گردید که حداکثر خطا ٪۹/۱ و میانگین خطا در دبی‌های مختلف ٪۳/۸۳ به دست‌آمد. با محاسبه نتایج تجربی و با توجه به نمودار اشتروهال بر حسب رینولدز، نمودار مشخصه عملکرد سیستم با دقت بسیار خوب R^2=۰/۹۹۸ خطی شد.

با قراردادن حسگر مبدل فشار به عنوان مبنای اندازه‌گیری، نتایج حسگر پیزوالکتریک با آن مقایسه شده و خطای حداکثری در دبی‌های مختلف به مقدار ٪۹/۶۶ و میانگین خطاها ٪۲/۸۹ محاسبه گردید. بنابراین قابلیت ورق پیزوالکتریک در دسترس، برای اندازه‌گیری نوسانات فشار در این سیستم به اثبات رسید.

۶- فهرست علایم

B_i مؤلفه نیروهای حجمی (N)

C ثابت زبری دیواره

C_μ ضریب ثابت تجربی

D عملگر مشتق مادی

f فرکانس ($Hz=s^{-1}$)

K انرژی جنبشی آشفتگی (m^2s^{-2})

L طول مشخصه (m)

p فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)

R^2 معیار میزان صحت برازش منحنی از طریق روش حداقل مربعات

Re عدد رینولدز

St عدد اشتروهال

$\overline{u_i}$ مولفه متوسط سرعت (ms^{-1})

u_i' مولفه نوسانی سرعت (ms^{-1})

u^+ سرعت بی‌بعد نزدیک دیواره

u_τ سرعت اصطکاکی مماس بر دیواره (ms^{-1})

u_{in} سرعت ورودی (ms^{-1})

V سرعت (ms^{-1})

x_i مولفه مختصاتی

y^+ فاصله بی‌بعد از دیواره

Δy فاصله تا دیواره (m)

μ لزجت دینامیکی ($kgsm^{-2}$)

ε نرخ اضمحلال آشفتگی (m^2s^{-3})

ω فرکانس آشفتگی ($rads^{-1}$)

δ_{ij} دلتای کرونکر

υ_t لزجت آشفتگی (m^2s^{-1})

κ ثابت فون کارمن

ρ چگالی (kgm^{-3})

τ_w تنش برشی دیواره ($kgms^{-1}$)

۷- مراجع

[1] Yang J.T., Chen C.K., “A Novel Fluidic Oscillator Incorporating Step-shaped Attachment Walls”, *Sensors and Actuators A: Physical,* Vol. 135, No. 2, 2007, pp. 476–483.

[2] Uzol O., Camci C., “Experimental and Computational Visualization and Frequency Measurements of the Jet Oscillation Inside a Fluidic Oscillator”, *Journal of Visualization*, Vol. 5, No. 3, 2002, pp. 263–272.

[3] Ramirez J.I., Tonner F., “Fluidic Oscillations as Energy Source for Flow Sensors”, *Proceedings of Power MEMS*, 2008, pp. 9–12.

[4] Lua A.C., Zheng Z., “Numerical Simulations and Experimental Studies on a Target Fluidic Flowmeter”, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 14, No. 1–2, 2003, pp. 43–49.

[5] Boucher R.F., “Minimum Flow Optimization of Fluidic Flowmeters”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 6, No. 7, 1995, pp. 872.

[6] Fox R.W., McDonald A.T., *Introduction to Fluid Mechanics*, Vol. 5, New York, John Wiley & Sons, 1985, pp. 110-226.

[۷] صنیعی نژاد مهدی، *مبانی جریان‌های آشفته و مدل‌سازی آن‌ها*، تهران، انتشارات دانشنگار، ۱۳۸۸، ص‌ص ۶۳۱-۴۱۰.

[8] Launder B.E., Spalding D.B., “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, *Computational Methods App.l. Mech. Eng.*, Vol. 3, No. 2, 1974, pp. 269-289.

[9] ANSYS CFX 12.1, Turbulence and Wall Function Theory, Ansys CFX-Solver Theory guide, *ANSYS Inc*., 2009.

[10] Wilson J.S., *Sensor Technology Handbook*, Vo. l, Oxford, Newness, 2005, pp. 411-456.

[11] Fischer, A.C, *Newness interfacing companion computers transducers instrumentation and signal processing*, Oxford, Newness, 2002, pp. 211-283.

[12] Budge M., Introduction to Radar Systems, *Detection*, Courses of University of Alabama in Huntsville, 2011.

[13] Fox R.W., McDonald A.T., and Pritchard P.J., *Introduction to Fluid Mechanics*, New York, John Wiley & Sons, 1985, Vol. 5, pp. 332-333.

[14] Recktenwald G.W., *Numerical Methods with MATLAB: Implementations and App.lications*, Prentice Hall, 2000.