

DOR:

تحلیل اندرکنش سیال-سازه در خط لوله با انشعاب متقارن و غیرمتقارن حاوی جریان توربولانس: مطالعه موردی

امید حاجی علیانی^۱ و محمود حشمتی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

تحلیل اندرکنش سیال-سازه خط لوله حاوی سیال، یکی از مسائل قابل توجه در صنایع نفت و گاز است. در این پژوهش، یکی از خطوط فرایندی شرکت پتروشیمی بیستون حاوی سیال پارافین (حدود ۹۰ درصد) و الفین (حدود ۱۰ درصد) با دو طرح متفاوت متقارن و غیر متقارن مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها شامل دو بخش عملی و مدلسازی است. در بخش مدلسازی، ابتدا خط لوله در نرم افزار انسیس - فلونت شبیه‌سازی شده و نتایج اجزای محدود به صورت کوپل یکطرفه به بخش طراحی نرم افزار وارد می‌شود. نتایج بررسی‌های عملی و اجزای محدود نشان داد که علت اصلی ارتعاش این خط ناشی از اغتشاشات و فشار نوسانی از جانب سیال بر جداره لوله است و با ترکیبی از قیدهای الاستیک و ثابت، می‌توان جابجایی خط لوله را کنترل کرد. همخوانی بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی وجود دارد؛ همچنین نتایج نشان داد که دامنه ارتعاش پس از اقدامات حمایتی مرکب، در خط لوله با انشعاب نامتقارن، تا ۹۴ درصد، و در طرح متقارن تا ۸۶ درصد کاهش دارد؛ بنابراین ساپورت‌گذاری مرکب، نتایج مطلوبی در پی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: لوله حاوی سیال؛ اندر کنش سیال-سازه؛ مدلسازی؛ تحلیل اجزای محدود؛ حمایت.

Analysis of Fluid-Structure Interaction in a Pipeline with Symmetric and Asymmetric Branching Conveying Turbulent Flow: A Case Study

O. Hajialyani¹, M. Heshmati^{2,*}

¹ M.S.c. Student, Mech. Eng. Dept., Kermanshah Univ. of Tech., Kermanshah, Iran.

² Assist. Prof., Mech. Eng. Dept., Kermanshah Univ. of Tech., Kermanshah, Iran.

Abstract

Fluid-structure interaction analysis of conveying fluid pipe is one of the important issues in the oil and gas industries. In this study, one of the process lines of Biston Petrochemical Company containing Paraffin fluid (about 90%) and Olefin (about 10%) with two different symmetric and asymmetric designs has been investigated. The investigations consist of two parts: experiments and modeling. In the modeling section, the pipeline is first simulated in Ansys-Fluent software and the finite element results are entered into the software design section as a one-way coupling. The results of experimental studies and finite element modelig showed that the root of vibration of this line is turbulence and oscillating pressure of the fluid on the wall of the pipe and with a combination of elastic and fixed constraints, the displacements of the pipeline can be controlled. A good agreement between the simulation and the practical results has been seen. The results also showed that the amplitude of vibration after including supports is reduced to 94% in the asymmetric branch pipeline and up to 86% in the symmetric design. Therefore, the support has a significant effect on the results.

Keywords: Pipe Conveying Fluid; Fluid-Structure Interaction; Modeling; Finite Element; Support.

۱- مقدمه

در صنایع پتروشیمی و پالایشگاه به وفور از لوله های پر پیچ و خم استفاده می شود. در مسیر لوله ها، گاه پمپ ها، کمپرسورها و دیگر تجهیزات قرار گرفته و افت و خیز فشارها، موجب بروز ارتعاش در لوله ها می شود. یک خط لوله دارای پیچ و خم فراوان ممکن است. در اثر فشارهای وارده، دچار نوساناتی شود که برای عمر تجهیزات، منفی ارزیابی می شود؛ بنابراین، کاهش چنین ارتعاشاتی می تواند هدف تحقیقات علمی قرار گیرد.

مطالعات زیادی با روش های تئوری، عملی و عددی روی لوله های حاوی سیال انجام شده است [۱-۱۱]. کیم^۱ و همکاران [۱۲] با روش همگن سازی و آنالیز ارتعاشات دسته لوله ها را بررسی نمودند و با ایجاد یک خارج از مرکزیت در دسته لوله ها، نشان داده شد که نیروی لیفت وارد شده به دسته لوله ها مخالف صفر می شود. آن^۲ و سو^۳ رفتار دینامیکی لوله های حاوی سیال دو فاز مایع و گاز را با در نظر گرفتن برهمکنش سیال-سازه با روش های عددی و تحلیلی بررسی کردند و مطالعه پارامتری نشان داد که فرکانس های طبیعی با افزایش کسر حجمی گاز و سرعت جریان سیال کاهش می یابد [۱۳]. هانگ بو و همکاران^۴ پاسخ دینامیکی لوله های حاوی سیال تحت تحریک تصادفی را با روش المان محدود بررسی کردند. در این پژوهش چهار فرکانس اول لوله یک سر گیردار با روش المان محدود بدست آمد و با روش شینا و همکاران مقایسه شد و دلیل اختلاف مورد بررسی قرار گرفت [۱۴]. با توجه به اهمیت کنترل و کاهش دامنه ارتعاشات لوله های حاوی سیال، رضایی و عرب ملکی مشخصه های ارتعاشی لوله های حامل سیال مجهز به جاذب ارتعاشی با روش سری های توانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جاذب یک درجه آزادی باعث کاهش دامنه ارتعاش می شود [۱۵]. دوتوره^۵ و همکاران مطالعه تجربی مربوط به پاسخ دینامیکی لوله های نیمه پر با رویکرد تمرکز بر روی فرکانس های طبیعی و شکل مودها را انجام دادند و با استفاده از داده های عددی و

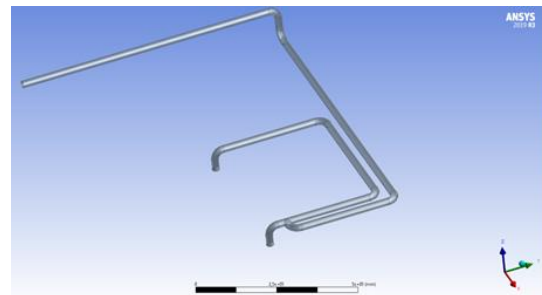
تجربی دو اصطلاح ریاضی متفاوت مربوط به فرکانس های طبیعی سیستم هم بصورت عمودی و هم بصورت افقی بدست آمد [۱۶]. چائو^۶ و همکاران فرکانس های طبیعی یک لوله با دوسر تکیه گاه فنری را با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی و اصل همیلتون و همچنین روش آزمایشگاهی بدست آوردند و نتایج حاصله به روش آزمایشگاهی و روش تئوری بسیار به هم نزدیک بودند [۱۷]. حشمتی و همکاران ارتعاش و ناپایداری لوله پروالاستیک در اثر جریان سیال را با استفاده از روابط تئوری بررسی کردند. در این پژوهش تاثیر سرعت بی بعد در چهار مد اول ارتعاش با مقادیر مختلف و توزیع های مختلف تداخل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مقادیر تداخل روی سرعت بحرانی ناپایداری سیستم تاثیر دارد [۱۸]. کرامت و همکاران پدیده برهمکنش دیواره لوله ویسکوالاستیک را در اثر ضربه قوچ بررسی کردند. معادلات کلونین-ویت برای مدلسازی رفتار جداره ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. صحت عملکرد مدل، از طریق مقایسه نتایج با دو دسته داده های تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی و تأیید شده است [۱۹]. احمدی و کرامت نیز برهم کنش سیال-سازه را با انواع مختلف کوپلینگ بررسی نمودند [۲۰]؛ همچنین در مطالعه دیگری، حرکات محوری ویسکوالاستیک با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی شد [۲۱]؛ همچنین اثر تکیه گاه ویسکوالاستیک در اثر ضربه قوچ با توجه به اثر بین سازه و سیال، بررسی گردید [۲۲].

در پژوهش حاضر یکی از خطوط فرایندی شرکت پتروشیمی بیستون حاوی جریان توربولانس سیال پارافین (حدود ۹۰ درصد) و الفین (حدود ۱۰ درصد) با دو طرح متفاوت متقارن و غیر متقارن مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع چهار مدل مختلف در نرم افزار انسیس با لحاظ اندرکنش سیال-سازه و به صورت کوپل یکطرفه مدل گردید. نتایج این شبیه سازی با اندازه گیری های عملی صحت سنجی شده و نتایج حاصله با هم مقایسه شده اند.

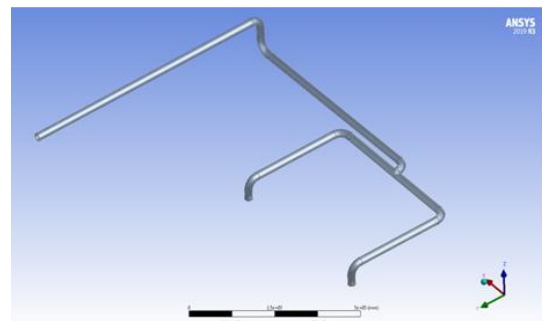
¹ Keim² An³ Su⁴ Zhai⁵ De La Torre⁶ Chao

۲- بیان مسئله

در این مقاله اندرکنش سیال-سازه یکی از خطوط فرایندی شرکت پتروشیمی بیستون (شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفته است. این خط لوله دارای قطر خارجی ۲۱۹/۱ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۰۲/۷۴ میلی‌متر و از جنس کربن استیل A106 GrB است؛ همچنین خط لوله حاوی سیال پارافین (حدود ۹۰ درصد) و الفین (حدود ۱۰ درصد) است که پس از عبور از چندین مبدل و کاهش دما وارد واحد بعدی می‌شود. مدل طرح غیرمتقارن در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل، لوله ورودی دور اضافه خورده تا به دوشاخه تقسیم برسد. به دلیل ارتعاشات زیاد خط لوله موجود، اصلاحاتی روی آن انجام گرفته است و انشعاب غیر متقارن آن با یک انشعاب متقارن مطابق شکل ۲ جایگزین شده است. در طرح اول، وزن خط لوله ۱۴۵۵/۱۵ کیلوگرم و وزن سیال داخل لوله ۲۶۵۰/۹۸ کیلوگرم و در طرح دوم، وزن سازه و سیال به ترتیب ۱۱۸۳/۴۳ و ۲۱۶۰ کیلوگرم است. بنابراین در این مقاله، اندرکنش سیال-سازه در دو طرح ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- مدل خط لوله با انشعاب غیرمتقارن



شکل ۲- مدل خط لوله با انشعاب متقارن

۳- معادلات ساختاری

سازه‌های پوسته‌ای در بسیاری از کاربردهای مهندسی جزء اجزای مهم می‌باشند و مطالعات زیادی روی دینامیک آنها انجام شده است. تئوری مختلف خطی و غیرخطی با در نظر گرفتن اثر ضخامت، جنس و... جهت مدل سازی دینامیک سازه‌های پوسته‌ای ارائه شده است. روش‌های حل تحلیلی مورد استفاده نیز محدود به هندسه‌های ساده بوده و برای همه مسائل کارایی ندارند. با این حال، روش‌های حل عددی مانند روش اجزای محدود را می‌توان بدون محدودیت در حل این سازه‌ها به کار برد. به طور کلی معادله حاکم حرکت اجزای محدود را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

$$M_s \ddot{d} + C_s \dot{d} + K_s d = f \quad (1)$$

که در آن M_s ماتریس جرم، C_s ماتریس میرایی و K_s ماتریس سختی می‌باشند. علاوه بر این، d بردار جابجایی گره‌ها و f بردار نیروی گره‌ها است. روش اجزای محدود به همراه آنالیز مودال را می‌توان برای تحلیل دینامیکی پوسته به کار گرفت. عبارت مودال برای بردار جابجایی الاستیک e و زاویه چرخش θ در هر نقطه از پوسته را می‌توان به صورت سری‌های زیر نوشت:

$$e = \sum_{n=1}^{N_s} \bar{e}_n \xi_n(t), \quad \theta = \sum_{n=1}^{N_s} \bar{\theta}_n \xi_n(t) \quad (2)$$

که در آن N_s تعداد مودهای سازه، \bar{e}_n و $\bar{\theta}_n$ به ترتیب مودهای جابجایی و مودهای چرخشی سازه می‌باشند. مودهای ارتعاشات طبیعی را می‌توان به سادگی با روش اجزای محدود همراه با روش‌های استاندارد تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه بدست آورد. معادلات حاکم بر اساس مختصات کلی مودال را می‌توان با استفاده از معادلات لاگرانژ^۱ و روش گالرکین^۲، به صورت ذیل به دست آورد.

$$\ddot{\xi} + \Gamma \dot{\xi} + \Omega \xi = s \quad (3)$$

Γ و Ω ماتریس‌های قطری میرایی و سفتی هستند و به صورت $\Omega_{nm} = \omega_n^2$ و $\Gamma_{nm} = 2\xi \omega_n$ تعریف می‌شوند. در این تعریف، ξ_n و ω_n به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی مود n ام می‌باشند. علاوه بر این s بردار نیروی کلی وارد بر سازه است.

¹ Lagrange

² Galerkin

با جایگزینی معادلات ۵ و ۹ در ۸ و انتخاب پارامترهای با مرتبه یکسان، شرایط مرزی دیواره، به صورت زیر به دست می‌آید:

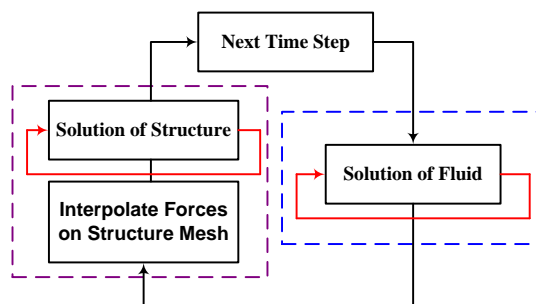
$$\nabla \phi^{(0)} \cdot n^{(0)} \Big|_{wall} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \phi^{(1)} \cdot n^{(0)} \Big|_{wall} = (\dot{e} \cdot n^{(0)} - \nabla \phi^{(0)} \cdot n^{(1)}) \quad (13)$$

۴- مدل‌سازی عددی

همانطور که در بخش قبلی گفته شد، خط لوله با انشعاب غیرمتقارن و سپس طرح اصلاحی با انشعاب متقارن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. هر یک از این دو طرح، در دو حالت "با تکیه گاه" و "بدون تکیه گاه" مدل‌سازی و مجموعاً چهار حالت مختلف تحلیل شده که در ادامه توضیح داده می‌شود. مشخصات لوله مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است؛ همچنین مشخصات عمومی هر یک از مدل‌ها در جدول ۲ بیان شده است.

نرم افزار انسیس یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای اجزاء محدود است. قابلیت‌های ارزنده این نرم‌افزار، از آن برای انجام امورات چندمنظوره بهره می‌برد. در این پژوهش که بررسی برهم‌کنش سیال و سازه مدنظر است، می‌توان از آن بهره برد. می‌توان با غیرفعال کردن بخش سیالاتی، بخش سازه‌ای مسئله را شبیه سازی کرد و سپس بالعکس. در نهایت با ترکیب هر دو بخش، مسئله اندرکنش سازه و سیال شبیه-سازی گردد؛ همچنین در این پژوهش روش حل یک طرفه بکار گرفته شده است (شکل ۳). مدل‌های مورد نظر ابتدا در نرم افزار کتیا ایجاد و سپس به محیط نرم افزار انسیس وارد شده‌اند.



شکل ۳- فلورچارت حل یک طرفه

برای یک پوسته حاوی سیال غیرقابل تراکم، معادلات ناویر استوکس^۱ حاکم بر سیال به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (4)$$

$$v \cdot (\nabla \cdot v) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v \quad (5)$$

که ν سرعت جریان، ρ دانسیته سیال، ν ویسکوزیته سینماتیکی و P فشار هیدرودینامیکی است. اگر ویسکوزیته در معادله ۵ صرفنظر شود، میدان جریان با استفاده از پتانسیل سرعت ϕ به شرح ذیل است:

$$v = \nabla \phi \quad (6)$$

با فرض ارتعاشات الاستیک بسیار کوچک پوسته، پتانسیل سرعت ϕ به دو مولفه به صورت زیر قابل تفکیک است:

$$\phi = \phi^{(0)} + \varepsilon \phi^{(1)} \quad (7)$$

که $\phi^{(0)}$ پتانسیل با مرتبه صفر مربوط به جریان متوسط سیال و $\phi^{(1)}$ مولفه ناپایدار مرتبه اول مربوط به حرکت پوسته است. همچنین پارامتر ε یک پارامتر کوچک است که صرفاً جهت تعیین مرتبه مقدار استفاده می‌شود. پتانسیل‌های مرتبه صفر و یک در معادله لاپلاس^۲ به صورت ذیل صدق می‌کنند:

$$\nabla^2 \phi^{(0)} = 0, \quad \nabla^2 \phi^{(1)} = 0 \quad (8)$$

شرایط مرزی دیواره، با فرض نفوذپذیری دیواره و پوسته، بین سازه و سیال، به شرح ذیل است.

$$\nabla \phi \cdot n = \varepsilon e \cdot n \quad (9)$$

جایی که حرکت پوسته از مرتبه اول فرض می‌شود و n بردار عمود بر پوسته شامل دو مولفه است:

$$n = n^{(0)} + \varepsilon n^{(1)} \quad (10)$$

$n^{(0)}$ بردار عمود بر پوسته در وضعیت تغییر شکل نیافته و $n^{(1)}$ بردار تغییرات کوچک ناشی از تغییر شکل پوسته است. با فرض چرخش الاستیک کوچک پوسته، می‌توان بردار $n^{(1)}$ را به صورت ذیل بدست آورد.

$$n = n^{(0)} + \varepsilon n^{(1)} \quad (11)$$

$$n^{(1)} = \theta \times n^{(0)}$$

^۱ Navier-Stokes

^۲ Laplace

جدول ۱- مشخصات فنی لوله مورد تحلیل

پارامتر	قطر خارجی (میلی متر)	قطر داخلی (میلی متر)	ضخامت (میلی متر)	تنش تسلیم (مگاپاسگال)	تنش نهایی (مگاپاسگال)	جنس	درجه
مشخصات	۲۱۹/۱	۲۰۲/۷۴	۸/۱۸	۲۴۹	۴۱۵	کربن استیل ASTM A106-95	B

جدول ۲- شرایط مرزی عمومی طرح‌های چهارگانه

جنس سیال	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	فشار ورودی (بار)	فشار خروجی (بار)	ثابت فنرها (نیوتن بر میلی‌متر)	نوع جریان
هیدروکربن	۳	۰/۷	۰/۶	۱۵۰، ۱۲۵	توربولانسی

بررسی، روش k-ε استاندارد با توجه به دامنه کاربرد و اعتبار آن مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بخش سیالاتی به شرایط مرزی بخش جامدات وارد می‌شود. در بخش جامداتی، ضمن غیرفعال کردن ترسیم سیالاتی، مش‌بندی مختص بخش جامدات، انجام شده است؛ همچنین شرایط مرزی خاص همچون تکیه‌گاه‌گذاری‌ها انجام و در نهایت ضمن تجمیع نتایج با بخش سیالات، نتیجه نهایی شبیه‌سازی استخراج می‌شوند. در بخش نتایج مشترک نیز قابلیت استخراج کانتورها و نمودارها وجود دارد (شکل ۴).

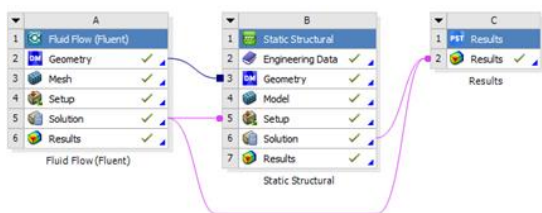
۴-۱- مدل اول: طرح با انشعاب غیرمتقارن و بدون نقاط تکیه‌گاهی

خط لوله با انشعاب غیرمتقارن و بدون نقاط تکیه‌گاهی (شکل ۱) به عنوان مدل اول ایجاد و مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل زانوها مطابق آنچه که در عمل وجود دارد، بصورت زانو بلند^۱ در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل از بخش سیالاتی آغاز شده و طرح ترسیمی مطابق شکل ۱ به محیط ترسیم وارد شد. در اولین اقدام، با اضافه کردن ضخامت به این طرح، بخشی به‌صورت توخالی و با ضخامت تعیین شده ایجاد گردیده که لوله (بخش جامداتی) نامیده شد. بخش سیالاتی نیز قسمت توپر اولیه خواهد بود. در تحلیل سیالاتی، بخش جامداتی، غیرفعال و در تحلیل جامداتی، وضعیت برعکس (غیرفعال شدن بخش سیالاتی) انجام شده است. شکل‌های ۵ و ۶ یک نمونه مش بندی در بخش‌های سیالاتی و جامداتی را نشان می‌دهد.

^۱ Large Radiuse

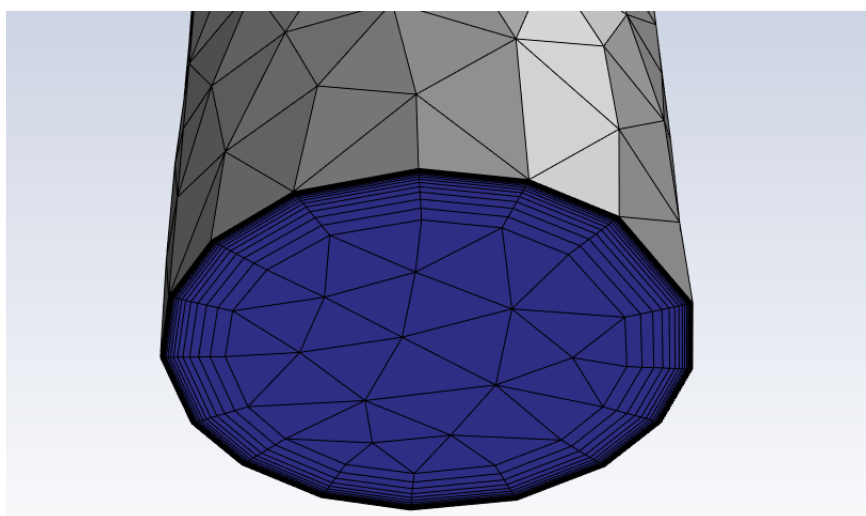
برای مدل‌سازی طرح‌های چهارگانه، ابتدا هندسه خط لوله ترسیم و سپس این طرح، در بخش ترسیم سیالاتی انسیس وارد می‌شود. قسمت ترسیم بین بخش‌های جامداتی و سیالاتی اشتراک دارد. در تحلیل سیالاتی که در بخش فلوننت، اجرایی می‌شود؛ مسئله براساس حلگر Pressure Base حل شده، چون سیال تراکم‌ناپذیر است، در نرم‌افزار فلوننت ابتدا میدان سرعت با حل معادله مومنوم بدست می‌آید و همچنین فشار نیز با استفاده از معادله فشار و معادله پیوستگی و مومنوم (معادله ناویر استوکس) بدست می‌آید و چون جریان آشفته است، با حل معادله اضافه برای مدل‌های توربولانسی سیال تحلیل می‌شود. سپس نتایج حل سیال را به سازه داده که موجب حل آن خواهد شد.

برای همه حالات، ابتدا ترسیم جامداتی غیرفعال و سپس مش بندی مورد نظر روی آن اعمال می‌شود. بخش‌های ورودی، خروجی و دیواره تعریف می‌شوند. در مرحله بعد، با قراردادن شرایط مرزی مشخص شامل سرعت و فشار ورودی، تعریف مدل اغتشاش و معادلات حاکم بر سیال، شبیه‌سازی سیالاتی صورت می‌گیرد. در میان مدل‌های مورد استفاده برای جریان توربولانسی، مدل k-ε استاندارد، پرکاربردترین مدل مهندسی توربولانسی است که در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل، مدلی قدرتمند و دارای دقت قابل قبولی است؛ همچنین وجود اعتبار سنجی‌های متعدد در مطالعات مختلف برای این روش، از دیگر مزیت‌های آن است [۲۳-۲۴]. در حالی‌که مدل‌های دیگر k-ε، برای جریان‌های با شرایط خاص نظیر جریان‌های مختلط، جریان‌های چرخشی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین در این پژوهش، با توجه به مشخصات مسئله مورد



شکل ۴- شبیه‌سازی مسئله اندرکنش سیال-سازه در نرم افزار انسیس

به منظور ارائه جزئیات بهتری در بخش نتایج، اندازه مش در نقاط حساس ریزتر انتخاب می‌شود. در عین حال اندازه مش با اندازه کلی جسم، می‌بایست تناسب داشته باشد. نکته قابل توجه این که در مش‌بندی طرح، به جز تقسیم‌بندی سازه، سیال می‌بایست لایه‌گذاری شود که در شکل ۵ نشان داده شده است. تعداد ۱۵ لایه برای تقسیمات سیال، تعیین گردیده است. مش‌بندی، لازمه انجام تحلیل‌های اجزای

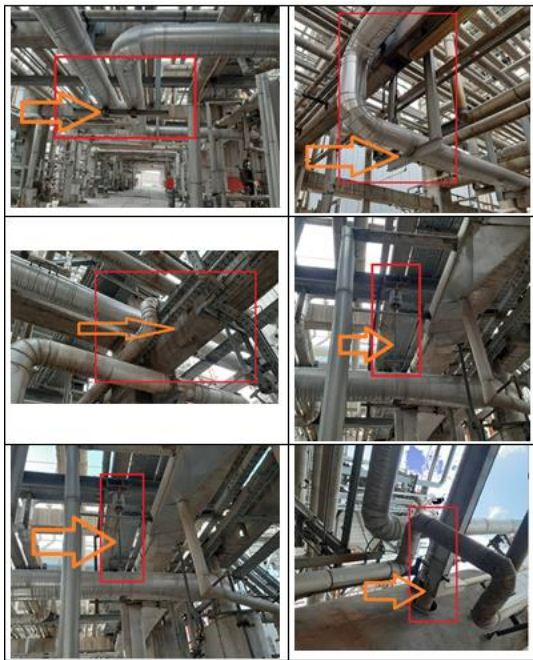


شکل ۵- یک نمونه مش بندی طرح لایه مرزی در بخش سیالاتی انسیس

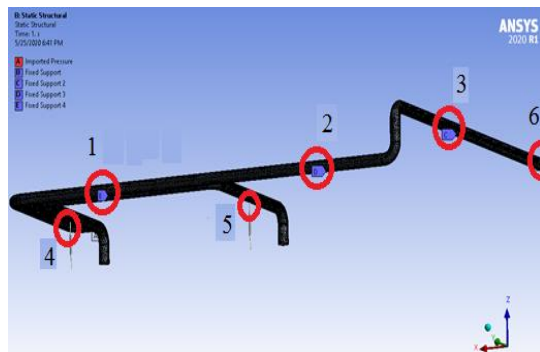


شکل ۶- یک نمونه مش‌بندی بخش جامداتی

شده و انشعاب مطابق شکل ۲ به صورت متقارن در نظر گرفته شده است. در این حالت مشخصات شبکه مورد استفاده جهت تحلیل مطابق جدول ۴ است.



شکل ۷- نقاط تکیه‌گاهی خط لوله



شکل ۸- مدلسازی نقاط تکیه‌گاهی خط لوله

جدول ۴- مشخصات مش‌بندی مسئله

نوع مش	درجه	کیفیت	تعداد گره	تعداد المان
مثلثی	۲	بالا	۴۰۷۱۱۵	۸۹۵۶۹۸
مثلثی	۲	بالا	۲۸۷۳۳۱	۶۱۳۴۴۵

محدود است. با توجه به اتصال بخش‌های مش بندی بین دو قسمت جامداتی و سیالاتی، نوع مش بندی در ابتدای کار اهمیت فراوان دارد و بحث استقلال از مش مهم است. مدل-های مختلفی از مش بندی (از نظر نوع، اندازه و لایه مرزی) ایجاد و در نهایت، همگرایی مورد نیاز در نتایج حاصل شده است؛ لذا بهینه ترین نوع مش بندی، در این طرح، انتخاب شد. مش بندی نهایی مطابق جدول ۳ است. پس از پایان مش‌بندی، شبیه‌سازی سیالاتی انجام شد. در اینجا شرایط مرزی حل مسئله مطابق جدول ۳ اعمال گردید. جنس، سرعت و فشار ورودی سیال مشخص گردید و تعداد ۱۰۰۰ تکرار تعیین شد و همگرایی نتایج در تکرار بین ۴۰۰ و ۵۰۰ حاصل شده است.

۲-۴- مدل دوم: طرح با انشعاب غیرمتقارن به همراه

نقاط تکیه‌گاهی

تمامی مراحل مدلسازی در این حالت مشابه مدل اول بوده، اما تکیه‌گاه‌های ثابت و الاستیک در بخش سازه لحاظ شده است. در شکل ۷ نقاط مختلف تکیه‌گاهی خط لوله مورد بررسی نشان داده شده است. تکیه‌گاه الاستیک شامل فنرگذاری، مطابق شکل ۸ و تکیه‌گاه ثابت نیز به صورت مقید کردن ناحیه کوچکی روی لوله مدل شده است. فنر اول با ثابت ۱۲۵ نیوتن بر میلی‌متر و تکیه‌گاه الاستیک دوم با ثابت ۱۵۰ نیوتن تعیین شد. در تصاویر ۷ و ۸ نحوه تکیه‌گاه گذاری و مقایسه آنها در عمل نشان داده شده است.

۳-۴- مدل سوم: طرح با انشعاب متقارن و بدون نقاط

تکیه‌گاهی

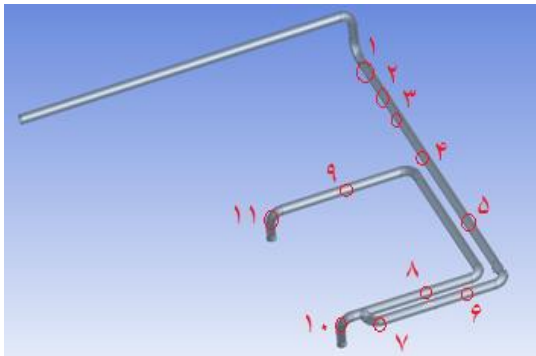
طرح با انشعاب متقارن و بدون در نظر گرفتن نقاط تکیه‌گاهی به عنوان مدل سوم ایجاد شده است. همانطور که پیشتر نیز گفته شد، در این مدل، طول اضافه خط لوله حذف

جدول ۳- مشخصات مش بندی مسئله

بخش	نوع مش	درجه	کیفیت	تعداد گره	تعداد المان
سیال	مثلثی	۲	بالا	۴۵۲۳۵۰	۱۰۰۸۱۵۹
سازه	مثلثی	۲	بالا	۳۱۹۲۵۷	۶۸۱۶۰۶

سمت هم‌گرایی رفته و در نتیجه استقلال از مش حاصل شده است.

به منظور صحت سنجی نتایج، ارتعاش نقاط مختلف خط لوله اندازه‌گیری شده (اشکال ۹ و ۱۰) و با نتایج مدل‌سازی مقایسه شده اند. جدول ۶ خلاصه نتایج اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و در شکل ۱۱ نتایج عملی و مدل‌سازی مقایسه شده‌اند. همانطور که پیداست، همخوانی خوبی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۹- نقاط مورد نظر جهت اندازه‌گیری ارتعاشات

۴-۴- مدل چهارم: طرح با انشعاب متقارن به همراه نقاط تکیه گاهی

هندسۀ این مدل نیز همانند مدل سوم بوده و تنها تفاوت آن، مدل‌سازی تکیه‌گاه‌های ثابت و الاستیک مطابق توضیحات داده شده در مدل دوم بر اساس شرایط موجود در خط لوله است.

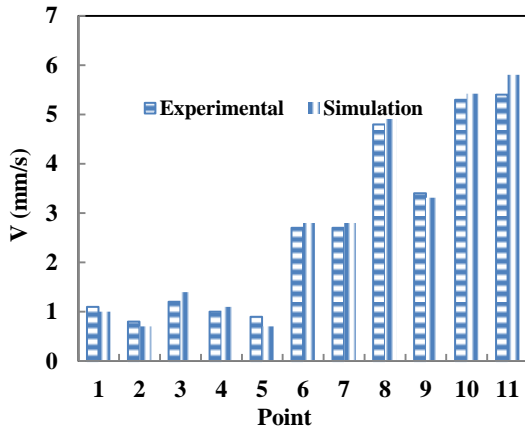
۵- نتایج و بحث

در این بخش، به بررسی نتایج پرداخته شده است. تجزیه و تحلیل مسئله دارای شروطی از قبیل صحت سنجی و استقلال از مش است. پس از اطمینان از صحت تحلیل، نتایج حاصل برای مدل‌های مورد بررسی ارائه شده است.

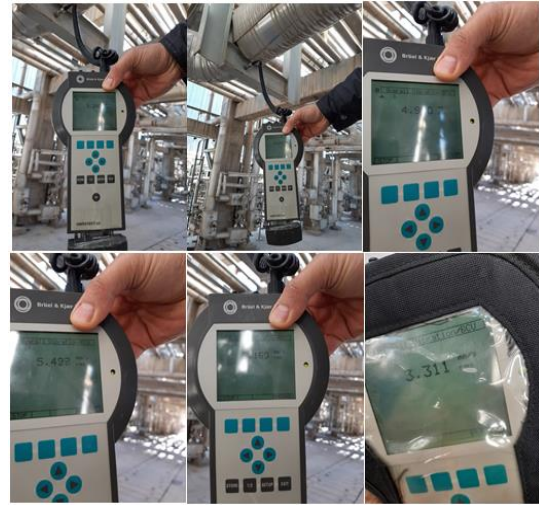
اثر مش بندی روی نتایج حاصله در جدول ۵ آورده شده است. می‌توان مشاهده نمود که مش‌بندی درشت، نتیجه مناسبی نداشته و مقادیر نتایج با تغییر مش‌بندی و به‌خصوص ریزتر شدن و همچنین افزایش لایه‌ها، به

جدول ۵- جزئیات مش بندی و همگرایی نتایج

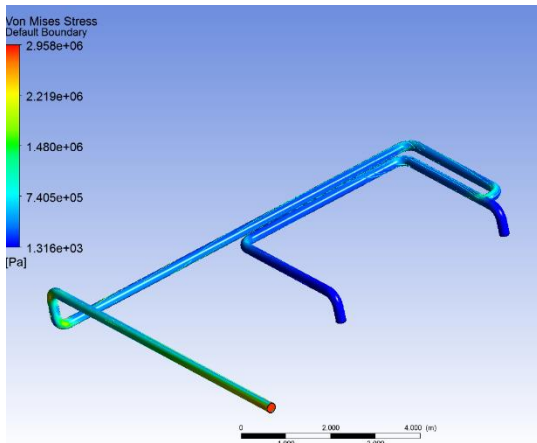
Solid			Fluid			Results		
Type	Size	Number	Type	Size	Layer	Number	Max Fluid Velocity	Max Stress on Solid
adaptive	۶۷/۴۵	۶۵۹۶۰	adaptive	۶۷/۴۵	۱۰	۸۲۴۵۱	۴/۹۹	۴/۲۷۲۵
curvature	۶۷/۴۵	۶۵۹۶۱	adaptive	۶۷/۴۵	۱۰	۸۲۴۵۱	۵	۴/۲۷۲۵
curvature	۳۶۵/۵۱	۸۶۶۱۶	adaptive	۵۱/۳۶۵	۱۰	۱۰۸۲۷۱	۵/۲	۲/۴۹۵۹
curvature	۵۰/۶۵۷	۸۷۸۲۷	adaptive	۵۰/۶۵۷	۱۵	۱۰۹۷/۸۳	۵/۵۴	۲/۱۱
curvature	۵۰/۳۲۵	۸۸۴۰۶	curvature	۵۰/۳۲۵	۲۰	۱۱۰۵۰۸	۵/۵۴	۲/۱۲
curvature	۴۲/۳۶۵	۱۰۵۰۱۷	curvature	۴۲/۳۶۵	۲۵	۱۳۱۲۷۱	۵/۵۴	۲/۱۳
curvature	۳۰/۳۲۵	۱۴۶۷۱۲	curvature	۳۰/۳۲۵	۲۵	۱۸۳۳۹۱	۵/۵۵	۲/۱۳
curvature	۲۹/۴۱۱	۱۵۱۲۳۵	curvature	۲۹/۴۱۸	۲۵	۱۹۵۲۵۴	۵/۵۵	۲/۱۳



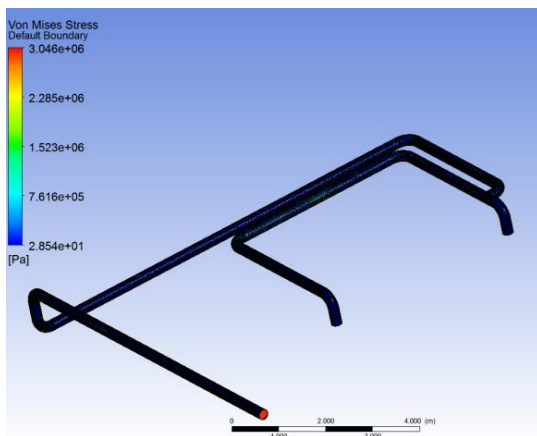
شکل ۱۱- مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی اجزای محدود با نتایج عملی



شکل ۱۰- اندازه گیری ارتعاشات خط لوله مورد بررسی



شکل ۱۲- کانتور تنش در مدل اول



شکل ۱۳- کانتور تنش در مدل دوم

جدول ۶- سرعت و شتاب اندازه گیری شده در نقاط مختلف خط لوله

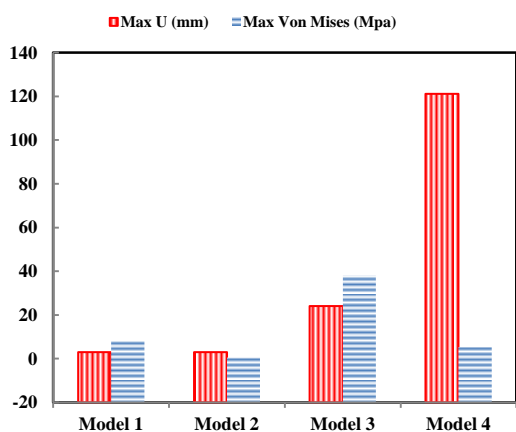
نقطه	سرعت ارتعاش (میلی متر بر ثانیه)	شتاب ارتعاش (متر بر مجذور ثانیه)
۱	۱
۲	۱/۴	۲/۳
۳	۱/۴	...
۴	۱/۱	۳/۹
۵	۰/۷	...
۶	۲/۸	...
۷	۲/۸	۳/۹
۸	۴/۹۰۷
۹	۳/۳۱۱
۱۰	۵/۴۲	۹/۲
۱۱	۵/۸

مدل‌های مورد بررسی پیشتر معرفی شدند. همان طور که بیان شد، تکیه‌گاه‌های الاستیک دو عدد بوده و در مکان‌های تعبیه شده قرار گرفتند. نتایج حاصل برای مقادیر تنش در مدل‌های مورد بررسی در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ ارائه شده‌اند.

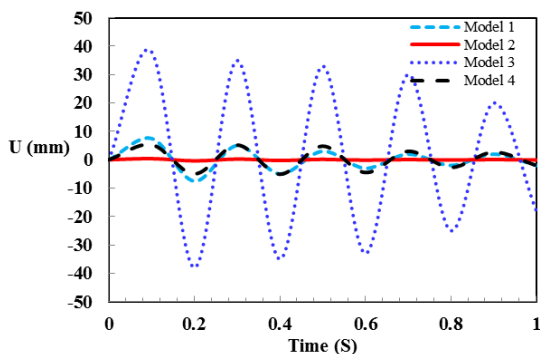
می‌شود. موقعیت های مشابه تکیه گاه گذاری در طرح متقارن نسبت به طرح غیرمتقارن، موجب افزایش دامنه ارتعاش، تنش وارده و کرنش شده و نامطلوب است؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد، تکیه گاه ثابت با وجود کاهش ارتعاش، موجب افزایش شدید تنش می‌گردد. با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸، ارتعاشات لوله پس از تکیه گاه گذاری به مراتب کاهش داشته و این مسئله در محاسبات بار خستگی منجر به خرابی اهمیت فراوان دارد.

جدول ۷- مقادیر تنش و جابجایی مدل‌ها

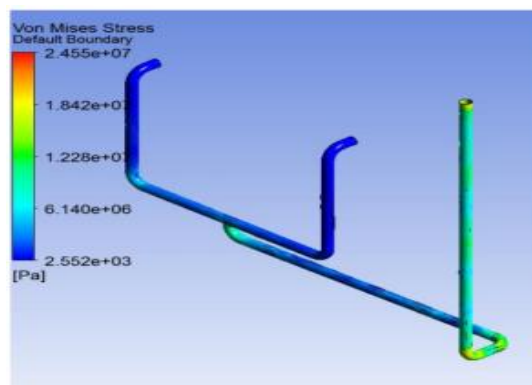
مدل اول	مدل دوم	مدل سوم	مدل چهارم	
۷/۹	۰/۴	۳۸	۵/۳	جابجایی (میلی متر)
۲/۹	۳	۲۴	۱۲۱/۱۷	تنش ون مایسز (مگاپاسگال)



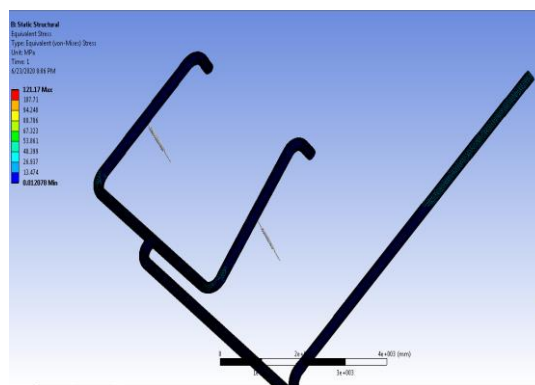
شکل ۱۶- مقایسه تنش و جابجایی مدل‌ها



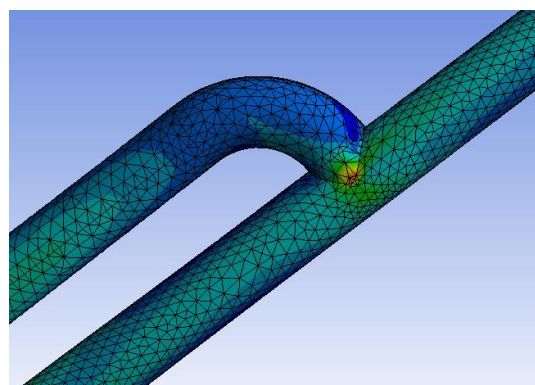
شکل ۱۷- بررسی اثر تکیه گاه گذاری بر دامنه ارتعاش



شکل ۱۴- کانتور تنش در مدل سوم



(الف)



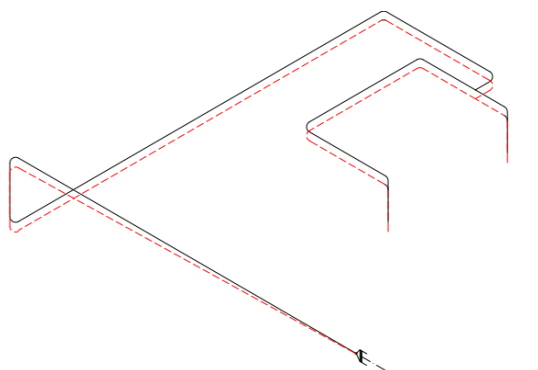
(ب)

شکل ۱۵- کانتور تنش در مدل چهارم الف) کل مدل و ب) محل اتصال

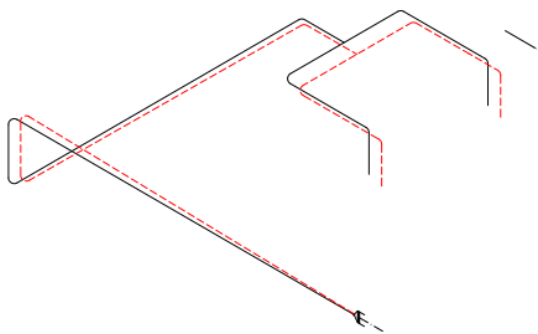
پس از بررسی مدل های چهارگانه، مقایسه بین نتایج حاصله برای هر یک از مدل‌های مورد بررسی در شکل ۱۶ و جدول ۷ انجام شده است. مطابق نتایج حاصله از جدول ۷، وضعیت نامساعدتری در طرح با انشعاب متقارن مشاهده

سوم)، در قسمت ثابت شده لوله دچار تغییر شکل نشد، ولی جابجایی آن به علت نبود تعادل نیروها، بیشتر از حالت قبل گردید؛ اما طرح غیرمتقارن به دلیل وزن بالا، در نقطه اتصال به ورودی، دچار تغییر شکل شد، ولی به دلیل تعادل نیروهای وارده به سازه، دارای جابجایی کمتر است.

مودهای ارتعاشی طرح‌های متقارن و غیرمتقارن به صورت کامل به ترتیب در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. دامنه بیشتر ارتعاش در طرح متقارن، به خوبی مشخص است و مود ارتعاشی نیز این مسئله را نشان می‌دهد.

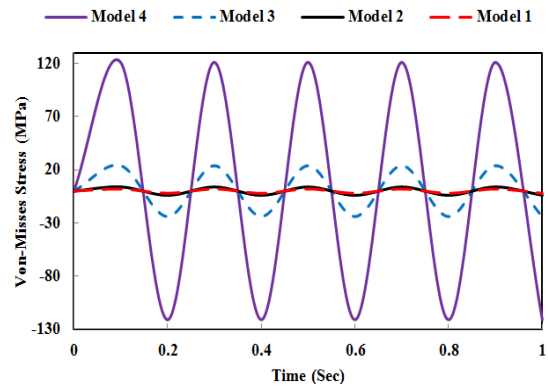


شکل ۲۱- مود ارتعاشی طرح غیرمتقارن

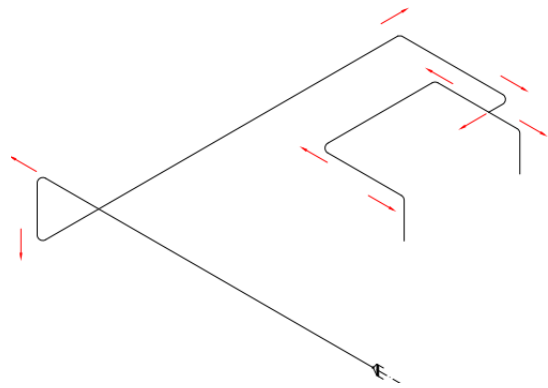


شکل ۲۲- مود ارتعاشی طرح متقارن

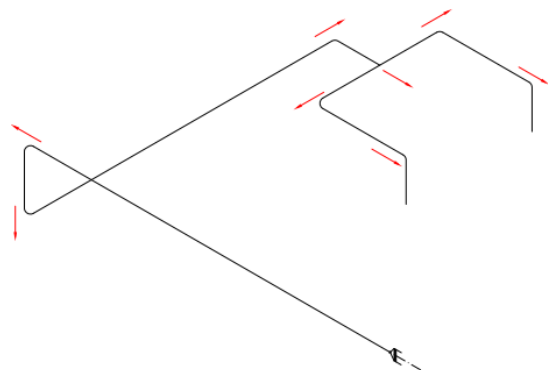
اثر بارهای وارده به زانوها در اثر سیال در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب برای طرح‌های غیرمتقارن و متقارن، نشان داده شده است. همانطور که پیداست، نیروهایی که در اثر تغییر جهت و مومنتوم به زانوها وارد می‌شود، در خط لوله غیرمتقارن، تقریباً با یکدیگر به تعادل رسیده است. در طرح متقارن به علت کاهش وزن در حالت بدون تکیه‌گاه (مدل



شکل ۱۸- بررسی اثر تکیه‌گاه گذاری بر مقدار تنش



شکل ۱۹- اثر نیروی وارده به طرح غیرمتقارن



شکل ۲۰- اثر نیروی وارده به طرح متقارن

- استفاده از تکیه‌گاه‌های الاستیک، نقش مهمی در تنظیم شکل مود ارتعاشی دارند.
- استفاده ترکیبی از تکیه‌گاه‌های الاستیک و ثابت می‌تواند به نحو مطلوب، ضمن حفاظت از قطعات خط لوله، موجب کاهش ارتعاش و اصلاح مود ارتعاشی شود.
- طرح متقارن توزیع جریان بهتری نسبت به طرح غیرمتقارن داشته و این تنها مزیت آن محسوب می‌شود.

این مورد به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت، طرح غیرمتقارن به دلیل بالانس نیروهای وارده بر زانو، دامنه ارتعاشات کمتری دارد. جریان مغشوش باعث ارتعاش در لوله‌ها و متعلقات می‌شود. این ارتعاشات با افزایش تعداد تکیه‌گاه‌ها کاهش می‌یابد، ولی اضافه کردن تکیه‌گاه‌ها کمک موثری در زمینه کاهش و کنترل ارتعاشات ناشی از کاویتاسیون و فلاشینگ نمی‌کند. تکیه‌گاه‌های ثابت در حالتی که سیستم لوله کشی دارای ارتعاش محوری باشد، باعث کماتش سیستم لوله کشی می‌شود، در این طرح از حمایت لغزنده استفاده شده است.

۷- مراجع

- [1] Zhai HB, Wu ZY, Liu YS, Yue ZF (2013) In-plane dynamic response analysis of curved pipe conveying fluid subjected to random excitation. Nucl Eng Des 256: 214-226.
 - [2] Mirramezani M, Mirdamadi HR, Ghayour M (2013) Innovative coupled fluid-structure interaction model for carbon nano-tubes conveying fluid by considering the size effects of nano-flow and nano-structure. Comput Mater Sci 77:161-171.
 - [3] Abolpour B, Shamsoddini R (2019) A predictive formula for the Nusselt number of compressible laminar fluid flow passing the thermal developing zone of a hot tube. Heat Transfer Asian Res 48(4): 1529-1543.
 - [4] He Y, Bayly AE, Hassanpour A (2018) Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows. Powder Technol 325: 620-631.
 - [5] Tuković Ž, Karač A, Cardiff P, Jasak H, Ivanković A (2018) OpenFOAM finite volume solver for fluid-solid interaction. Trans FAMENA 42(3): 1-31.
 - [6] Zhai HB, Wu ZY, Liu YS, Yue ZF (2013) In-plane dynamic response analysis of curved pipe conveying fluid subjected to random excitation. Nucl Eng Des 256: 214-226.
 - [7] Shankarachar SM, Radhakrishna M, Babu PR (2015) An experimental study of flow induced vibration of elastically restrained pipe conveying fluid. In Proceedings of the 15th International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE15.
 - [8] Veerapandi R, Karthikeyan G, Jinu DG, Kanniah R (2014) Experimental study and analysis of flow induced vibration in a pipeline. Int J Eng Res Tech 3(5): 1996-1999.
- [۹] مشاک م ع، کرامت ع (۱۳۹۹) اندرکنش سیال-سازه ناشی از ضربه قوچ در خط لوله تحت فشار با در نظر

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یکی از خطوط فرایندی شرکت پتروشیمی بیستون حاوی سیال پارافین (حدود ۹۰ درصد) و الفین (حدود ۱۰ درصد) با دو طرح متفاوت متقارن و غیر متقارن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا خط لوله در نرم افزار انسیس-فلونت شبیه‌سازی شده و نتایج اجزای محدود به صورت کوپل یکطرفه به بخش طراحی نرم افزار وارد شد. نتایج نشان داد که:

- به علت ورود نیروها به خط لوله در حین حرکت سیال، ارتعاش و به تبع آن تنش ایجاد شده می‌تواند خطرناک باشد، لذا تکیه‌گاه‌ها در محدوده مشخص، قادر به کنترل ارتعاش و تنش وارده بوده و حذف کامل تنش و جابجایی بوسیله تکیه‌گاه‌ها ممکن نیست، تنها می‌توان با تکیه‌گاه‌گذاری، محدوده مشخصی برای حرکت تعیین کرده تا لوله دچار شکست و خرابی نشوند.
- مود ارتعاشی غالب خط لوله با انشعاب غیرمتقارن و متقارن با توجه به شرایط فشار خروجی یکسان، به صورت حرکت عمودی به سمت پایین است، لذا توسط تکیه‌گاه‌های موجود قابل کنترل خواهند بود.
- کاهش طول لوله به‌تنهایی نمی‌تواند موجب بهبود وضعیت ارتعاشی خط لوله شود.
- استفاده از تکیه‌گاه‌های ثابت، هرچند که موجب کاهش ارتعاش می‌شود، اما مقادیر تنش افزایش پیدا می‌کند.

- [16] De La Torre O, Escaler X, Goggins J (2017) Experimental study of the dynamic response of partially filled pipes focused on natural frequencies and mode shapes. In ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [17] Chao C, Xu X, Kwelle SO, Fan X (2018) Significance of gas-liquid interfaces for two-phase flows in micro-channels. *Chem Eng Sci* 192: 114-125.
- [18] Heshmati M, Amini Y, Daneshmand F (2019) Vibration and instability analysis of closed-cell poroelastic pipes conveying fluid. *Eur J Mech A Solids* 73: 356-365.
- [19] Keramat A, Tijsseling AS, Hou Q, Ahmadi A (2012) Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *J Fluids Struct* 28: 434-455.
- [20] Ahmadi A, Keramat A (2010) Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling. *J Fluids Struct* 26(7-8): 1123-1141.
- [21] Keramat A, Ahmadi A (2012) Axial wave propagation in viscoelastic bars using a new finite-element-based method. *J Eng Math* 77(1): 105-117.
- [22] Zanganeh R, Ahmadi A, Keramat A (2015) Fluid-structure interaction with viscoelastic supports during waterhammer in a pipeline. *J Fluids Struct* 54: 215-234.
- [23] V Ranade V (2002) 3 Turbulent flow processes. *Proc Sys Eng* 5:57-83.
- [24] Fluent User Services Center: www.fluentusers.com
- گرفتن رفتار غیرخطی هندسی دیواره لوله. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر ۲۰-۱: ۵۲(۷).
- [۱۰] تشکری بافتی م، الهامی ر، ربیعی ع (۱۳۹۴) تحلیل عددی پدیده تعامل سیال-سازه بر روی پره توربین. دو فصلنامه علمی پژوهشی مکانیک سیالات و آیرودینامیک ۱۱-۱: ۴(۲).
- [۱۱] کریمیان علی آبادی ح، احمدی ا، کرامت ع (۱۳۹۷) مطالعه جریان گذرا در لوله ویسکوالاستیک با احتساب اثرات اندرکنشی بر مبنای پاسخ تحلیلی در حوزه فرکانس. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر ۱۶۰-۱۵۱: ۵۲(۴).
- [12] Keim D, Andrienko G, Fekete JD, Görg C, Kohlhammer J, Melançon G (2008) Visual analytics: Definition, process, and challenges. *Inf Visualization* 4950:154-175.
- [13] An C, Su J (2015) Dynamic behavior of pipes conveying gas-liquid two-phase flow. *Nucl Eng Des* 292: 204-212.
- [14] Zhai HB, Wu ZY, Liu YS, Yue ZF (2013) In-plane dynamic response analysis of curved pipe conveying fluid subjected to random excitation. *Nucl Eng Des* 256: 214-226.
- [15] Rezaee M, Arab Maleki V (2017) Vibration Characteristics of fluid-conveying pipes in presence of a dynamic vibration absorber. *Moades Mechanical Engineering* 17(7): 31-38. (In Persian)