

Design of a Coriolis Mass Flowmeter for Low Flow Rate Measurement Using a Novel Fast Computational Approach

Tohid Aghaei, Hassan Faraji Baghtash*, Habib Badri Ghavifekr

Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand New Town, Tabriz, Iran

* Corresponding author email: hfaraji@sut.ac.ir



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1403.11.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1403.11.2.1.9)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol. 11, No. 2

Autumn and Winter 2024

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

Abstract

In this paper, a dual U-shaped Coriolis mass flowmeter operating at the millimeter scale is designed and numerically analyzed for low flow rate measurement. A novel fast computational approach, referred to as the Rapid Computational Method (RCM), is introduced to estimate the Coriolis force without performing time-dependent structural simulations. The proposed method replaces the direct calculation of tube velocity with the curl of the displacement field multiplied by the natural angular frequency of the vibrating tube. This simplification significantly reduces computational cost while preserving acceptable accuracy under resonant operating conditions.

The proposed flowmeter consists of two symmetric U-shaped copper tubes oscillating in anti-phase, which enhances immunity to external disturbances such as environmental vibrations and thermal variations. The structure is modeled and analyzed using COMSOL Multiphysics 5.6. Geometrical parameters, particularly tube thickness, are systematically investigated to evaluate their influence on tube mass, resonant frequency, and phase difference sensitivity. Analytical expressions are used to estimate tube and fluid mass, while finite element simulations are employed to extract the natural frequency of the structure under resonant excitation.

A fluid dynamics analysis is conducted to obtain the velocity distribution of water flowing inside the tube under low-pressure conditions. The resulting fluid velocity, together with the tube vibrational velocity derived from the displacement curl, is used to compute the Coriolis force based on an algebraic formulation. This force is then applied symmetrically to the tube arms in a steady-state mechanical analysis to determine the relative displacement and phase difference between the sensing points.

Simulation results demonstrate that tube thickness plays a dominant role in flow sensitivity. Reducing the tube thickness from 1.5 mm to 0.5 mm increases the natural frequency and significantly enhances the measurable phase difference at low flow velocities. For the optimized geometry with a tube thickness of 0.5 mm, a phase difference of approximately 5.8 degrees is obtained at low flow rates, confirming the feasibility of accurate mass flow detection in this regime. The results also show that increases in tube thickness suppress Coriolis-induced phase shifts more strongly than reductions in fluid velocity.

Compared to conventional approaches, the proposed RCM eliminates the need for time-dependent fluid–structure interaction simulations, offering a fast and computationally efficient alternative for preliminary design and geometry screening of Coriolis mass flowmeters. While the method involves controlled simplifications, it maintains sufficient accuracy under resonant operation and provides clear physical insight into the relationship between tube geometry, vibrational behavior, and Coriolis-induced phase difference. Overall, this work presents a practical and low-cost design methodology for developing reliable Coriolis mass flowmeters for low flow rate applications.

Keywords

Coriolis mass flowmeter; Coriolis force; Phase difference; Actuator; Design calculations

1. Short Introduction

Accurate measurement of low mass flow rates is essential in many industrial, medical, and pharmaceutical applications. Coriolis mass flowmeters are widely used due to their high accuracy and robustness against variations in fluid properties. However, the design and optimization of Coriolis flowmeters operating at low flow rates often rely on time-dependent simulations, leading to high computational cost. This creates a need for fast and reliable computational approaches that can support preliminary design and geometry optimization of low-flow Coriolis mass flowmeters.

2. Proposed Work

In this study, a dual U-shaped Coriolis mass flowmeter with millimeter-scale copper tubes is designed and analyzed. A rapid computational method based on the curl of the displacement field is introduced to estimate the tube velocity and Coriolis force without requiring time-dependent simulations. Structural, fluidic, and mechanical analyses are performed using COMSOL Multiphysics. A parametric investigation of tube thickness demonstrates its strong influence on resonant frequency and phase difference sensitivity. Simulation results indicate that a tube thickness of 0.5 mm provides optimal performance, yielding a measurable phase difference of 5.8 degrees at low flow rates, thereby validating the effectiveness of the proposed design and computational approach.

3. Conclusion

A fast and efficient design methodology for a low-flow Coriolis mass flowmeter has been presented. The proposed rapid computational method significantly reduces simulation time while maintaining acceptable accuracy. The results confirm that tube thickness is a key design parameter for enhancing sensitivity at low flow rates. The proposed approach is suitable for preliminary design and optimization of compact Coriolis mass flowmeters.

طراحی دبی سنج کوریولیس برای سنجش جریان های کم بر اساس روش محاسبه سریع ابداعی

توحید آقائی^۱، حسن فرجی بگتاش^{۲*}، حبیب بدری قویفکر^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

* آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hfaraji@sut.ac.ir



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1403.11.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1403.11.2.1.9)

نشریه سازه های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۱۱ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

صفحات ۵ الی ۱۸

ISSN: 2322-3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۳۰

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۲/۲۵

چکیده

در این مقاله، یک دستگاه دبی سنج جرمی کوچک-مقیاس مبتنی بر نیروی کوریولیس، به منظور اندازه گیری جریان های کم حجم، طراحی و شبیه سازی شده است. دبی سنج پیشنهادی از نوع دو لوله ای U شکل بوده و برای کاربردهای پزشکی و داروسازی مورد استفاده قرار می گیرد. از مهم ترین ویژگی های این دستگاه می توان به دقت بالا، عدم وابستگی به ویژگی های فیزیکی سیال مانند دما، فشار و چگالی اشاره کرد. در این تحقیق، یک روش محاسباتی ساده و سریع برای برآورد نیروی کوریولیس در دبی سنج های دو لوله ای ارائه شده است. این روش مبتنی بر استفاده از کرل جابجایی ضربدر فرکانس طبیعی به جای استخراج مستقیم سرعت لوله است. رویکرد پیشنهادی به طرز چشمگیری زمان محاسبه را کاهش داده و برای تحلیل های پارامتریک یا طراحی های اولیه بسیار مؤثر است. فرآیند طراحی و شبیه سازی این دبی سنج با استفاده از نرم افزار کامسول و در ابعاد میلی متری انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده اختلاف فاز قابل قبول معادل ۵/۸ درجه بین خروجی حسگرهای متصل به بازوهای چپ و راست لوله است، که عملکرد مناسب دستگاه را در اندازه گیری دقیق جریان تأیید می کند.

واژه های کلیدی

دبی سنج جرمی

نیروی کوریولیس

اختلاف فاز

عملگر

محاسبات طراحی

۱ - مقدمه

در بسیاری از کاربردهای جریان داخلی، آگاهی از مقدار جریان جرمی از اهمیت بالایی برخوردار است. یک دبی سنچ جرمی^۱ واقعی با تکیه بر اصل کوریولیس^۲ قابل دستیابی است [۱]. در طول دو دهه گذشته، دبی سنچ های جریان مبتنی بر اصل کوریولیس به یکی از مهمترین زمینه های توسعه در اندازه گیری جرمی جریان تبدیل شده اند. پیشرفت قابل توجه در فناوری اندازه گیری جریان کوریولیس، جنبه های فنی متعددی را در بر گرفته است؛ این توسعه مرهون پیشرفت هایی در حوزه مدل سازی نظری^۳، پردازش سیگنال^۴، قدرت محاسباتی^۵، امکانات آزمایشگاهی و از همه مهم تر، پذیرش گسترده آن در صنایع مختلف است [۲]. با توجه به اینکه معمولاً مخلوط هایی با ترکیبات متغیر وجود دارند، استفاده از دبی سنچ جرمی کوریولیس^۶ برای اندازه گیری دقیق جریان جرمی ضروری به نظر می رسد [۳]. دقت اندازه گیری در این دبی سنچ ها بالا است، زیرا عوامل تأثیر گذار مانند چگالی، فشار و دمای سیال اثر ناچیزی بر عملکرد آن ها دارند. علاوه بر نرخ جریان جرمی، دبی سنچ های کوریولیس می توانند پارامترهایی مانند نرخ جریان حجمی، چگالی، دما، ویسکوزیته و غلظت را نیز اندازه گیری کنند. در حال حاضر، رایج ترین نوع دبی سنچ های کوریولیس مورد استفاده در کاربردهای صنعتی، نوع دو لوله ای U شکل^۷ است. بر اساس شکل لوله ارتعاشی، دبی سنچ های جرمی کوریولیس به طور معمول به سه نوع تقسیم می شوند: لوله U شکل، لوله W شکل، و لوله مستقیم [۴]. به منظور کاهش تغییر شکل لوله در اثر فشار محیط و افزایش بازه اندازه گیری جریان، نیاز به یک مقطع دایره ای با قطر بزرگ وجود دارد [۵]. وابستگی شکل مقطع به فشار، بر سختی ساختار لوله تأثیر می گذارد که این موضوع در سنسورهای رزونانسی مانند حسگر جریان جرمی کوریولیس یا حسگر چگالی، منجر به خطا در اندازه گیری می شود [۶]. دبی سنچ جرمی کوریولیس عمدتاً از محرک ها (عملگر)^۸، یک لوله اندازه گیری و حسگرهای ارتعاش^۹ تشکیل شده است. محرک ها، لوله اندازه گیری را به نوسان هارمونیک ساده وادار می کنند. در شرایطی که سیالی درون لوله جریان ندارد، سیگنال های خروجی حسگرهای ارتعاش در دو انتهای لوله به صورت موج های سینوسی با دامنه و فاز یکسان ظاهر می شوند. اما زمانی که سیال از لوله عبور می کند، اثر کوریولیس موجب ایجاد اختلاف فاز^{۱۰} ($\Delta\phi$) در سیگنال های سینوسی دو سر لوله می گردد [۷]. در این حالت، نرخ جریان جرمی^{۱۱} (q_m) با اختلاف فاز نسبت مستقیم دارد، در حالی که ضریب تناسب^{۱۲} (K) تنها به خود دبی سنچ وابسته است و به پارامترهای فیزیکی سیال وابسته نیست. این ویژگی منحصر به فرد باعث شده است که دبی سنچ جرمی کوریولیس در میان ابزارهای اندازه گیری متعدد ممتاز باشد. از این رو، بیشتر تحقیقات در زمینه دبی سنچ کوریولیس بر نحوه استخراج اختلاف فاز از دو سیگنال سینوسی متمرکز شده اند [۸]. از جمله روش های استخراج اختلاف فاز می توان به تبدیل سیگنال ولتاژ در حوزه زمان بر اساس تبدیل فوریه گسسته^{۱۳} به دامنه و فاز در حوزه فرکانس [۹]، اندازه گیری فاز مبتنی بر تبدیل فوریه گسسته با

¹ Mass flowmeter

² Coriolis principle

³ Theoretical modelling

⁴ Signal processing

⁵ Computing power

⁶ Coriolis mass flowmeter (CMF)

⁷ Dual U-tube

⁸ Actuator

⁹ Vibration detectors

¹⁰ Phase difference

¹¹ Mass flow rate

¹² Proportional coefficient

¹³ Discrete Fourier transform (DFT)

اصلاح فرکانس منفی^۱ [۱۰]، تبدیل هیلبرت^۲ برای پردازش دنباله اولیه به منظور تولید دو دنباله کسینوسی با قطبیت مخالف و دامنه برابر [۱۱، ۱۲] اشاره کرد. علاوه بر این، روش های مبتنی بر ضرب داخلی بردار^۳، حلقه قفل فاز دیجیتال^۴، آشکارسازی مربعی^۵، فیلتر ناچ تطبیقی^۶ و غیره نیز در سیستم اندازه گیری دبی سنج کوریولیس کاربرد دارند [۱۳، ۱۴].

ساخت دبی سنج های جرمی کوریولیس در ابعاد میکرو و نانو بسیار رایج است. مهم ترین مزایای حسگرهای جریان جرمی کوریولیس میکرو نسبت به سایر روش های اندازه گیری جریان، عدم وابستگی آن ها به فشار، پروفایل جریان، و خواص سیال است [۱۵]. اغلب حسگرهای جریان کوریولیس میکرو با استفاده از فناوری های میکرو مکانیکی سیلیکونی ساخته می شوند، مانند اچ تر شونده (مرطوب) آنیزوتروپیک [۱۶-۱۸] و اچ خشک [۲۱-۱۹]، و فناوری کانال سطحی [۲۲-۲۶].

در این مقاله، یک دبی سنج جرمی کوریولیس از نوع دو لوله ای U شکل برای اندازه گیری جریان های کم حجم طراحی و شبیه سازی شده است. در فرایند طراحی این دبی سنج کوچک، از یک روش محاسباتی سریع^۷ ابداعی استفاده شده است که بدون نیاز به حل وابسته به زمان، از کرل میدان جابجایی به همراه فرکانس طبیعی بهره می گیرد. در این روش، به جای محاسبه کرل سرعت جابجایی لوله های مسی (که از نیروی اعمال شده به شیء متصل به لوله ها ناشی می شود)، کرل جابجایی لوله محاسبه شده و سپس به سرعت تبدیل می شود. در نهایت حل به صورت استاتیکی انجام می پذیرد. در حالی که این روش با ساده سازی همراه است، اما توانایی بر آورد دقیق نیروی کوریولیس را در شرایط تشدید لوله حفظ کرده و راهکاری مؤثر، سریع و کم هزینه برای طراحی های اولیه و غربالگری هندسه ها محسوب می شود.

این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است؛ پس از مقدمه، در بخش دوم، ابعاد دبی سنج پیشنهادی و تأثیر پارامترهای هندسی لوله U شکل در ایجاد نیروی کوریولیس بررسی می شود. بخش سوم به معرفی روش محاسباتی سریع اختصاص دارد که برای طراحی دبی سنج جرمی کوریولیس و تحلیل عملکرد آن در اندازه گیری جریان های کم حجم به کار گرفته می شود. در بخش چهارم، به منظور ارزیابی کارایی دبی سنج طراحی شده، نتایج شبیه سازی مدار پیشنهادی با استفاده از نرم افزار کامسول ارائه شده است. در نهایت، جمع بندی و نتیجه گیری کلی در بخش پنجم مطرح شده است.

۲- ابعاد دبی سنج جرمی کوریولیس دو لوله ای

شکل ۱ نمایی از دبی سنج جرمی کوریولیس دو لوله ای طراحی شده با استفاده از نرم افزار کامسول را از زوایای مختلف نشان می دهد. در این دبی سنج دو لوله به صورت هم زمان و هماهنگ در خلاف جهت یکدیگر به ارتعاش درمی آیند. با مقایسه ی پاسخ های ارتعاشی این دو لوله، می توان تأثیر اغتشاشات خارجی نظیر لرزش های مکانیکی محیط، نویزهای سیستمی، و تغییرات دمایی را تا حد زیادی حذف یا کاهش داد. این ویژگی موجب افزایش پایداری سیستم و بهبود دقت اندازه گیری جریان جرمی می شود. ابعاد کلی این دبی سنج برابر $166/67 \text{ mm} \times 50 \times 80$ می باشد. شکل ۱-الف نمای روبه رو (صفحه XZ) را نشان می دهد. در این نما، اجزای اصلی شامل یک پایه مکعب مستطیل از جنس آهن به ابعاد $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}$ ، لوله مسی با طول (L) $246/6 \text{ mm}$ ، شعاع داخلی (r_1) 1 mm و شعاع خارجی (r_2) $1/5 \text{ mm}$ ، نگه دارنده سنسورها در دو سمت بازوی لوله مسی و همچنین نگه دارنده عملگر قابل مشاهده است. شکل ۱-ب نمای جانبی دستگاه (صفحه YZ) را نمایش می دهد. در این نما، تقارن دو لوله مسی و مسیر ورودی سیال که بر

¹ Negative frequency correction

² Hilbert transform

³ Vector inner product

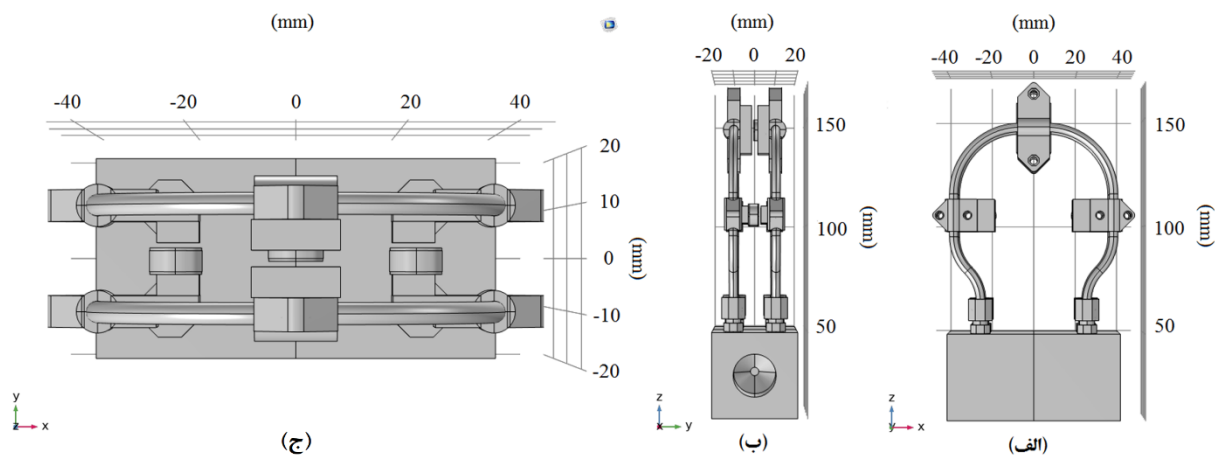
⁴ Digital phase-locked loop

⁵ Quadrature demodulation

⁶ Adaptive notch filter

⁷ Rapid calculation method: RCM

روی پایه مکعب تعبیه شده است به وضوح مشخص است. شکل ۱-ج نمای بالایی از دستگاه (صفحه XY) را نشان می دهد که دید کلی تری از نحوه چینش اجزا فراهم می کند. اطلاعات ارائه شده در این بخش به منظور ارائه تصویری کلی از طرح دبی سنج می باشد. جزئیات فنی هر بخش به طور کامل در بخش های بعدی مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱: نمای شماتیک دبی سنج جرمی کوریولیس دولوله ای پیشنهادی، طراحی شده در محیط نرم افزار COMSOL Multiphysics 5.6

۲-۱- تأثیر پارامترهای هندسی لوله در قابلیت دبی سنج کوریولیس

پارامترهای هندسی نظیر ضخامت و طول لوله مسی و انتخاب مناسب آن ها تأثیر بسزایی در ایجاد نیرو کوریولیس دارند. زمانی که لوله ها توسط عملگر در فرکانس بدنه لوله به نوسان در می آیند و تشدید اتفاق می افتد، عبور سیال از داخل لوله های در حال تشدید باعث ایجاد اختلاف فاز بین سنسورهای متصل بر روی بازوهای لوله مسی می شود. در این میان، ضخامت لوله نقش مهمی ایفا می کند. بر اساس روابط ریاضی ساده و با ثابت نگه داشتن شعاع داخلی لوله (r_{in}) برابر ۱ mm، وزن لوله در ضخامت های مختلف محاسبه می شود:

$$W_{Cu} = \rho_{Cu} L (\pi r_{out}^2 - \pi r_{in}^2) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، W_{Cu} بیانگر وزن لوله مسی، $\rho_{Cu} = 8960 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ چگالی مس، طول لوله (L) برابر ۲۴۶/۶ mm است. همچنین r_{in} و r_{out} به ترتیب شعاع داخلی و خارجی لوله مسی هستند. با در نظر گرفتن ضخامت های مختلف لوله، خواهیم داشت:

$$\text{If } d = 0.5mm, r_1 = 1mm, r_2 = 1.5mm \Rightarrow W_{Cu} = 35.168(g) \cdot L \quad (2)$$

$$\text{If } d' = 1mm, r_1' = 1mm, r_2' = 2mm \Rightarrow W_{Cu}' = 84.403(g) \cdot L \quad (3)$$

$$\text{If } d'' = 1.5mm, r_1'' = 1mm, r_2'' = 2.5mm \Rightarrow W_{Cu}'' = 147.705(g) \cdot L \quad (4)$$

در روابط (۲) تا (۴)، وزن لوله به صورت تابعی از طول آن محاسبه شده است و d نشان دهنده ضخامت لوله می باشد که در بازه ای بین ۰/۵ mm تا ۱/۵ mm تغییر می کند. در ادامه، با استفاده از رابطه (۵)، وزن سیال (آب) موجود درون لوله مسی محاسبه می شود:

$$W_{water} = \rho_{water} L (\pi r_{in}^2) = 3.13058(g) \cdot L \quad (5)$$

با در نظر گرفتن چگالی آب برابر $\rho_{Cu} = 997 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ، وزن سیال موجود در لوله مسی برابر $3/13058(g) \cdot L$ به دست آمد. با استفاده از رابطه (۶)، می توان فرکانس تشدید را برای دو حالت مختلف محاسبه کرد: زمانی که لوله مسی خالی است و حالتی که لوله با آب پر شده است:

$$\omega_r = 2\pi f_r = \sqrt{K/m} \quad (6)$$

ثابت فنر^۱ (K) بیانگر سختی دینامیکی لوله مسی بوده و در حالتی که لوله خالی است m تنها معادل جرم لوله مسی (m_{tube}) در نظر گرفته می شود. با جایگذاری روابط (۲) تا (۴) در رابطه (۶) فرکانس تشدید لوله خالی برای ضخامت های $d = 0.5 \text{ mm}$ ، $d' = 1.0 \text{ mm}$ و $d'' = 1.5 \text{ mm}$ به ترتیب برابر $f_{r(Cu)} = 0.168 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ ، $f_{r(Cu)} = 0.109 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ و $f_{r(Cu)} = 0.082 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ محاسبه می شود. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش وزن لوله مسی فرکانس تشدید آن کاهش می یابد. اکنون برای محاسبه فرکانس لوله مسی پر از آب، در رابطه (۶) به جای m مجموع جرم سیال (آب) و لوله مسی ($m_{tube} + m_{liquid}$)، در نظر گرفته می شود. در این حالت، فرکانس تشدید برای ضخامت های $d = 0.5 \text{ mm}$ ، $d' = 1.0 \text{ mm}$ و $d'' = 1.5 \text{ mm}$ به ترتیب برابر $f_{r(Cu+water)} = 0.161 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ ، $f_{r(Cu+water)} = 0.107 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ و $f_{r(Cu+water)} = 0.0814 \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{L}}$ است. در ادامه با استفاده از رابطه (۷)، میزان تأثیر جرم سیال و حرکت آن بر رفتار تشدید لوله مسی به دست می آید:

$$\text{effect of thickness (\%)} = \frac{f_{r(Cu+water)}}{f_{r(Cu)}} \quad (7)$$

که برای ضخامت های $d = 0.5 \text{ mm}$ ، $d' = 1.0 \text{ mm}$ و $d'' = 1.5 \text{ mm}$ درصد تأثیر ضخامت به ترتیب برابر $0.95/0.98$ و $0.99/0.99$ درصد محاسبه می شود. همان طور که از نتایج مشاهده می شود، با افزایش ضخامت لوله مسی، درصد تأثیر سیال (آب) بر رفتار دینامیکی لوله در حالت تشدید کاهش می یابد. بنابراین، انتخاب لوله مسی با ضخامت $d = 0.5 \text{ mm}$ به عنوان بهترین گزینه برای ادامه طراحی دستگاه دبی سنج جرمی کوریولیس به منظور اندازه گیری جریان های کم پیشنهاد می شود.

۳- توضیحات روش محاسباتی سریع (RCM)

اصل عملکرد دبی سنج جرمی کوریولیس پیشنهادی بر مبنای عبارت جبری زیر است:

$$F_{Coriolis} = 2\rho_{Fluid} \overline{V_{Fluid}} \times \overline{\omega_{Tube}} = 2\rho_{Fluid} V_{Fluid} (\omega_0 \text{CurlX}) \quad (8)$$

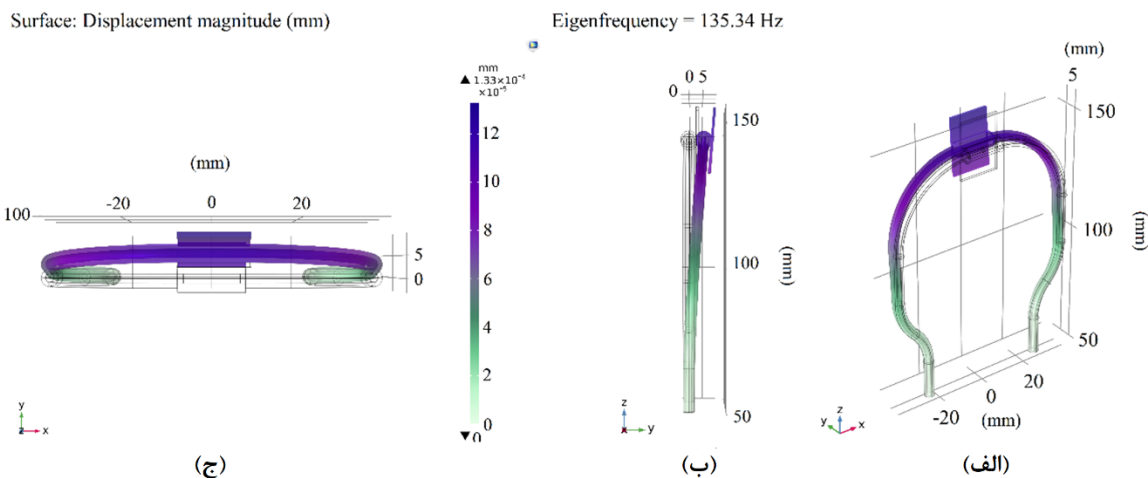
که در رابطه (۸) ρ_{Fluid} چگالی سیال، $\overline{V_{Fluid}}$ سرعت سیال در راستای محور Z و $\overline{\omega_{Tube}}$ سرعت لوله مسی در راستای محور X است. در روش محاسباتی سریع برای تعیین نیروی کوریولیس به منظور رسیدن به سرعت لوله مسی ($\overline{\omega_{Tube}}$)، به جای محاسبه کرل سرعت، از کرل جابجایی (CurlX) استفاده شده و نتیجه در فرکانس طبیعی (ω_0) لوله ضرب می شود. این رویکرد، ساده سازی قابل توجهی در تحلیل دینامیکی ایجاد می کند. در روش RCM هر چند چگالی سیال به طور مستقیم در فرمول نیروی کوریولیس وارد شده است، این به معنای وابستگی عملکرد دبی سنج به چگالی سیال نیست. در سیستم واقعی، اثر چگالی از طریق اختلاف فاز یا جابجایی نسی دو بازوی لوله شناسایی می شود و نیازی به دانستن مقدار دقیق چگالی نمی باشد. بنابراین، ادعای عدم وابستگی عملکرد دبی سنج به ویژگی های سیال همچنان معتبر است، زیرا اندازه گیری بر پایه ی پاسخ دینامیکی خود سیستم انجام می شود نه محاسبه مستقیم ویژگی های سیال. در ادامه، هر یک از اجزای رابطه (۸) به صورت مجزا مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۱- فرکانس طبیعی لوله مسی

به منظور دستیابی به فرکانس طبیعی بدنه لوله مسی، مدل سازی مستقیم اجزایی مانند نگه دارنده و عملگر در نظر گرفته نشد و به جای آن، از یک صفحه معادل که در مرکز لوله متصل شده بود، استفاده شد. لوله مسی با مشخصات طول $L = 246/6 \text{ mm}$ ، شعاع داخلی $r_1 = 0.5 \text{ mm}$ و شعاع خارجی $r_2 = 1.5 \text{ mm}$ ، در محیط شبیه سازی نرم افزار کامسول طراحی و تحلیل شد. فرکانس طبیعی بدنه لوله مسی در حالتی که صفحه معادل به آن متصل است از طریق این شبیه سازی برابر با $f_0 = 135/34 \text{ Hz}$ به دست آمد. شکل ۲، نتایج

¹ Vector inner product

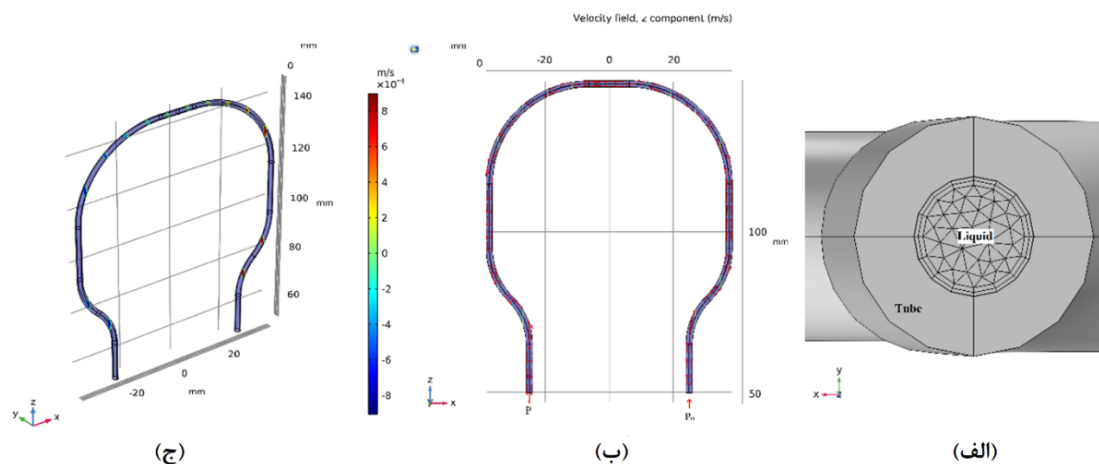
شبهه سازی را نشان می دهد که در آن فرکانس تشدید و میزان جابجایی مشخص شده است. این فرکانس به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی، مبنای محاسبات بعدی نیروی کوریولیس خواهد بود.



شکل ۲: نمایی از فرکانس طبیعی لوله مسی با مشخصات هندسی معین

۲-۳- حل Fluidic جریان توربولانس سیال

هدف از انجام تحلیل سیال (Fluidic) دستیابی به توزیع سرعت سیال در نقاط مختلف داخل لوله مسی است. در این تحلیل، سیال مورد استفاده آب در نظر گرفته شده و فضای داخلی لوله مسی تا شعاع r_1 به طور کامل با این سیال پر شده است. به دلیل ماهیت متلاطم (توربولانس) جریان، تنها ناحیه سیال در نرم افزار کامسول مش بندی شده است تا تمرکز تحلیل بر روی تغییرات سرعت در این ناحیه باشد. در این مدل، یک سمت لوله به عنوان ورودی (Inlet) در نظر گرفته شده که در آن، آب با فشار اولیه $P_0 = 1 \text{ Pa}$ وارد می شود. سمت دیگر لوله به عنوان خروجی (Outlet) در نظر گرفته شده و فشار آن برابر با $P = 0 \text{ Pa}$ تعریف شده است. شکل ۳ نتایج مربوط به حل جریان توربولانس سیال را نشان می دهد. در شکل ۳-الف، مش بندی ناحیه سیال با دقت Fine نمایش داده شده است. شکل ۳-ب جهت ورودی، حرکت و خروج سیال در طول لوله را نشان می دهد و شکل ۳-ج توزیع سرعت سیال در مقاطع مختلف لوله مسی را ارائه می کند. با توجه به محل قرارگیری سیم پیچ های مربوط به سنسورها در دو سوی بازوی لوله مسی، سرعت سیال در این نواحی اهمیت بیشتری دارد. بر اساس نتایج شبهه سازی، سرعت سیال در این نقاط برابر با $V_{water} = 5 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ محاسبه شده است.



شکل ۳: تحلیل جریان سیال در لوله مسی: (الف) مش بندی ناحیه سیال با دقت Fine، (ب) مسیر ورود و خروج سیال در لوله، (ج) توزیع سرعت سیال در مقاطع مختلف لوله مسی

۳-۳- حل مکانیکی حالت پایدار

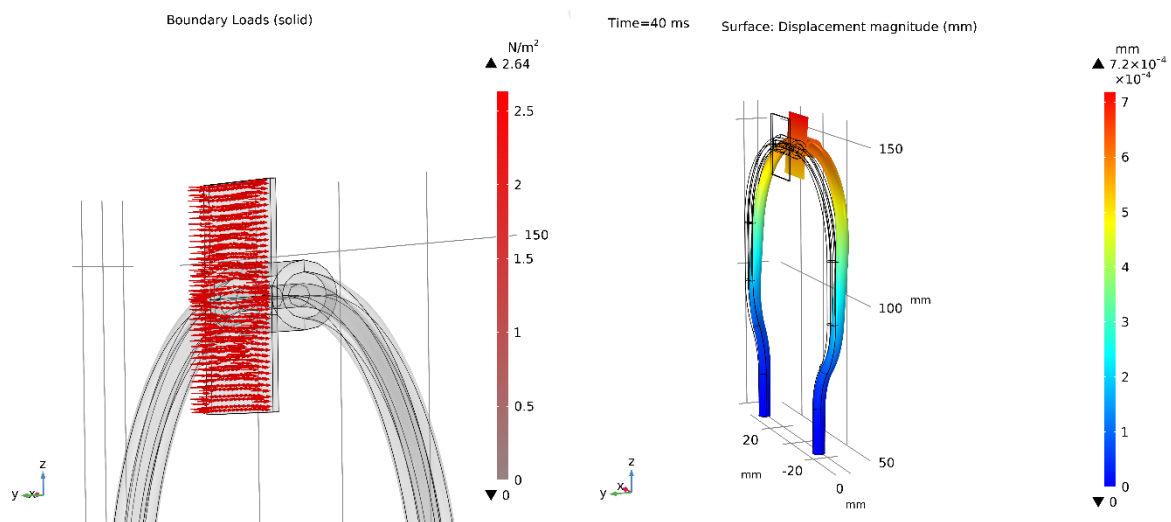
در تحلیل مکانیکی، به منظور در نظر گرفتن اثر هم زمان لوله مسی و سیال درون آن، یک ماده معادل تعریف می گردد که خواص مکانیکی آن بین مس و سیال توزیع شده است. بنابراین، لازم است چگالی معادل و همچنین مدول یانگ مؤثر این ماده ترکیبی تعیین گردد. همانطور که می دانیم چگالی لوله مسی و آب به ترتیب برابر $\rho_{Cu} = 8960 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ و $\rho_{Water} = 997 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ است، از طریق رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$\rho_i = \rho_{Cu} \frac{(r_2)^2 - (r_1)^2}{(r_2)^2} + \rho_{Water} \frac{(r_1)^2}{(r_2)^2} = 8960 \frac{(1.5)^2 - (1)^2}{(1.5)^2} + 997 \frac{(1)^2}{(1.5)^2} = 5420.88 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، چگالی ماده معادل حاصل از ترکیب لوله مسی و سیال درون آن، برابر با $\rho_i = 5420 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ محاسبه شد. به منظور تعیین مدول یانگ ماده معادل، با توجه به اینکه آب در حالت مایع دارای مقاومت کششی و برشی قابل توجهی نیست، مدول یانگ آن عملاً صفر در نظر گرفته می شود، با در نظر گرفتن مدول یانگ مس برابر $E_{Cu} = 100(GPa)$ ، خواهیم داشت:

$$E_i = E_{Cu} \cdot \frac{(r_2)^2 - (r_1)^2}{(r_2)^2} = 100 \cdot \frac{(1.5)^2 - (1)^2}{(1.5)^2} = 55.5(GPa) \quad (10)$$

با استفاده از چگالی و مدول یانگ به دست آمده از روابط (۹) و (۱۰)، ماده معادل تعریف گردیده و مش بندی برای کل ساختار لوله مسی انجام شد. سپس، یک صفحه با ابعاد مشخص به مرکز لوله مسی، در محل قرارگیری عملگر، متصل گردید. نیروی محرک به صورت تابع ثابت با دامنه مشخص $(F_{act} = 3/42)$ ، در خلاف جهت محور y به صفحه مذکور اعمال شد. این نیرو موجب تغییر شکل لوله مسی در راستای محور y می گردد و فرض ما این است تمام نقاط با همین دامنه با فرکانس طبیعی با $f_b = 135/34 Hz$ با نوسان خواهد کرد. بیشینه جابجایی لوله مسی حاصل از اعمال این نیرو بر صفحه برابر $A = 7/2 \times 10^{-4} mm$ محاسبه شده است (شکل ۴).



شکل ۴: بیشینه جابجایی لوله مسی در اثر اعمال نیروی سینوسی با فرکانسی برابر با فرکانس تشدید طبیعی لوله

همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، حرکت سیال در راستای محور Z و جابجایی حاصل از تحریک مکانیکی لوله مسی در راستای محور Y رخ می دهد. در شرایطی که لوله مسی در فرکانس تشدید طبیعی خود نوسان می کند و هم زمان سیال از آن عبور می کند، نیروی کوریولیس در اثر این برهم کنش باعث ایجاد اختلاف فاز بین دو بازوی چپ و راست لوله می شود.

در این وضعیت، آنچه از نظر دینامیکی اهمیت می یابد، بسامد زاویه ای نوسان لوله ($\bar{\omega} = \text{Curl} \bar{u}$) است. برای به دست آوردن آن، از مقدار کرل جابجایی (CurlX) استفاده می شود که در نهایت در فرکانس طبیعی (ω_0) لوله مسی ضرب می گردد تا مؤلفه مؤثر سرعت زاویه ای به دست آید:

$$\bar{\omega} = \text{Curl} \bar{u} = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{bmatrix} \quad (11)$$

طبق توضیحات داده شده تنها مؤلفه $a_x \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$ مدنظر خواهد بود اگر جابجایی لوله مسی بر اثر اعمال نیروی خارجی را به صورت $x = x_0 \cos \omega t$ در نظر بگیریم سرعت لوله مسی برابر خواهد بود با:

$$\bar{u} = \frac{\partial x}{\partial t} = x_0 \omega_0 \sin \omega_0 t \quad (12)$$

$$|\bar{\omega}| = \text{curl} |\bar{u}| = \omega_0 \text{curl} |x| = 2\pi f_b \text{curl} |x| = 2 \cdot 3.14 \cdot 135.34 \cdot 5.2737E-6 = 4.48 \times 10^{-3} (1/s) \quad (13)$$

همانطور که از رابطه (۱۳) بر می آید جهت دستیابی به سرعت لوله مسی از جابجایی کرل گرفته شده است در این رابطه $\omega_0 = 2\pi f_b$ و مقدار کرل جابجایی در نقاطی که سنسورهای تشخیص اختلاف فاز در آن قرار دارند (بازوهای چپ و راست لوله مسی) بیانگر نرخ چرخش میدان برداری جابجایی در فضای دوبعدی صفحه yz می باشد که در شبیه سازی انجام شده با نرم افزار کامسول برابر $6 \times 10 \times 5/2737 \times 10^{-3} (1/s)$ گزارش شده است که در نهایت سرعت لوله مسی برابر $4.48 \times 10^{-3} (1/s)$ محاسبه گردید.

۳-۴- حل مکانیکی بر اثر اعمال نیروی کوریولیس

همان گونه که پیش تر نیز بیان شد، روال طراحی دبی سنج جرمی کوریولیس پیشنهادی مبتنی بر رابطه ی جبری ارائه شده در معادله (۸) می باشد. در بخش های پیشین، هر یک از مؤلفه های این رابطه به طور جداگانه به دست آمده اند. در صورتی که سیال عبوری آب در نظر گرفته شود، پارامترهای مؤثر شامل چگالی آب، سرعت جریان سیال داخل لوله مسی و سرعت نوسانی لوله مسی به ترتیب برابر $\rho_{water} = 997 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ ، $V_{water} = 5 \times 10^{-4} (m/s)$ و $\omega_{tube} = 4.48 \times 10^{-3} (1/s)$ خواهد بود. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۸)، مقدار نیروی کوریولیس مؤثر وارد بر لوله مسی در حضور جریان سیال طبق رابطه (۱۴) برابر $4.37 \times 10^{-3} \left(\frac{N}{m^3} \right)$ محاسبه می شود که مبنای تعیین اختلاف فاز بین بازوها و در نتیجه محاسبه دبی جرمی سیال خواهد بود.

$$F_{Coriolis} = 2\rho_{Fluid} \bar{V}_{Fluid} \times \bar{\omega}_{Tube} = 2\rho_{Fluid} V_{Fluid} (\omega_0 \text{Curl} X) = 2 * 977 * 5E-4 * 4.48 \times 10^{-3} = 4.37 \times 10^{-3} \left(\frac{N}{m^3} \right) \quad (14)$$

از آنجایی که عبور سیال از درون لوله ای که در فرکانس طبیعی خود در حال نوسان است، منجر به ایجاد اختلاف فاز ϕ بین دو بازوی چپ و راست لوله می شود، لذا این پدیده در سیگنال های دریافتی توسط سنسورها که در دو بازو نصب شده اند قابل مشاهده و اندازه گیری خواهد بود. به منظور تحلیل این اثر، سرعت نوسانی سنسورها در دو سمت لوله را با نمادهای V_R (برای بازوی راست) و V_L (برای بازوی چپ) نمایش می دهیم. با در نظر گرفتن اختلاف فاز ϕ ، روابط بین این سرعت ها به صورت زیر قابل بیان است:

$$V_R = A \cos(\omega_0 t + \frac{\varphi}{2}) = A \cos \omega_0 t \cdot \cos \frac{\varphi}{2} - A \sin \omega_0 t \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (15)$$

$$V_L = A \cos(\omega_0 t - \frac{\varphi}{2}) = A \cos \omega_0 t \cdot \cos \frac{\varphi}{2} + A \sin \omega_0 t \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (16)$$

با توجه به اینکه مقدار اختلاف فاز بسیار کوچک است ($\frac{\varphi}{2} \rightarrow 0$)، در نتیجه ($\cos \frac{\varphi}{2} = 1$ ، $\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\varphi}{2}$)، حال روابط (۱۵) و (۱۶)

ساده سازی می شوند:

$$V_R = A \cos \omega_0 t - A \sin \omega_0 t \cdot \frac{\varphi}{2} \quad (17)$$

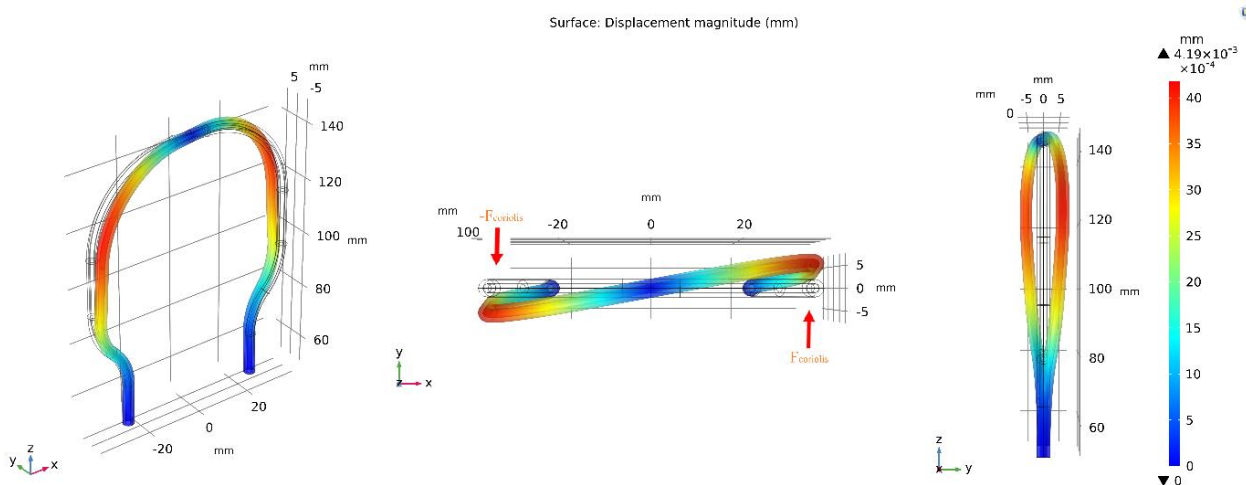
$$V_L = A \cos \omega_0 t + A \sin \omega_0 t \cdot \frac{\varphi}{2} \quad (18)$$

$$V_L - V_R = A \varphi \sin \omega_0 t = A' \sin \omega_0 t \quad (19)$$

رابطه (۱۹) بیان گر اختلاف فاز φ بین دو سنسور نصب شده بر روی بازوهای چپ و راست لوله مسی است. براساس تحلیل مکانیکی، دامنه جابجایی نوسانی لوله در حالت تشدید برابر $A = \sqrt{2} \times 10^{-4} \text{ mm}$ محاسبه شد. در ادامه، نیروی کوریولیس محاسبه شده از رابطه (۱۶) در محل استقرار سنسورها به صورت مقارن اعمال شد؛ یک نیرو در راستای محور y بر بازوی راست و نیرویی برابر در خلاف جهت محور y بر بازوی چپ لوله وارد شد. این اعمال مقارن نیرو منجر به جابجایی نسبی (A') دو سر لوله در اثر اعمال نیروی کوریولیس شده که از تحلیل زمانی سیستم در شرایط تحریک با فرکانس تشدید و عبور سیال برابر $4/19 \times 10^{-3} \text{ mm}$ $A' =$ به دست می آید که در شکل ۵ نمایش داده شده است. هدف اصلی این تحلیل، محاسبه دقیق اختلاف فاز φ میان سنسورهای دو طرف لوله است. با استفاده از رابطه (۱۹)، مقدار اختلاف فاز به صورت زیر محاسبه شد:

$$A \varphi = A' \rightarrow \varphi = \frac{A'}{A} = \frac{4.19 \times 10^{-3}}{7.2 \times 10^{-4}} = 5.8^\circ \quad (20)$$

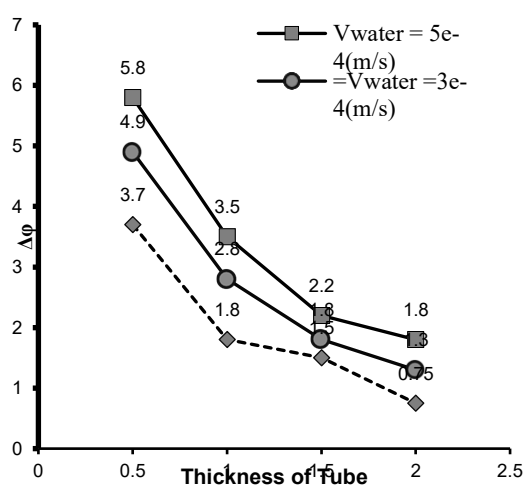
رابطه (۲۰) میزان اختلاف فاز بین دو سنسور نصب شده بر روی بازوهای لوله مسی را پس از اعمال نیروی کوریولیس مشخص می کند. بر اساس نتایج شبیه سازی، مقدار اختلاف فاز برابر $\varphi = 5.8^\circ$ به دست آمد که مقداری قابل قبول برای عملکرد دبی سنج جرمی کوریولیس محسوب می شود. این مقدار، مستقیماً به عنوان خروجی قابل اندازه گیری توسط دبی سنج جرمی کوریولیس مورد استفاده قرار می گیرد و به نرخ دبی جرمی سیال عبوری وابسته است. نمودار مربوط به این اختلاف فاز در شکل ۵ ارائه شده است و نشان دهنده اثر مستقیم نیروی کوریولیس بر جابجایی نسبی بازوها است.



شکل ۵: جابجایی بازوهای لوله مسی در اثر اعمال نیروی کوریولیس در نقاط استقرار سنسورها

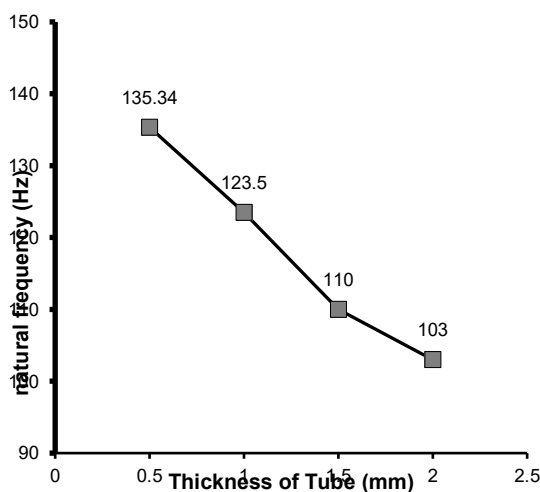
۴- نتایج شبیه سازی

دستگاه دبی سنج جرمی کوریولیس در مقیاس میلی متری طراحی است. شکل ۶ تغییرات اختلاف فاز بین سنسورهای متصل به بازوهای چپ و راست لوله مسی را نسبت به ضخامت لوله و سرعت سیال (آب) نشان می دهد. مطابق نمودار، با کاهش سرعت سیال و افزایش ضخامت لوله مسی، میزان تغییرات اختلاف فاز به طور محسوسی کاهش می یابد. این کاهش به گونه ای است که در سرعت های پایین و لوله هایی با ضخامت بیشتر، آشکارسازی اختلاف فاز مستلزم استفاده از مدارات الکترونیکی با دقت و پیچیدگی بالا خواهد بود. نکته قابل توجه آن است که افزایش ضخامت لوله تأثیر بیشتری نسبت به کاهش سرعت سیال در کاهش اختلاف فاز دارد. به عنوان مثال، در حالتی که ضخامت لوله برابر با ۰/۵ mm در نظر گرفته شده است، بیشینه اختلاف فاز در سرعت سیال (m/s) 5.8×10^{-4} مقدار 5.8° به دست آمد.



شکل ۶: اختلاف فاز بین سنسورهای بازوهای چپ و راست لوله مسی بر اثر نیروی کوریولیس در ضخامت ها و سرعت های مختلف سیال

در شکل ۷، تأثیر تغییر ضخامت لوله مسی بر فرکانس طبیعی لوله نمایش داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص است، افزایش ضخامت لوله منجر به کاهش فرکانس طبیعی آن می شود. این روند به دلیل افزایش جرم مؤثر لوله است که در نتیجه آن، پاسخ دینامیکی سیستم کندتر می شود. به عنوان نمونه، در ضخامت ۰/۵ mm، بیشینه مقدار فرکانس طبیعی برابر با ۱۳۵/۳۴ Hz به دست آمد.



شکل ۷: تغییرات ضخامت لوله مسی نسبت به فرکانس طبیعی لوله

جدول ۱: مقایسه بین کار پیشنهادی با کارهای پیشین

| نکته نوآورانه | جنس لوله | پردازش سیگنال | روش تحریک | نوع ساختار لوله | تاریخ انتشار | عنوان مقاله |
|--|-------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|
| استفاده از کرل جابجایی برای استخراج سرعت | مسی ($r1=1mm$, $r2=1.5mm$) | آنالوگ | الکترومغناطیسی | دو لوله U شکل مسی | - | کار پیشنهادی |
| حجم بسیار کوچک و مجتمع | سیلیکون میکروماشین | دامنه/فاز متقارن | پیزوالکتریک | میکرو لوله U شکل | ۲۰۱۳ | [3] |
| مدل سازی دقیق FSI | استیل / آلیاژ | اختلاف FEM + فاز | نیروی مکانیکی خارجی | دو لوله U شکل | ۲۰۲۱ | [4] |
| روش جدید برای تشخیص فاز | نامشخص | هیلبرت ترنسفورم | بدون تحریک (پردازش سیگنال) | نامشخص (پردازش سیگنال) | ۲۰۱۸ | [11] |
| استفاده از پرینت سه بعدی | پلاستیک چاپ سه بعدی | سنی + تجربی | اکتشافی (بدون تحریک خاص) | چاپ سه بعدی | ۲۰۲۳ | [15] |
| کاربرد صنعتی | سیلیکون MEMS | تقویت سیگنال صنعتی | الکترومغناطیسی | صنعتی MEMS | ۲۰۰۸ | [19] |
| سنسور چگالی و جرم همزمان | سیلیکون | آنالوگ → دیجیتال | Micromachined Excitation | Micromachined | ۲۰۰۱ | [20] |
| طراحی/مدل سازی MEMS | سیلیکون | پایش فاز و دامنه | پیزوالکتریک | میکروسیستم U شکل | ۲۰۱۰ | [23] |
| تحریک با PZT Thin Film | سیلیکون با PZT | تجزیه طیفی | PZT Thin Film | PZT-driven microtube | ۲۰۲۱ | [25] |
| سیستم ساده با خروجی مقاومتی | سیلیکون | خوانش مقاومتی | مقاومتی (Resistive) | با μ -Coriolis خوانش مقاومتی | ۲۰۲۰ | [26] |

در این مقاله، رویکردی نوآورانه برای استخراج سرعت لوله ارتعاشی با استفاده از عملگر کرل بر روی میدان جابجایی به دست آمده از شبیه سازی ارائه شده است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که مستقیماً از فاز یا دامنه سیگنال های جابجایی استفاده کرده اند، در این روش ابتدا جابجایی لوله در نقاط مختلف محاسبه شد، سپس با اعمال کرل، میدان سرعت استخراج شد و بر اساس آن نیروی کوریولیس به دست آمد. این روش نیاز به انجام تحلیل وابسته به زمان را حذف کرده و باعث کاهش زمان محاسباتی می شود، در حالی که دقت قابل قبولی نیز حاصل شده است (۵/۸ درجه اختلاف فاز در سرعت پایین). همچنین استفاده از لوله های مسی با شعاع های متفاوت (۱ و ۱/۵ میلی متر) در ساختار U شکل، علاوه بر نزدیک تر کردن طراحی به کاربردهای پزشکی و داروسازی، هزینه ساخت را نسبت به ساختارهای MEMS و پیزوالکتریک کاهش داده و پیاده سازی آن را در مقیاس واقعی ساده تر می کند. در مجموع، کار پیشنهادی ترکیبی از مدل سازی فیزیکی ساده، پردازش عددی مبتنی بر هندسه و استفاده از مصالح قابل دسترس ارائه می دهد که می تواند مبنای توسعه دبی سنج های قابل اعتماد برای کاربردهای حساس و کم هزینه باشد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، طراحی و تحلیل یک دبی سنج جرمی کوریولیس دو لوله ای در مقیاس میلی متری با استفاده از نرم افزار کامسول و با تکیه به روش محاسباتی سریع ابداعی انجام گرفت. تمرکز اصلی بر شبیه سازی مکانیکی، دینامیکی و سیالاتی ساختار لوله مسی و بررسی اثرات مختلفی مانند ضخامت لوله، سرعت سیال، و نیروی کوریولیس بر عملکرد سیستم بود. نتایج نشان داد که ضخامت لوله مسی تأثیر مستقیم و معکوس بر فرکانس طبیعی و اختلاف فاز سنسورها دارد؛ به طوری که کاهش ضخامت از ۱/۵ mm به mm

۰/۵، موجب افزایش قابل توجه در فرکانس طبیعی لوله و نیز افزایش اختلاف فاز ناشی از نیروی کوریولیس شد. از سوی دیگر، با کاهش سرعت جریان سیال، تغییرات اختلاف فاز به شدت کاهش می یابد و این امر، دقت اندازه گیری را در سرعت های پایین دشوارتر می کند. با بررسی حالت های مختلف، ضخامت ۰/۵ mm برای لوله مسی به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد، زیرا ضمن حفظ فرکانس تشدید بالا، بیشترین اختلاف فاز را در سرعت های پایین سیال فراهم می کند و امکان تشخیص دقیق جریان های کم را میسر می سازد. در مجموع، مدل ارائه شده در این تحقیق پایه ای مناسبی برای توسعه دبی سنچ های کوریولیس دقیق و کم حجم فراهم می کند و می تواند در طراحی سامانه های اندازه گیری جریان سیالات با دقت بالا و ابعاد کوچک، مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] Enoksson, Peter; Stemme, Göran; Stemme, Erik, "A Coriolis Mass Flow Sensor Structure in Silicon," Proceedings of the IEEE International Workshop on Micro Electromechanical Systems (MEMS), 1996, 11–15 Feb, San Diego, USA.
- [2] Wang, Tao; Baker, Roger, "Coriolis flowmeters: A review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions," Flow Measurement and Instrumentation, 2014, Vol. 40, pp. 1–11.
- [3] Sparreboom, Wouter; Van de Geest, Jan; Katerberg, Marcel; Postma, Ferry; Haneveld, Jeroen; Groenesteijn, Jarno; Lammerink, Theo; Wiegerink, Remco; Lötters, Joost, "Compact Mass Flow Meter Based on a Micro Coriolis Flow Sensor," Micromachines, 2013, Vol. 4, No. 1, pp. 22–33.
- [4] Hu, Yuh-Chung; Chen, Zen-Yu; Chang, Pei-Zen, "Fluid–Structure Coupling Effects in a Dual U-Tube Coriolis Mass Flow Meter," Sensors, 2021, Vol. 21, No. 3, Article 982.
- [5] Groenesteijn, Jarno; de Boer, Michiel J.; van Putten, Jeroen; Sparreboom, Wouter; Lötters, Joost C.; Wiegerink, Remco J., "Fabrication of Free Hanging Tubes for a High Flow Micro-Coriolis Mass Flow Meter," Proceedings of the 4th Conference on Microfluidic Handling Systems, 2019, pp. 93–96.
- [6] Alveringh, Dennis; Wiegerink, Remco J.; Lötters, Joost C., "Integrated Pressure Sensing Using Capacitive Coriolis Mass Flow Sensors," Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, Vol. 26, No. 3, pp. 653–661.
- [7] Zhang, Yanjin; Liu, Yajun; Liu, Zhendong; Liang, Weiping, "Developing a Long Short-Term Memory-based Signal Processing Method for Coriolis Mass Flowmeter," Measurement, 2019, Vol. 137, pp 106896.
- [8] Anklin, Martin; Drahm, Wolfgang; Rieder, Alfred, "Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research," Flow Measurement and Instrumentation, 2006, Vol. 17, No. 6, pp. 317–323.
- [9] Chen, Kun; Zheng, Dezhi; Fan, Shangchun; Li, Fan; Zhao, Jianhui, "Novel Coriolis Mass Flowmeter Signal Processing Algorithms Based on DFT and Digital Correlation," Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA), 2010, 3–5 Oct, Penang, Malaysia, pp. 56–60.
- [10] Tu, Yaqing; Zhang, Haitao, "Method for CMF Signal Processing Based on the Recursive DTFT Algorithm With Negative Frequency Contribution," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, Vol. 57, No. 11, pp. 2647–2654.
- [11] Lin, Wei; Zhao, Jing-Lei, "A Novel Method Based on Hilbert Transform for Signal Processing of Coriolis Mass Flowmeter," International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2018, Vol. 32, No. 10, Article 1858001.
- [12] Yang, Huiyue; Tu, Yaqing; Zhang, Haitao; Yang, Kanghui, "A Hilbert Transform Based Method for Dynamic Phase Difference Measurement," Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2012, 23–25 May, Taiyuan, China, pp. 2115–2119.
- [13] Yi, Peng; Tu, Yaqing; Xie, Min; Shen, Ting'ao, "Analysis of Phase Difference Tracking Methods for Signal of Coriolis Mass Flowmeter," Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012, 6–8 July, Beijing, China, pp. 502–507.
- [14] Ruoff, Jürgen; Gauchel, Wolfgang; Kück, Heinz, "Analysis of Signal Processing Algorithms of Coriolis Mass Flowmeters," Key Engineering Materials, 2014, Vol. 605, pp. 408–411.

- [15] Yariesbouei, Mahdiah; Sanders, Remco G. P.; Wiegerink, Remco J.; Lötters, Joost C., "Modeling, Fabrication, and Testing of a 3D-Printed Coriolis Mass Flow Sensor," *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 8, Article 4062.
- [16] Enoksson, Peter; Stemme, Göran; Stemme, Erik, "Fluid Density Sensor Based on Resonance Vibration," *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, Vol. 47, pp. 327–331.
- [17] Enoksson, Peter; Stemme, Göran; Stemme, Erik, "A Silicon Resonant Sensor Structure for Coriolis Mass-Flow Measurements," *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, Vol. 6, No. 2, pp. 119–125.
- [18] Najmzadeh, Mohammad; Haasl, Stefan; Enoksson, Peter, "A Silicon Straight Tube Fluid Density Sensor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, Vol. 17, No. 8, Article 1657
- [19] Smith, Richard; Sparks, David R.; Riley, David; Najafi, Nader, "A MEMS-Based Coriolis Mass Flow Sensor for Industrial Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, Vol. 56, No. 4, pp. 1066–1071.
- [20] Zhang, Yan; Tadiadapa, Srinivas; Najafi, Nader, "A Micromachined Coriolis-Force-Based Mass Flowmeter for Direct Mass Flow and Fluid Density Measurement," in *Transducers' 01 Eurosensors XV*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2001, pp. 1432–1435.
- [21] Sparks, David; Smith, Richard; Massoud-Ansari, Shahram; Najafi, Nader, "Coriolis Mass Flow, Density and Temperature Sensing with a Single Vacuum Sealed MEMS Chip," in *Proceedings of the Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop*, Hilton Head Island, SC, USA, June 6–10, 2004, Vol. 4.
- [22] Dijkstra, Maarten; de Boer, Michiel J.; Berenschot, Jeroen W.; Lammerink, Theo S.; Wiegerink, Remco J.; Elwenspoek, Miko, "A Versatile Surface Channel Concept for Microfluidic Applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, Vol. 17, No. 10, Article 1971.
- [23] Haneveld, Jeroen; Lammerink, Theo S.; de Boer, Michiel J.; Sanders, Remco G.; Mehendale, Ashish; Lötters, Joost C.; Dijkstra, Maarten; Wiegerink, Remco J., "Modeling, Design, Fabrication and Characterization of a Micro Coriolis Mass Flow Sensor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, Vol. 20, No. 12, Article 125001.
- [24] Sparreboom, Wouter; van de Geest, Jeroen; Katerberg, Maarten; Postma, Feiko; Haneveld, Jeroen; Groenesteijn, Joost; Lammerink, Theo S.; Wiegerink, Remco J.; Lötters, Joost C., "Compact Mass Flow Meter Based on a Micro Coriolis Flow Sensor," *Micromachines*, 2013, Vol. 4, No. 1, pp. 22–33.
- [25] Zeng, Yufeng; Groenesteijn, Joost; Alveringh, Dennis; Wiegerink, Remco J.; Lötters, Joost C., "Design, Fabrication, and Characterization of a Micro Coriolis Mass Flow Sensor Driven by PZT Thin Film Actuators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2021, Vol. 30, No. 6, pp. 885–896.
- [26] Schut, Tim; Wiegerink, Remco J.; Lötters, Joost C., " μ -Coriolis Mass Flow Sensor with Resistive Readout," *Micromachines*, 2020, Vol. 11, No. 2, Article 184.