

### شبیه‌سازی المان محدود ارتعاشات دبی سنج جرمی کوریولیس

زهرا جعفری شهباززاده<sup>۱\*</sup>، آرش امیدواری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> ایران، شیراز، خیابان ملاصدرا، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز، دکترای تخصصی گرایش کنترل، دینامیک و ارتعاشات

<sup>۲</sup> ایران، شیراز، خیابان ملاصدرا، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز، دانشجوی دکترای تخصصی گرایش طراحی کاربردی

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [z.jafari@shirazu.ac.ir](mailto:z.jafari@shirazu.ac.ir)

#### چکیده

دبی سنج جرمی کوریولیس برای اندازه‌گیری دقیق دبی جرمی و چگالی سیال عبوری بکار می‌رود. این در حالیست که اغلب دبی‌سنج‌های موجود قادر به اندازه‌گیری مستقیم این دو پارامتر نیستند و با اندازه‌گیری دبی حجمی به صورت غیر مستقیم دبی جرمی و همچنین چگالی را محاسبه می‌نمایند. در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی دبی سنج جرمی کوریولیس پرداخته شده است. همانطور که از نام آن بر می‌آید؛ اساس کار آن نیروی کوریولیس به وجود آمده ناشی از حرکت سیال درون لوله و مختلف‌الجهت بودن این نیرو در بخش ورودی و خروجی سیال خواهد بود. برای شبیه‌سازی عددی آن از نرم افزار المان محدود کامسول و تحلیل متقابل سیال-جامد استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اثر دبی جرمی و چگالی سیال عبوری از درون لوله‌های دبی سنج بر روی اختلاف فاز حسگرهای دو سمت لوله و جابه‌جایی نقطه انتهایی آن کاملاً مشهود است. لذا در نمونه آزمایشگاهی این محصول، پس از انجام مراحل کالیبراسیون و محاسبه مقادیر مربوط به آن، با استفاده از اختلاف فاز سنسورهای نصب شده دبی جرمی سیال عبوری را اندازه‌گیری نمود.

---

**کلمات کلیدی:** دبی‌سنج جرمی؛ نیروی کوریولیس؛ روش المان محدود؛ نرم‌افزار کامسول.

---

#### ۱- مقدمه و مروری بر پیشینه تحقیق

مسئله اندازه‌گیری دبی حجمی و دبی جرمی سیالات از چند قرن گذشته موردبحث بوده است. بخش عمده‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری (مانند دبی‌سنج‌های توربینی و دبی‌سنج‌های با سطح مقطع متغیر مثل ونتوری و اوریفیس) دبی حجمی را اندازه می‌گیرند. اندازه‌گیری دبی حجمی، عمدتاً به صورت غیرمستقیم و به کمک اندازه‌گیری سرعت یا تغییر در انرژی جنبشی صورت می‌گیرد [۱]. دبی‌سنج‌های جرمی کوریولیس برای اندازه‌گیری مستقیم دبی جرمی به صورت مستقل از دبی حجمی با خطای کم بکار می‌روند. به

همین دلیل به صورت گسترده در بسیاری از صنایع جهت سنجش دبی جرمی بکار می‌روند [۲]. همچنین به صورت همزمان قادر به اندازه‌گیری چگالی سیال عبوری نیز هستند. این نوع دبی‌سنج‌ها می‌توانند با دقتی در حدود ۰.۱٪ دبی جرمی را اندازه‌گیری کنند [۳]. دبی‌سنج‌های کوریولیس در هندسه‌های مختلف و با استفاده از آلیاژهای مختلف ساخته می‌شوند. برای دستیابی به بهترین انتخاب برای پیکربندی و جنس، بایستی در چندین دبی سیال شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌هایی انجام شود.

در سال ۲۰۰۲ الخمیس و همکاران [۴] ارزیابی عملکرد سه هندسه لوله U شکل، لوله U شکل بهبودیافته و لوله مستقیم را برای دبی‌سنج کوریولیس ارائه نمودند. تست‌های فوق در یک واحد چندفازی فشرده در بخش ساحلی در عربستان سعودی صورت گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها با داده‌های شبیه‌سازی دبی‌سنج توربینی نصب شده در یک جداکننده آزمایشی معمولی مقایسه شده اند. در سال ۲۰۰۶ گوپتا و همکاران [۵]، تست‌های عملی بر روی دبی‌سنج‌های کوریولیس با هندسه‌های لوله‌های U شکل، S شکل، L شکل و پلکانی با در نظر گرفتن آب به عنوان سیال مورد آزمایش انجام دادند. در این پژوهش برای طیف وسیعی از پارامترها مانند محل قرارگیری سنسورها، هندسه و خواص ماده حساسیت دبی‌سنج اندازه‌گیری شد.

از جمله عوامل دیگر تاثیرگذار در عملکرد دبی‌سنج‌ها محل قرارگیری سنسورها و یا محرک‌های آنها می‌باشد. در سال ۲۰۱۰ شانموگوالی و همکاران [۶] از یک المان پیزوالکتریک برای تحریک ارتعاشی لوله دبی‌سنج با هندسه مستقیم در فرکانس تشدید آن استفاده کردند. این المان به صورت محوری در امتداد دیواره لوله نصب شده است. در این پژوهش سنسورهای پیزوالکتریک نیز برای اندازه‌گیری میزان نوسانات لوله در نظر گرفته شده اند. نتایج شبیه‌سازی برای قرارگیری عملگر در مرکز، عملگر جانبی و تحریک نزدیکی اتصال مقایسه شده اند.

در همان سال شارما و همکاران [۷] تست‌های عملی بر روی سه پیکربندی لوله مسی U شکل بر روی یک ستاپ آزمایشگاهی دبی‌سنج کوریولیس که با ابزار دقیق مجازی یکپارچه شده است. واضح است که با تغییر نسبت ابعادی دو وجه لوله U شکل، محل قرارگیری سنسورها و فرکانس تحریک تغییر خواهند کرد. در این پژوهش نیز از آب به عنوان سیال جاری استفاده شده است. در نهایت بهینه‌ترین پیکربندی از بابت حداقل خطای اندازه‌گیری دبی جرمی مشخص گردیده است.

علی‌رغم آنکه اکثر دبی‌سنج‌های کوریولیس از آلیاژهای فولاد و مس ساخته شده‌اند؛ ممکن است ایده استفاده از سایر فلزات مانند تیتانیوم در ساخت دبی‌سنج به ذهن خطور کند. چرا که تیتانیوم نیز به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی بالا و مقاومت در برابر خوردگی عالی می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. در سال ۲۰۲۰ سانتوس و همکاران [۸] یک دبی‌سنج از جنس تیتانیوم ساخته و تست‌های عملی بر روی آن انجام دادند که به موفقیت آن انجامید. این دبی‌سنج به مدت یکسان در وضعیت آماده بکار و غیرفعال قرار گرفت. محیط‌هایی با محتوای هیدروژن بالا می‌توانند برای تیتانیوم و آلیاژهای آن بسیار مضر باشند، زیرا این عنصر ممکن است باعث تشکیل هیدرید شود و منجر به شکنندگی تیتانیوم شود. پس از شروع به فعالیت مجدد شاهد از کار افتادن دبی‌سنج شدند که علت آن انتخاب نامناسب فلز لوله دبی‌سنج بود.

از چالش‌هایی که در زمینه استفاده از این دبی‌سنج‌ها پیش روی کاربران می‌باشد؛ نوع جریان سیال، تک‌فازی یا دو‌فازی بودن سیال، ... می‌باشد. پژوهش‌هایی در خصوص این دبی‌سنج‌ها با در نظر گرفتن شرایط متعدد محیطی و ویژگی‌های سیال به صورت شبیه‌سازی نرم‌افزاری و تست‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفته است.

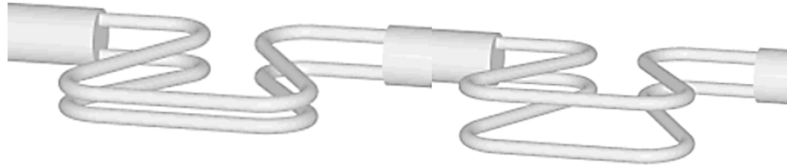
جریان دو‌فازی شامل گاز و مایع در بسیاری از کاربردهای صنعتی بسیار متداول بوده؛ در حالیکه اندازه‌گیری آن برای دبی‌سنج‌های کوریولیس به ویژه برای حالتی که گاز درصد بالاتری را تشکیل می‌دهد مسئله چالش برانگیزی است. لی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ نتایج حاصل از انجام تست‌های آزمایشگاهی بر روی دبی‌سنج محتوی سیال دو‌فازی را ارائه نمودند. در ستاپ مورد تست آنها از پردازشگر سیگنال توسعه‌یافته برای ردیابی سیگنال‌های حسگر با تغییر سریع ایجاد شده توسط جریان دو فاز استفاده کردند. نتایج حاصل از جنبه دبی و چگالی با یک نسخه تجاری دبی‌سنج با قابلیت اندازه‌گیری جریان دو فاز نیز مقایسه شد.

در حالت عبور سیال چند فازی از داخل دبی‌سنج الگوریتم‌هایی برای استخراج اختلاف فاز بایستی در نظر گرفته شود. الگوریتم سنتی به دلیل تأثیر نشت طیف، نویز محیطی و تداخل دارای خطای قابل توجهی هستند. در سال ۲۰۲۲ لو و همکاران [۱۰] برای بهبود دقت استخراج اختلاف فاز، یک روش تحلیل همبستگی بهبود یافته پیشنهاد کردند. مقایسه دقت استخراج اختلاف فاز روش تحلیل همبستگی بهبودیافته با سایر روش‌های سنتی با استفاده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری صورت گرفت و مشاهده شد روش تحلیل همبستگی بهبودیافته دقت اندازه‌گیری و پایداری بهتری دارد.

در این مقاله هدف، شبیه‌سازی عددی دبی سنج کوریولیس می‌باشد. این شبیه‌سازی با کمک نرم افزار المان محدود انجام شده و برای دبی‌های مختلف جرمی و چگالی متفاوت اثرات نیروی کوریولیس ناشی از عبور سیال از لوله دبی سنج مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

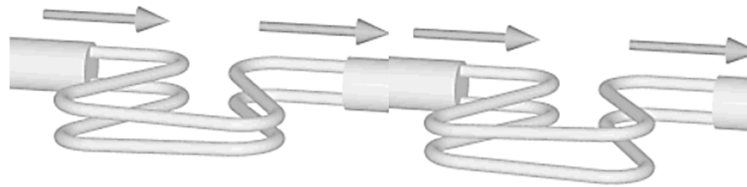
## ۲- اساس کار دبی‌سنج جرمی کوریولیس

در دبی‌سنج‌های کوریولیس سنجش دبی جرمی با تحریک لوله حاوی جریان سیال در مود اول ارتعاشی لوله، که به آن مود تحریک<sup>۱</sup> گفته می‌شود، انجام می‌گیرد. دامنه حرکت لوله بسیار اندک و به طور متوسط در حدود کسری از میلی‌متر می‌باشد. (البته برای دبی سیال عبوری مختلف و ابعاد مختلف لوله متفاوت است). در غیاب سیال با اعمال ارتعاش ورودی، لوله به صورت متقارن شروع به نوسان می‌کند. این تقارن مطابق شکل ۱ به معنای نوسان با فاز یکسان در تمامی قسمت‌های لوله می‌باشد.



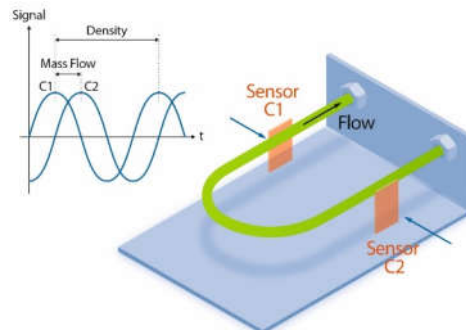
شکل ۱. نوسان لوله در غیاب سیال.

با عبور سیال از داخل لوله به دلیل وجود نیروهای کوریولیس در جهت‌های مخالف با یکدیگر، تقارن نوسانات لوله از بین رفته و بخش ابتدایی و انتهایی مطابق شکل ۲ با اختلاف فاز نوسان می‌کنند.



شکل ۲. نوسان لوله با عبور سیال.

اختلاف فاز در دو نقطه کاملاً متقارن از لحاظ هندسی، به صورت خطی متناسب با دبی سیال عبوری است. لذا با نصب سنسور در سمت ورودی و خروجی سیال و اندازه‌گیری اختلاف فاز دو سنسور، می‌توان دبی سیال را محاسبه نمود. با عبور سیال از داخل لوله فرکانس نوسان نسبت به لوله به تنهایی نیز متفاوت خواهد بود. اما همچنان فرکانس نوسان در بخش‌های مختلف لوله یکسان است. این پارامتر نیز با چگالی سیال عبوری متناسب خواهد بود. این دو موضوع که اساس کار دبی‌سنج‌های کوریولیس را تشکیل می‌دهند؛ به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. اساس کار دبی‌سنج جرمی کوریولیس [۱۱].

<sup>۱</sup> Drive mode

نیروی کوریولیس هنگامی ایجاد می‌شود که جسمی در یک فریم دوار حرکت انتقالی انجام دهد. نیروی کوریولیس حاصل، با جرم جسم ( $m$ )، سرعت زاویه‌ای دوران ( $\omega$ ) و سرعت خطی جسم ( $v$ ) ارتباط خطی داشته و در جهتی عمود بر هر دوی این سرعت‌ها می‌باشد.

$$F_C = -2m(\omega \times v). \quad (1)$$

این نیرو در دبی‌سنج جرمی کوریولیس عمود بر لوله و در در سمت لوله، خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. این دو نیرو باعث ایجاد یک گشتاور در لوله و به تبع آن ایجاد حرکت موجی شکل هنگام عبور سیال در لوله خواهد شد.

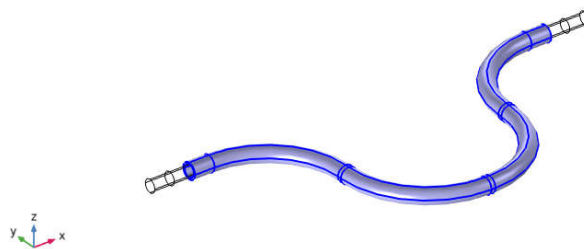
$$T_C = F_C \cdot L. \quad (2)$$

که در آن  $L$  فاصله مستقیم دو نقطه‌ای که سنسور در آن نصب شده می‌باشد. برای اندازه‌گیری نوسانات دو سر لوله از ارتعاش‌سنج لیزری<sup>۲</sup> می‌توان استفاده کرد که با تابش لیزر به جسم مورد نظر و دریافت پاسخ آن، می‌تواند فرکانس و دامنه ارتعاشی آن را اندازه‌گیری کند.

### ۳- شبیه‌سازی مدل و بررسی نتایج

برای شبیه‌سازی مدل دبی‌سنج جرمی کوریولیس از نرم‌افزار المان محدود کامسول<sup>۳</sup> استفاده شده است. این نرم‌افزار به دلیل قابلیت حل المان محدود برای فیزیک‌های چندگانه می‌تواند بسیار مفید باشد. کامسول دارای ماژول‌های متعدد برای حل مسائل مربوط به سیال و جامد است که می‌تواند با یکدیگر جفت شده و مسائلی تحت عنوان FSI سیال-جامد<sup>۴</sup> را شبیه‌سازی کند. به همین منظور یک مدل هندسی از دبی‌سنج در این نرم‌افزار ایجاد شد. برای تحلیل کامل این پژوهش لازم است ابتدا فرکانس ارتعاشی لوله دبی‌سنج بدون حضور سیال محاسبه شود. سپس با محاسبه نیروها و سرعت در سیال عبوری از لوله دبی‌سنج و انتقال نیروها به بدنه لوله‌ی جامد به بررسی حرکت دبی‌سنج در زمان تحریک و عبور سیال پرداخت. در ادامه به توضیح هر قسمت پرداخته خواهد شد.

مدل هندسی که برای دبی‌سنج در نظر گرفته شده است مطابق شکل ۴ می‌باشد. هم‌چنین برای شبیه‌سازی سیال در این نرم‌افزار باید دامنه سیال نیز به صورت هندسی مدل شود. بنابراین در مدل هندسی هم لوله و هم سیال به صورت هندسه‌های مجزا مطابق شکل ۱ مشاهده می‌شود. قطر در نظر گرفته شده برای لوله دبی‌سنج ۲۰ میلی‌متر و شعاع انحنای بخش دایره‌ای آن ۱۰۰ میلی‌متر بود. برای راحتی مدل‌سازی زاویه انحنای هر قسمت ۹۰ درجه و کل لوله دبی‌سنج با ۴ انحنا به طور کامل مدل‌سازی شد. در تصویر لوله به رنگ آبی و سیال داخل آن با خطوط مشکی رنگ نمایش داده شده است.



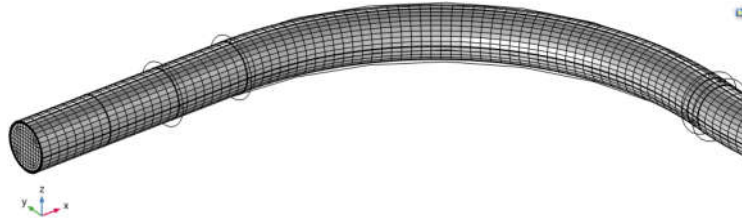
شکل ۴. مدل هندسی دبی‌سنج کوریولیس در نرم‌افزار کامسول

<sup>۲</sup> Vibro-Meter

<sup>۳</sup> COMSOL Multi-Physics

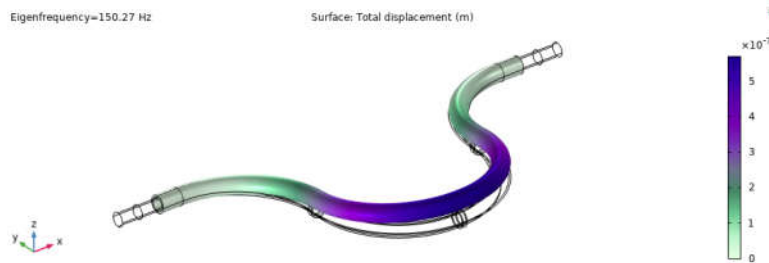
<sup>۴</sup> Fluid-Structure Interaction

جنس لوله از نوع استیل ۴۳۴۰ و سیال داخل آن برای شبیه‌سازی‌های مختلف با وارد کردن چگالی به نرم افزار داده شده‌اند. یک بخش مهم برای تحلیل المان محدود، شبکه بندی یا مش‌بندی است که باید با مطالعه مش ۵ انجام شود. هرچه اندازه مش کوچک‌تر باشد پاسخ دقیق‌تر اما هزینه و زمان محاسباتی بیشتر خواهد شد. بنابراین باید اندازه مش درست انتخاب شود. در شکل ۵ مش‌بندی هندسه مدل از نمای نزدیک مشاهده می‌شود.



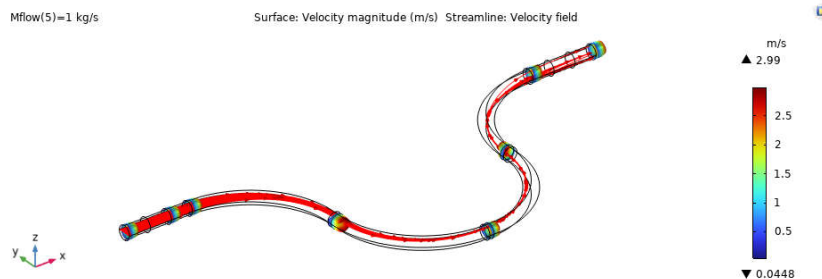
شکل ۵. مش‌بندی مدل هندسی در نرم افزار کامسول

پاسخ فرکانسی لوله دبی سنج کوریولیس بدون در نظر گرفتن حضور سیال ابتدا انجام شد که فرکانس طبیعی آن ۱۵۰ هرتز محاسبه شد. در شکل ۶، رفتار ارتعاشی آن مشاهده می‌شود. این پاسخ به چگالی سیال عبوری وابسته نیست و تنها به جنس لوله که استیل می‌باشد بستگی دارد.

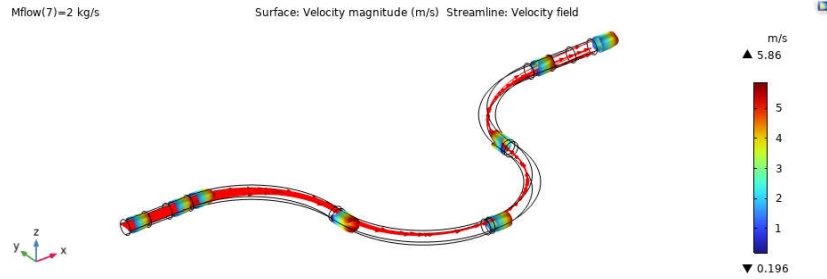


شکل ۶. فرکانس طبیعی لوله دبی سنج کوریولیس و دامنه حرکت آن

بعد از آن می‌بایست حل سیالات عبوری از لوله به دست آید. به ازای عبور سیال با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نتایج محاسبه شدند. برای بررسی اثر دبی عبوری بر حرکت کوریولیس لوله، این نتایج به ازای دبی‌های ۰.۲ تا ۲ کیلوگرم بر ثانیه مورد تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۷ و شکل ۸ توزیع سرعت به ازای دبی ۱ و ۲ کیلوگرم بر ثانیه در دامنه حل شده برای سیال مشاهده می‌شود. با افزایش دبی عبوری همان طور که انتظار می‌رود توزیع سرعت در لوله افزایش می‌یابد.

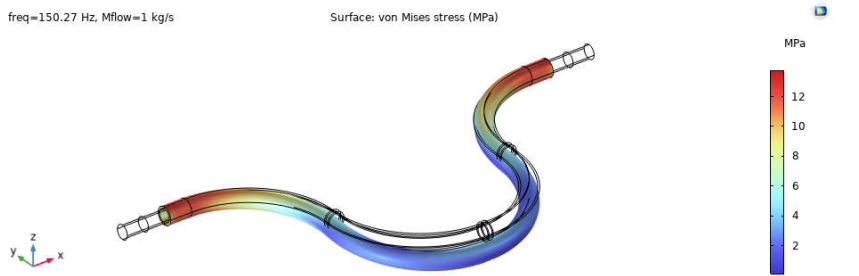


شکل ۷. سرعت سیال به ازای دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه

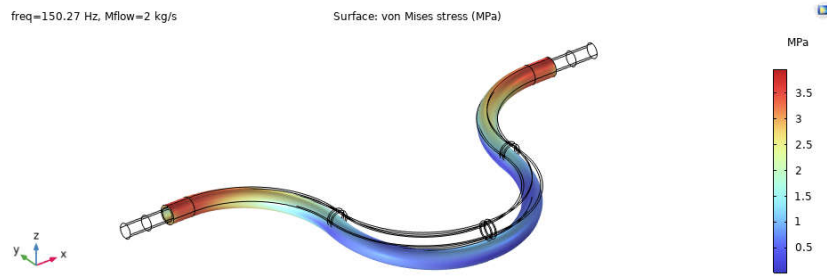


شکل ۸. سرعت سیال به ازای دبی ۲ کیلوگرم بر ثانیه

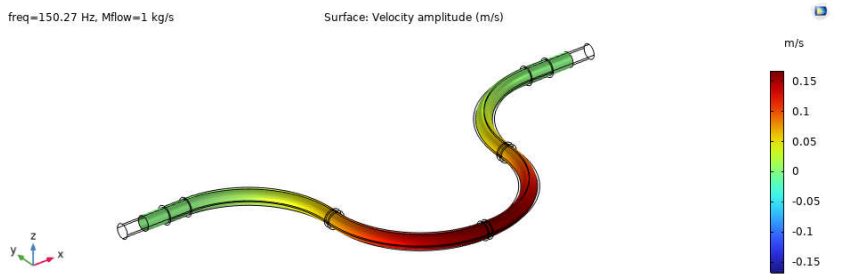
اما بعد از انتقال نتایج حل سیال به جامد که تحلیل متقابل سیال-جامد را کامل می‌کند، نتایج زیر برای تنش فون-میسز<sup>۶</sup> در لوله و هم چنین سرعت حرکت نقاط مختلف لوله برای دبی‌های مختلف از ۰.۲ تا ۲ به دست آمد.



شکل ۹. توزیع تنش در لوله دبی سنج به ازای عبور سیال با دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه

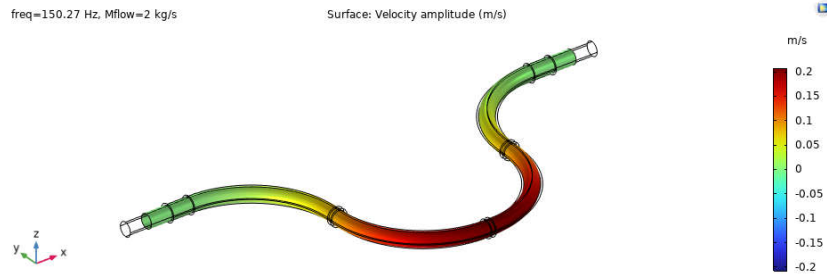


شکل ۱۰. توزیع تنش در لوله دبی سنج به ازای عبور سیال با دبی ۲ کیلوگرم بر ثانیه



شکل ۱۱. سرعت نقاط مختلف لوله برای دبی ۱ کیلوگرم بر ثانیه

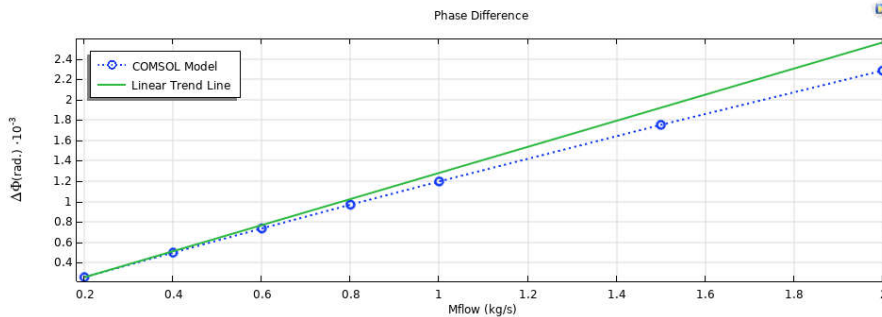
<sup>۶</sup> Von Mises Stress



شکل ۱۲. سرعت نقاط مختلف لوله برای دبی ۲ کیلوگرم بر ثانیه

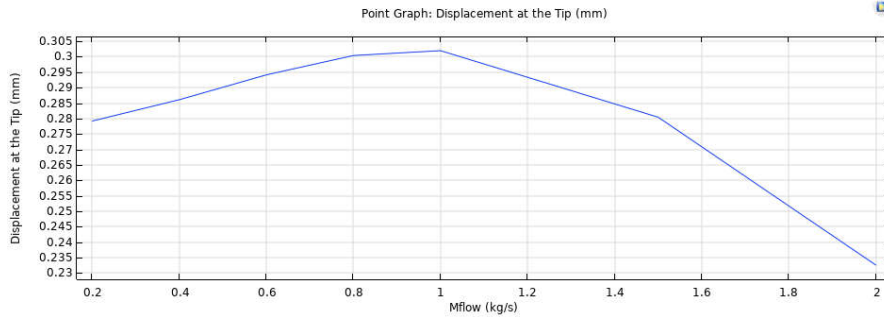
همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی جرمی عبوری از لوله، تنش فون-میسرز حاصل از آن کاهش داشته اما سرعت حرکت لوله ناشی از عبور سیال افزایش پیدا می‌کند. کاهش تنش به دلیل کاهش دامنه حرکت لوله در دبی‌های بالاتر است و کاملاً مورد انتظار است.

همان طور که می‌دانیم یکی از نکات مهم دبی سنج برای محاسبه دبی و چگالی عبوری سیال، اختلاف فاز نوسانات در دو سمت لوله می‌باشد. این اختلاف فاز نوسانات بعد از کالیبره شدن می‌تواند دبی عبوری را نتیجه دهد. در شکل ۱۳ اختلاف فاز نوسانات در دو سمت لوله دبی سنج به ازای دبی جرمی‌های مختلف برای سیال مورد نظر نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی جرمی این اختلاف فاز نوسانات افزایش یافته و با کالیبره کردن آن می‌توان به معیاری برای محاسبه دبی رسید.



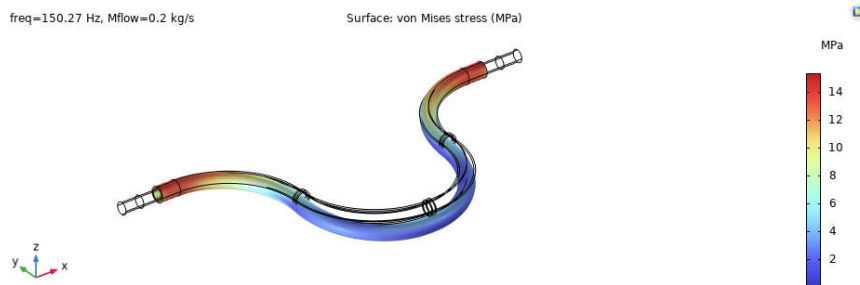
شکل ۱۳. اختلاف فاز نوسانات دو سمت لوله دبی سنج به ازای دبی جرمی‌های مختلف

اما قسمت مهم دیگر برای اندازه‌گیری توسط دبی سنج کوریولیس دامنه حرکت بیرونی‌ترین نقطه لوله است. همان طور که مشاهده می‌شود این جابه‌جایی ابتدا افزایش و سپس کاهش دارد. در قسمت هم گفته شد که تنش در لوله به ازای افزایش دبی از ۱ به ۲ کیلوگرم بر ثانیه کاهش پیدا می‌کند که به دلیل کاهش دامنه حرکت لوله بود. افزایش دبی جرمی به دلیل آنکه منجر به سنگین‌تر شدن لوله دبی‌سنج می‌شود، محرک نوک لوله دبی‌سنج دامنه حرکت کمتری در آن ایجاد می‌کند و به همین دلیل دامنه نوسان و حرکت لوله کاهش پیدا می‌کند بنابراین تنش دیواره لوله ناشی از ارتعاش محرک، کمتر می‌شود. این ماهش دامنه حرکت در نمودار شکل ۱۴ کاملاً مشهود است.

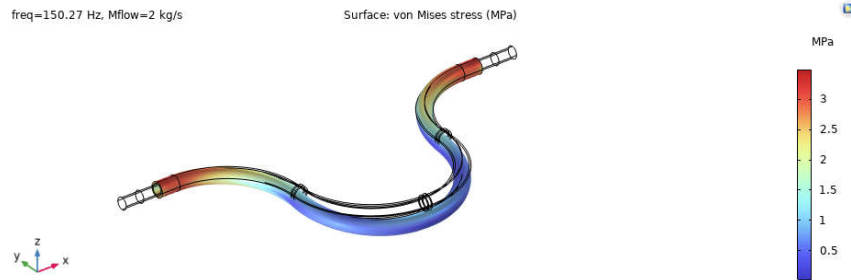


شکل ۱۴. جابه‌جایی نقطه بیرونی لوله در اثر عبور دبی‌های جرمی مختلف از لوله

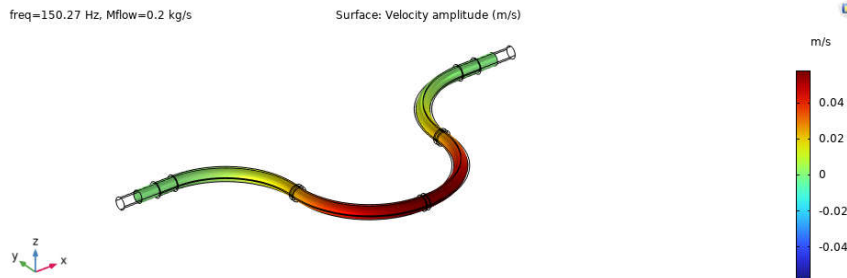
اکنون در ادامه به بررسی همین تحلیل به ازای چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پرداخته خواهد شد. و همین نتایج به ازای چگالی بیشتر ارائه می‌شود تا تاثیر چگالی نیز بر خروجی‌های مساله دیده شود. با تغییر چگالی فرکانس طبیعی لوله تغییر نخواهد کرد اما پاسخ‌های سیال متفاوت خواهد بود. به همین دلیل فقط پاسخ‌های مرتبط به سیال و تحلیل متقابل سیال-جامد آورده خواهد شد. مقادیر تنش در لوله و توزیع سرعت نقاط مختلف لوله مطابق شکل‌های زیر خواهد بود. برای مشاهده بهتر تفاوت دبی در این چگالی، دبی‌های ۰.۲ و ۲ کیلوگرم نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. تنش در لوله به ازای دبی ۰.۲ کیلوگرم بر ثانیه

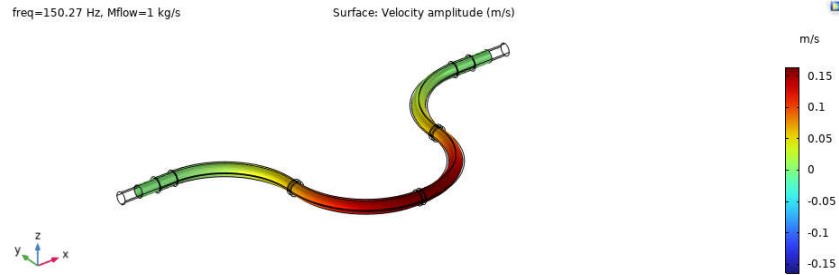


شکل ۱۶. تنش در لوله به ازای دبی ۲ کیلوگرم بر ثانیه



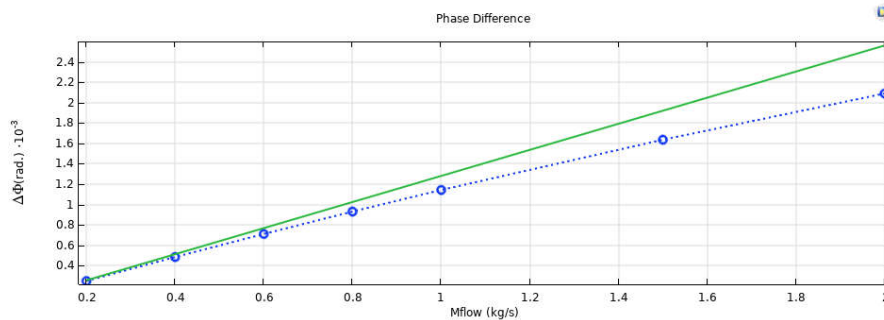
شکل ۱۷. توزیع سرعت نقاط مختلف لوله به ازای دبی ۰.۲ کیلوگرم بر ثانیه





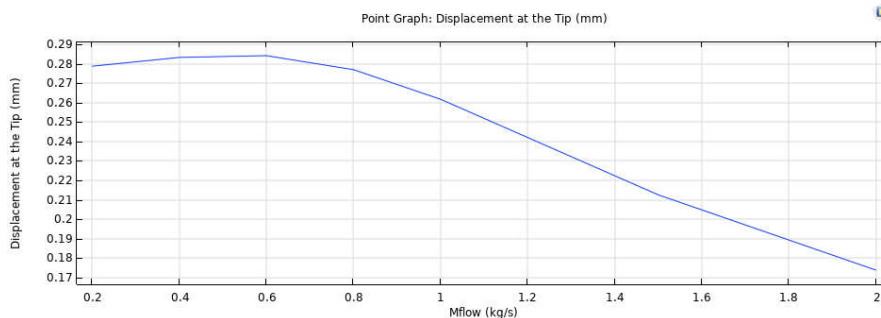
شکل ۱۸. توزیع سرعت نقاط مختلف لوله به ازای دبی ۲ کیلوگرم بر ثانیه

مشاهده شد برای افزایش چگالی سرعت در نقاط مختلف لوله و تنش هر دو کاهش داشتند. به دلیل افزایش چگالی در زمان عبور سیال، وزن لوله افزایش دارد به همین دلیل در اثر تحریک لوله جابه‌جایی کمتر و در نتیجه تنش کمتری در آن رخ خواهد داد. نمودار اختلاف فاز نوسانات در دو طرف لوله در شکل ۱۹ نمایش داده شده است. که باز هم به ازای افزایش دبی اختلاف فاز نوسانات افزایش پیدا می‌کند. هم چنین مقدار کمی تفاوت برای افزایش چگالی در نمودار اختلاف فاز نوسانات مشاهده می‌شود.



شکل ۱۹. نمودار اختلاف فاز نوسانات در دو طرف لوله برای دبی‌های مختلف عبوری از لوله

هم چنین میزان جابه‌جایی نقطه انتهایی لوله در شکل ۲۰ نمایش داده شده است که تفاوت آشکار نسبت به حالت چگالی قبل در آن مشهود است. هم چنین باز هم به ازای افزایش چگالی روند کاهش در جابه‌جایی انتهایی لوله دیده می‌شود.



شکل ۲۰. جابه‌جایی نقطه بیرونی لوله در اثر عبور دبی‌های جرمی مختلف

در شکل ۱۴ و شکل ۲۰ با افزایش دبی جرمی ابتدا یک افزایش و سپس کاهش در دامنه نوسان مشاهده می‌شود. در کل با افزایش دبی جرمی به دلیل سنگین‌تر شدن لوله، چون محرک نمی‌تواند دامنه نوسان زیادی در لوله ایجاد کند پس انتظار این است که دامنه نوسان کاهش پیدا کند. اما در نقطه‌ای که این دبی جرمی، جرم کل لوله و سیال درون آن را به نقطه‌ای می‌رساند که فرکانس طبیعی آن با فرکانس ارتعاشی محرک نزدیک می‌شود حالتی مانند تشدید رخ داده و افزایش دامنه نوسان مشاهده می‌شود.

#### ۴ - نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی المان محدود برای دبی سنج جرمی کوریولیس انجام شد. دبی سنج‌های جرمی کوریولیس که برای اندازه‌گیری دقیق دبی جرمی و چگالی سیال عبوری استفاده می‌شود، بر اساس این کار می‌کنند که ناشی از عبور سیال، یک نیروی کوریولیس عمود بر جهت جریان ایجاد می‌شود که در نوسان تحریکی لوله، حرکت آن را دچار تغییر می‌کنند. این تغییر در حرکت لوله باعث ایجاد یک نوسان موجی شکل در آن شده که اختلاف فازی بین نوسان دو طرف آن به وجود می‌آورند. شبیه‌سازی استفاده از ماژول متقابل سیال-جامد در نرم افزار المان محدود کامسول انجام شد. نتایج نشان داد افزایش دبی جرمی برای هر چگالی مشخص از سیال باعث افزایش اختلاف فاز در حرکت نوسانی دو طرف لوله و کاهش میزان جابه‌جایی نقطه انتهایی لوله می‌شود. هم چنین افزایش چگالی بر روی این حرکت بررسی شد و معلوم شد برای دبی‌های بالاتر این مورد باعث کاهش دامنه حرکت نوسانی لوله‌ی دبی سنج می‌شود.

#### مراجع

- [1] ز. جعفری شهباززاده، ا. آزادی‌یزدی، و ا. خسروی‌فرد، "مدل‌سازی و تحلیل ارتعاشات خطی و غیرخطی دبی سنج کوریولیس"، در بیست و پنجمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، ۲۰۱۷.
- [2] J. Ruoff, M. Hodapp, and H. Kück, "Finite element modelling of Coriolis mass flowmeters with arbitrary pipe geometry and unsteady flow conditions," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 37, pp. 119–126, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.03.010.
- [3] T. Wang and R. Baker, "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 Meas. Instrum.*, vol. 40, pp. 99–123, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015.
- [4] M. N. Al-Khamis, A. A. Al-Nojaim, and M. A. Al-Marhoun, "Performance Evaluation of Coriolis Mass Flowmeters," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 124, no. 2, pp. 90–94, Jun. 2002, doi: 10.1115/1.1467644.
- [5] P. Gupta, K. Srinivasan, and S. V. Prabhu, "Tests on various configurations of Coriolis mass flowmeters," *Measurement*, vol. 39, no. 4, pp. 296–307, May 2006, doi: 10.1016/j.measurement.2005.11.019.
- [6] M. Shanmugavalli, M. Umopathy, and G. Uma, "Smart Coriolis mass flowmeter," *Measurement*, vol. 43, no. 4, pp. 549–555, May 2010, doi: 10.1016/j.measurement.2009.12.027.
- [7] S. C. Sharma, P. P. Patil, M. A. Vasudev, and S. C. Jain, "Performance evaluation of an indigenously designed copper (U) tube Coriolis mass flow sensors," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 43, no. 9, pp. 1165–1172, 2010, doi: 10.1016/j.measurement.2010.05.007.
- [8] I. G. R. Santos *et al.*, "Failure analysis of a titanium Coriolis mass flow meter: A case of hydrogen embrittlement," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 115, p. 104618, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104618.
- [9] M. Li, M. Henry, F. Zhou, and M. Tombs, "Two-phase flow experiments with Coriolis Mass Flow Metering using complex signal processing," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 69, no. March, p. 101613, 2019, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.101613.
- [10] J. Lu, P. Wang, Y. Wan, G. Chen, Y. Liu, and L. Wang, "Comparative study of phase difference extraction methods in the background of Coriolis mass flow meters application," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2369, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2369/1/012089.
- [11] "Working Principle of Coriolis mass flowmeter." <https://www.avl.com/en/testing-solutions/all-testing-products-and-software/advanced-measurement-technologies/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control>