



Modeling of Piping System with Dynamic Vibration Absorber Using CAESAR II

Mahdi karimi¹, Arash sharefi², Naghmeh firoozfam³, Mehrdad shemshadi^{4*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

² Department of maintenance, Oil refinery, Kermanshah

³ Mathematics teacher, Department of Education, Kermanshah

⁴ Department of engineering, Oil refinery, Kermanshah

Received: 23 Feb 2022 Accepted: 5 Jul 2022

Abstract

Vibrations exceeding the permissible limits in piping systems causes cyclic loads that lead to fatigue, damage, and fracture. The present study addresses vibration reduction in an actual piping system in a petroleum refinery. CAESAR II was used to model the piping system based on the maximum displacement and the corresponding frequency. The stresses exerted on the flanges and supports, displacements, natural frequencies, and system mode shapes are obtained from dynamic analysis. To reduce vibrations, we propose a cantilever beam with a lumped mass at the free end (named a “beam DVA” in this paper) as the vibration absorber. CAESAR II’s dynamic analysis results indicate that using an optimal beam DVA can lower pipe displacement by 73%. Next, the beam DVA is constructed and installed in the actual piping system to validate the modeling results. Experimental measurements show that installing the beam DVA reduces the vibration level of the pipe by 69%. Hence, a good agreement exists between the modeling and experimental results.

Keyword: Vibration, Piping System, CAESAR II, Vibration Absorber.

* shemshadi639@gmail.com

مدلسازی جاذب دینامیکی ارتعاش در سیستمهای لوله‌کشی با استفاده از نرم‌افزار CAESAR II

مهدی کریمی^۱، آرش شریفی^۲، نغمه فیروزفام^۳، مهرداد شمشادی^{۴*}
^۱ دکتری، هیئت علمی دانشگاه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران
^۲ کارشناس ارشد، واحد تعمیر و نگهداری، شرکت پالایش نفت کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
^۳ کارشناس ارشد، آموزش و پرورش کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
^۴ دکتری، واحد مهندسی طرحها، شرکت پالایش نفت کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

چکیده

ارتعاشات خارج از محدوده مجاز در سیستمهای لوله‌کشی فرآیندی به دلیل ایجاد بارهای نوسانی منجر به خستگی، شکست و در نهایت توقف در تولید می‌شود. مطالعه حاضر بر روی کاهش ارتعاشات در یک سیستم لوله‌کشی واقعی در پالایشگاه نفت انجام شده است. سیستم با در نظر گرفتن دامنه جابجایی ماکزیمم لوله و فرکانس مربوطه در نرم‌افزار CAESAR II مدلسازی شده و تنشهای وارد بر فلنجهها و تکیه‌گاهها، فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای سیستم در تحلیل دینامیکی استخراج می‌گردد. جهت کاهش ارتعاشات، تیر یکسرگیردار با جرم متمرکز در انتها که در این مقاله beam DVA نام‌گذاری می‌شود، به عنوان جاذب ارتعاش طراحی و سپس کل مجموعه در نرم‌افزار CAESAR II مدلسازی می‌گردد. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد استفاده از beam DVA با مشخصات بهینه می‌تواند منجر به کاهش ۷۳٪ درصدی دامنه جابجایی در لوله شود. جهت صحت‌گذاری بر نتایج، beam DVA ساخته و در سیستم لوله‌کشی واقعی نصب می‌شود. اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهد با نصب beam DVA سطح ارتعاشات لوله به میزان ۶۹٪ پایین می‌آید. لذا تطابق قابل قبولی مابین نتایج مدلسازی و تجربی وجود دارد.

کلمات کلیدی: ارتعاشات، سیستمهای لوله‌کشی، جاذب ارتعاش، نرم‌افزار CAESAR II.

* shemshadi639@gmail.com

۱- مقدمه

پرداختن به لرزش لوله‌ها به‌عنوان شریان اصلی انتقال سیال در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و نیروگاهها و سایر صنایع بزرگ و کوچک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بطوریکه مطابق داده‌های منتشر شده توسط اداره بهداشت و ایمنی بریتانیا در صنایع فراساحلی^۱ بخش شمال بریتانیا ۲۰ درصد از تمام هیدروکربن‌های آزاد شده در هوا ناشی از آسیب‌های ناشی از ارتعاشات در سیستم‌های لوله‌کشی می‌باشد. مطابق همین داده‌ها، در اروپای غربی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد از خرابی‌ها نیز ناشی از خستگی ارتعاش است [۱]. لذا برای به حداقل رساندن خطر خستگی ناشی از ارتعاش در سیستم‌های لوله‌کشی در صنایع بزرگ و کوچک بایستی راهکاری در نظر گرفته شود.

اولین راه‌حلی که برای کنترل ارتعاشات خارج از محدوده مجاز در خطوط لوله به ذهن می‌رسد حذف و یا ایجاد تغییرات در منبع تولید ارتعاش است. علیرغم اینکه حذف منبع ارتعاشات مطلوب است ولی بیشتر اوقات بدلیل شرایط فرآیندی این روش همواره عملی نیست. لذا بایستی راهکارهای دیگری بررسی گردد. اضافه کردن تکیه‌گاهها و یا تغییر موقعیت آنها از دیگر راه‌حلها در کنترل ارتعاشات نامطلوب در سیستم‌های لوله‌کشی در صنایع است. هر چند گاهی تکیه‌گاهها با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و فضایی، محدودیت‌های طراحی و جابجایی‌های حرارتی در لوله‌ها نمی‌توانند دچار تغییرات زیادی گردند و سیستم لوله‌کشی و تکیه‌گاهها همچنان در معرض بارهای خارج از محدوده مجاز قرار می‌گیرند.

یکی از ایمن‌ترین و کاربردی‌ترین اقدامات اصلاحی، اضافه کردن جاذب ارتعاشات به سیستم لوله‌کشی است بدون اینکه تغییری در سیستم و تکیه‌گاهها بوجود آید. جاذب ارتعاش یک روش کلاسیک مهندسی در کنترل ارتعاشات است که سبب کاهش دامنه جابجایی در سازه اصلی می‌گردد. انتقال انرژی هدفمند، یکطرفه و برگشت ناپذیر از سازه اصلی به سیستم الحاقی است بطوری که انرژی ارتعاش تلف گردد. از این‌رو، نیاز به طراحی جسم ثانویه‌ای بوده که بتواند مقدار مشخصی انرژی جذب و در نقطه خاصی دامنه ارتعاشات را به حد قابل قبولی کاهش دهد. عدم کارایی جسم ثانویه به دلیل طراحی نامناسب، سبب خواهد گشت تا در محل نصب بصورت معکوس عمل شود. لذا طراحی بهینه مشخصات جاذب ارتعاش بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بر این‌اساس در سال‌های اخیر جاذب‌های ارتعاشات در سیستم‌های لوله‌کشی مورد توجه محققان قرار گرفته است.

سانگ و همکاران [۲] به بررسی کنترل ارتعاش یک سیستم لوله‌کشی به شکل M با استفاده از جاذب PTMD^۲ پرداختند. جاذب PTMD متشکل از یک تیر یکسرگیردار با جرم متمرکز در سرآزاد می‌باشد که تیر از یک سوراخ دایره‌ای که سطح داخلی سوراخ از مواد ویسکوالاستیک پوشیده شده است عبور می‌کند. در نوسانات تیر خم می‌شود و به مواد ویسکوالاستیک ضربه می‌زند و انرژی جنبشی را مستهلک می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد با استفاده از PTMD جابه‌جایی و شتاب در لوله به ترتیب ۸۶/۶٪ و ۸۳/۶٪ کاهش یافته است. سانکیو و همکاران [۳] به بررسی کنترل ارتعاشات لوله‌های نیروگاه هسته‌ای با استفاده از دمپر استاک بریج^۳ در برابر زلزله پرداختند. آنالیز با استفاده از نرم‌افزار سپ^۴ ۲۰۰۰ در حالت استفاده از دمپر و بدون استفاده از دمپر انجام گردید. بهترین پارامترهای طراحی

^۱ Offshore Industry

^۲ Pounding Tuned Mass Damper

^۳ Stock Bridge Damper

^۴ Sap 2000

دمپر مطابق روش فیکس پوینت انجام گردید. تینگ و همکاران [۴] مطالعاتی بر روی یک سیستم لوله کشی با مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. مطالعه ارتعاشات در سیستم واقعی، بدلیل مسائل ایمنی و بهره‌برداری مشکل می‌باشد لذا مقیاس آزمایشگاهی از لوله ترجیح داده می‌شود. در این راستا، با استفاده از آنالیز ابعادی و شباهت‌های هندسی، سینماتیک و دینامیکی مدل با مقیاس کوچک‌تر بررسی گردید. مهرداد شمشادی و همکاران [۵] با استفاده از داده‌های آزمایشات تجربی در لوله با سایزهای یک اینچ، دو اینچ و سه اینچ و روش آنالیز ابعادی، معادله ریاضی کاهش دامنه جابجایی در لوله را ارائه دادند. در این مطالعه تیر یکسرگیردار با جرم متمرکز در سرآزاد بعنوان جاذب ارتعاش در نظر گرفته شده است.

نرم افزار CAESAR II شرکت Intergraph امروزه از جایگاه مهمی در تحلیل تنش سیستم‌های لوله کشی فرآیندی برخوردار است. با استفاده از این نرم افزار می‌توان تحلیل‌های دقیقی از بارهای استاتیکی و دینامیکی و محاسبات فرکانس طبیعی سیستم، تحلیل هارمونیک، تحلیل طیف پاسخ و تحلیل وابسته به زمان را انجام داد. مطالعاتی بسیاری در این زمینه انجام گردیده است. جامونا و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۶ جهت ارزیابی انعطاف پذیری یک پایپینگ در برابر افزایش دما، اثر هنگرها و اکسپنشن جوینت‌ها را با نرم افزار CAESAR II بررسی کردند. در آنالیز تنش از کد ASME B 31.1 استفاده شد نتایج نشان داد قابلیت جابجایی پایپینگ در اثر دما با اکسپنشن جوینت‌ها کمتر از هنگرها می‌باشد و استفاده از اکسپنشن جوینت را پیشنهاد داد. باگوات و همکاران [۷] مدلسازی یک سیستم لوله کشی که بدلیل وجود جریان‌ات آشفته سیال در یک کنترل ولو ۱۲ اینچ دچار ارتعاش خارج از محدوده بود را با CAESAR II انجام دادند. در نهایت با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی در CAESAR II جهت کاهش ارتعاشات دو توصیه کردند: ۱- اضافه کردن تکیه‌گاه در نقاط مشخص شده و استفاده از کلمپ و صفحات جداساز لاستیکی ۲- اضافه کردن دمپرهای ویسکوالاستیک. انستیس و همکاران [۸] با مدلسازی یک سیستم لوله کشی واقعی با نرم افزار CAESAR II که تحت بارگذاری خستگی قرار داشته، تنشها و جابجایی‌ها را استخراج و به این نتیجه رسیدند هنگامیکه سطح تنش‌های ناشی از ارتعاش بیشتر از حد دوام می‌شود باید با اضافه کردن تکیه‌گاهها و یا جابجایی فرکانس طبیعی سیستم لوله کشی، سطح ارتعاشات و در نتیجه تنشها را در مقادیر مجاز قرار داد.

جاذبه‌های ارتعاش سنتی جرم، فنر و دمپر ساختار ساده و هزینه ساخت ارزانی دارند اما دارای محدودیت‌های کاربردی می‌باشند و در بسیاری موارد در سیستم‌های واقعی غیر قابل اجرا هستند. از طرفی تیرها از اجزاء پرکاربرد در مهندسی هستند که در طیف وسیعی از سازه‌ها و ماشینها کاربرد دارند و بدلیل شکل هندسی و ابعاد تیر، طول تیر، جنس تیر و ... دارای قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی هستند. لذا در مطالعه حاضر جهت کنترل ارتعاشات یک سیستم لوله کشی واقعی تیر یکسر گیردار با جرم متمرکز در انتها که در این مقاله beam DVA^۵ نام گذاری می‌شود، پیشنهاد می‌گردد. بدین صورت که ابتدا سیستم مورد مطالعه با نرم افزار CAESAR II مدلسازی می‌شود و نیروها، تنشها، جابجایی‌ها و ... در تحلیل استاتیکی و شکل مودها، فرکانسهای طبیعی و ... در تحلیل دینامیکی استخراج می‌گردد. در مرحله بعد با اعمال شرایط مرزی پیچیده در مدلسازی beam DVA، شبیه سازی همزمان سیستم لوله کشی و beam DVA انجام و ضمن استخراج بهینه مشخصات جاذب تحلیل دقیقی از شرایط سیستم بعد از نصب

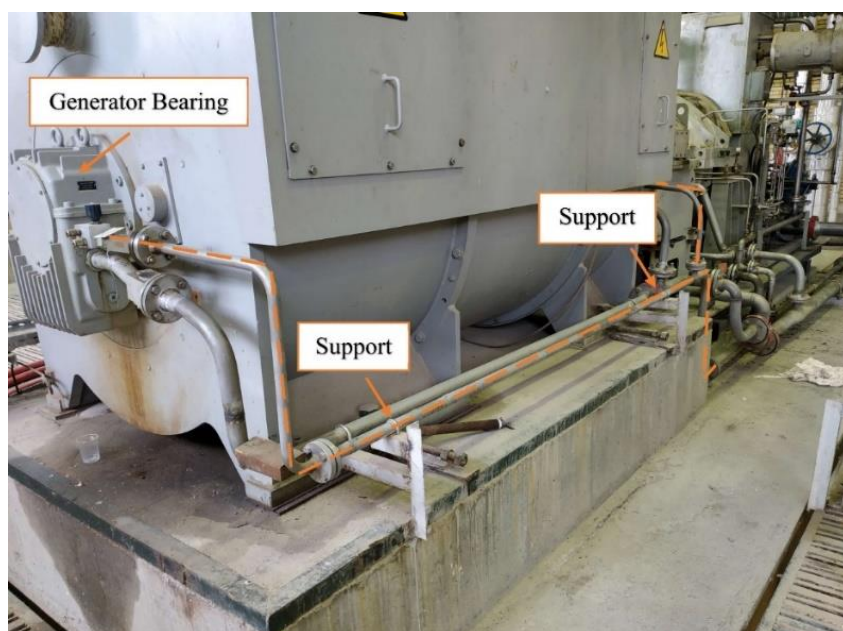
⁵ Beam Dynamic Vibration Absorber

جاذب ارتعاش بدست می‌آید. در نهایت با ساخت beam DVA و نصب آن در سیستم واقعی نتایج مدلسازی صحه گذاری می‌شود.

۲- طرح مسئله

یکی از عوامل مهم در عملکرد دستگاهها و قطعات متحرک، سیستم روغنکاری است. در روغنکاری تحت فشار یاتاقانها بعنوان یکی از قطعات متحرک در تجهیزات دوار، روغن توسط پمپ از مخزن کشیده می‌شود و تحت فشار پس از خنک شدن و فیلتر شدن به محفظه یاتاقان وارد و با ایجاد فیلم روغن بین یاتاقانها و محور، عملیات روغنکاری انجام می‌شود.

در سیستم روغنکاری یاتاقانهای ژنراتور توربین بخار سه مگا واتی در نیروگاه یک پالایشگاه نفت، روغن توسط پمپ سانتریفیوژ از نوع Volute-Casing، مدل NSS و برند ALLWEILER که فشار خروجی ۹/۹ بار را ایجاد می‌کند به یاتاقانهای ژنراتور فرستاده می‌شود. لوله با سایز یک اینچ و جنس استنلس استیل^۶ گرید L ۳۱۴ و ضخامت ۴/۵ میلیمتر می‌باشد که مطابق تصویر شکل ۱ در انتهای مسیر تغذیه روغن، از روی دو تکیه گاه عبور و به فلنج یاتاقانهای ژنراتور متصل می‌گردد.

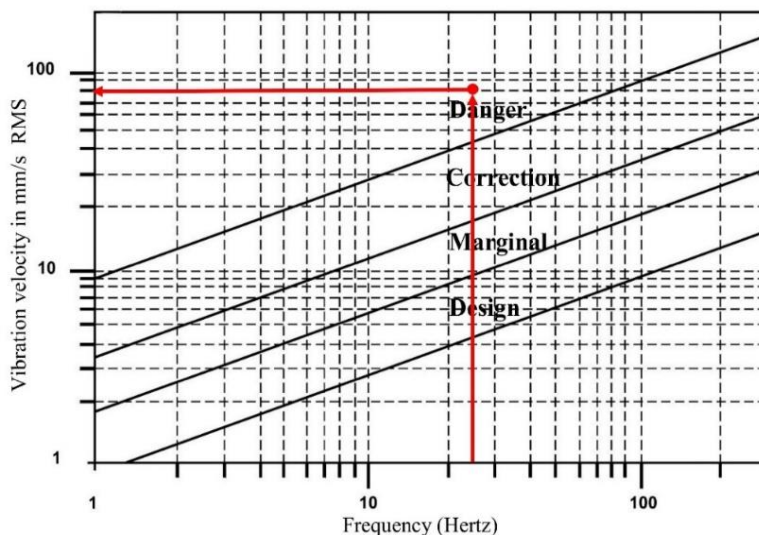


شکل ۱- انتهای مسیر لوله کشی تغذیه روغن یاتاقانها

صدای غیرعادی و بالا بودن سطح ارتعاش در لوله کشی گزارش شده بود. اندازه گیریها با دستگاه ارتعاش سنج نوع 107B (برند KOHTec)، با محدوده فرکانسی ۲ تا ۱۰۰۰۰ هرتز انجام و دامنه جابجایی (صفر تا ماکزیمم) در میانه لوله بین دو تکیه گاه و در صفحه افقی و قائم لوله به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۲۷ میلیمتر در فرکانس ۲۵ هرتز ثبت گردید. بدیهی است در صورتی که مقادیر اندازه گیری شدت ارتعاشات در سازهها خارج از محدودههای تعیین شده باشد نشان دهنده وضعیت نامطلوب در سازه می‌باشد و باید بوسیله یکی از راههای کنترل ارتعاشات سازه را اصلاح کرد. لذا به منحنیهای سرعت مجاز ارتعاشات در سیستمهای لوله کشی VDI 3842:2004-6 مراجعه گردید [۹]. مطابق نمودار

⁶ Stainless steel

شکل ۲ سطح ارتعاشات در ناحیه خطر قرار می‌گیرد و باید اصلاحات لازم در سیستم انجام شود. ارتعاشات نامطلوب در این سیستم می‌تواند باعث ایجاد نشتی روغن از فلنچ‌ها و آسیب به یاتاقان‌ها و کاپلینگ‌ها که تجهیزات بسیار گران قیمتی می‌باشند، گردد. از طرفی این لرزش می‌توانست به تله‌های بخار^۷ نیز آسیب رساند و در نهایت منجر به توقف تولید گردد.



شکل ۲- ارزیابی سطح ارتعاش لوله براساس VDI 3842:2004-6

یکی از راه‌حلهای معمول در صنایع، تغییر و یا اضافه کردن تکیه‌گاه در سیستم می‌باشد. تکیه‌گاههای استفاده شده در سیستم مورد مطالعه از نوع T-post بوده که بار ناشی از وزن لوله‌ها را بوسیله U-bolt، در جهت‌های افقی و عمودی مهار می‌نماید. از طرفی فاصله تکیه‌گاهها ۲/۱۱ متر اندازه‌گیری شد که با مراجعه به مدارک و کدهای مربوطه، طراحی و اجرای تکیه‌گاهها مورد تایید واقع گردید. لذا پس از بررسی‌های جامع، استفاده از تیرجاذب ارتعاش جهت کنترل و کاهش لرزش پیشنهاد گردید.

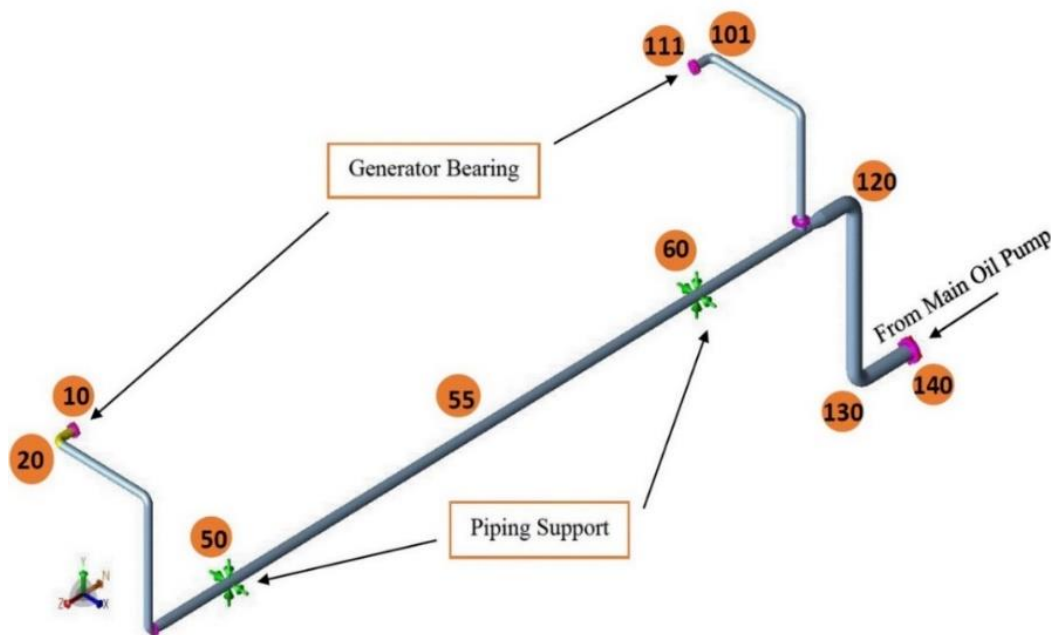
۲- مدلسازی دینامیکی سیستم با نرم افزار CAESAR II

طراحی سیستمهای لوله‌کشی فرآیندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بصورت سنتی براساس تحلیل‌های استاتیکی انجام می‌پذیرد و در کدها و استانداردهای مربوطه توجه کمی به خستگی ناشی از ارتعاش در این سیستمها می‌شود. از طرفی در این صنایع آسیب‌های وارده بر لوله‌ها با توجه به ماهیت فرآیندهای آنها که توام با حرارت و فشار بالا می‌باشد محدود به خسارت‌های مستقیم ناشی از این عوامل نمی‌شود و توجه به عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها و تاسیسات مختلف نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عبارتی این سیستمها همواره تحت بارهای استاتیکی قرار ندارند و ممکن است تحت یک یا چند بار دینامیکی قرار بگیرند. پاسخ سیستم در برابر یک بار دینامیکی نسبت به بار استاتیکی مشابه بسیار متفاوت است. لذا تحلیل دینامیکی سیستمهای لوله‌کشی فرآیندی در صنایع بزرگ بسیار حائز اهمیت

⁷ Steam trap

می‌باشد. در تحلیل‌های دینامیکی فرکانس طبیعی سیستم، تحلیل هارمونیک، تحلیل طیف پاسخ و تحلیل وابسته به زمان انجام می‌شود.

Job case مورد نظر در مدلسازی و تحلیل دینامیکی سیستم مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است در سیستم شش نقطه مهم وجود دارد: گره‌های ۱۰ و ۱۱۱ محل قرار گیری فلنج یاتاقان‌های روغن، گره‌های ۵۰ و ۶۰ تکیه‌گاه‌های سیستم است که حرکت لوله را مهار می‌کند. و گره ۵۵ وسط دو تکیه‌گاه که مطابق اندازه گیری‌های تجربی، بیشترین جابجایی لوله در این نقطه اتفاق می‌افتد.



شکل ۳- Job case مدلسازی شده در نرم افزار CAESAR II

۱-۲- تحلیل دینامیکی

در منوی ورودی اطلاعات تحلیل دینامیکی، مقادیر دامنه جابجایی اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه ارتعاش سنج وارد شود. میزان این جابجایی‌ها بترتیب ۰/۷۲ و ۰/۲۷ میلی‌متر در راستای صفحات افقی و عمودی لوله و در فرکانس ۲۵ هرتز است که در گره ۵۵ وارد می‌شود. بعد تکمیل اطلاعات ورودی و ذخیره آن، مدل تحت پروسه بررسی خطا قرار می‌گیرد. سپس بر اساس نوع تحلیل انتخابی، می‌توان مدلسازی را ادامه داد. کد استفاده شده در تحلیل ASME B 31.1 می‌باشد.

۱-۱-۲- تحلیل هارمونیک

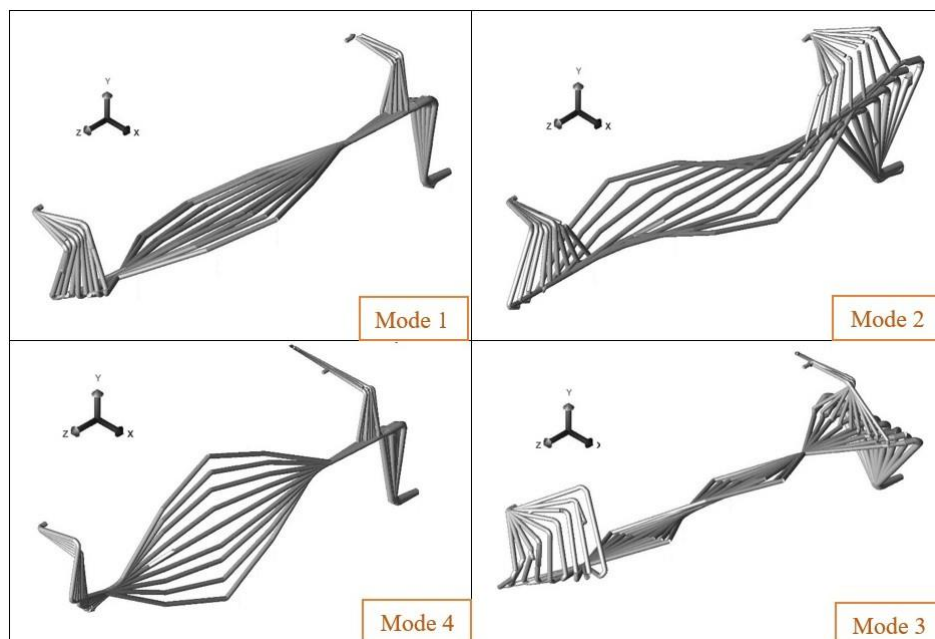
در نرم افزار هر فرکانس اجباری لیست شده در ورودی تحلیل دینامیکی، یک تحلیل جداگانه انجام می‌شود. نتایج تحلیل هارمونیک در تحریک ۲۵ هرتز نشان می‌دهد بیشترین تنش خمشی و تنش پیچشی به ترتیب در گره‌های ۶۰ و ۱۰ و برابر با ۶۸۵۵/۷ و ۱۴۱۴/۷ کیلو پاسگال می‌باشد که این سطح از تنش نسبت به نتایج تحلیل استاتیکی افزایش چشمگیری داشته است.

۲-۱-۲- تحلیل مودال

در تحلیل مودال هیچ باری وجود ندارد و فرکانسهای طبیعی، شکل مودهای ارتعاشی، جرم بی بعد شده و مودشیپها استخراج می‌شود. هر مود سیستم با یک شکل مود و یک فرکانس مرتبط می‌شود. در جدول ۲ و شکل ۲ بترتیب فرکانسهای طبیعی و نمای متحرک مربوط به شکل مودهای چهار فرکانس اول نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، با توجه به فرکانس اندازه گیری شده و شکل مودها، مود غالب در ارتعاشات سیستم مورد مطالعه، مود اول می‌باشد.

جدول ۱- فرکانسهای طبیعی سیستم

Mode	Frequency (Hz)	Frequency (rad/s)	Period (s)
1	25.239	158.581	0.040
2	27.501	172.795	0.036
3	30.235	189.970	0.033
4	58.650	368.511	0.017

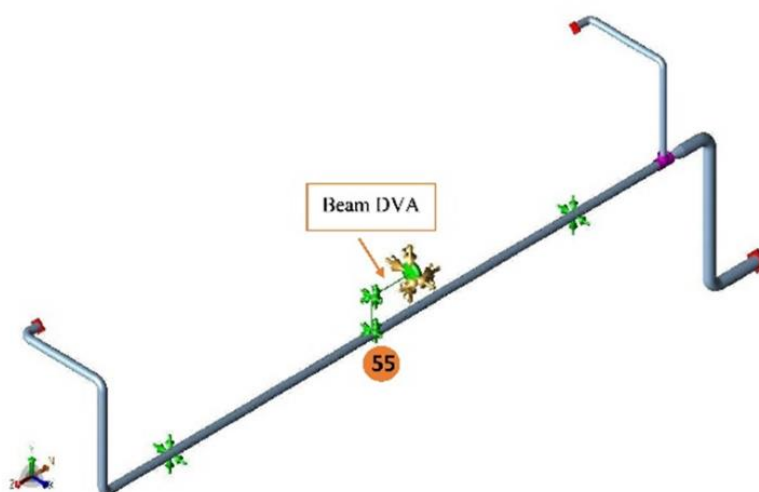


شکل ۴- مود شیپ‌های سیستم

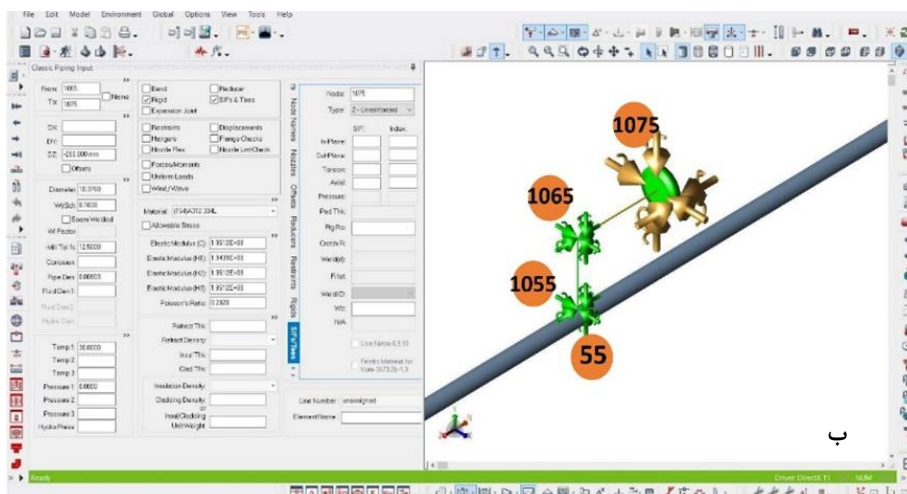
۳- مدل‌سازی دینامیکی سیستم و beam DVA با نرم افزار CAESAR II

یکی از مزایای استفاده از جاذب ارتعاش در سیستمهای لوله‌کشی این است که هیچ گونه تغییری در لوله‌ها، تکیه‌گاهها و چیدمان آنها ایجاد نمی‌گردد. beam DVA پیشنهادی وسیله‌ایست شامل یک میله L شکل که در انتهای آن جرم متمرکز افزوده شده است و می‌تواند در هر دو جهت افقی و عمودی حرکت کند و انرژی جنبشی در لوله را مستهلک نماید. جهت تعیین بهینه مشخصات جاذب، سیستم مجهز به جاذب با اعمال شرایط مرزی مناسب در نرم افزار CAESAR II مدل می‌شود.

beam DVA در گره ۵۵ و در میانه دو تکیه‌گاه لوله که بیشترین جابجایی سیستم وجود دارد مدلسازی می‌شود. همانطور که در شکل ۵ مشخص است مدلسازی از گره ۵۵ آغاز می‌شود. المان از گره شماره ۵۵ تا ۱۰۵۵ با شرایط سیال داخل لوله مدل می‌گردد. المان ۱۰۵۵ تا ۱۰۶۵ با شرایط مرزی مناسب و مشخصات محیط مدل می‌شود. طول این المان باید به اندازه‌ای انتخاب گردد که در اثر جابجایی عمودی، جرم متمرکز به سطح لوله برخورد نماید. فاصله گره ۱۰۶۵ تا ۱۰۷۵ طول تیر است که یکی از پارامترهای مهم در طراحی و تنظیم beam DVA می‌باشد. این المان با شرایط مرزی مناسب و مشخصات محیط مدل می‌شود و در نهایت جرم متمرکز در گره ۱۰۷۵ قرار می‌گیرد. در تمامی گره‌ها، فاکتور شدت افزایش تنش SIF فعال می‌گردد.



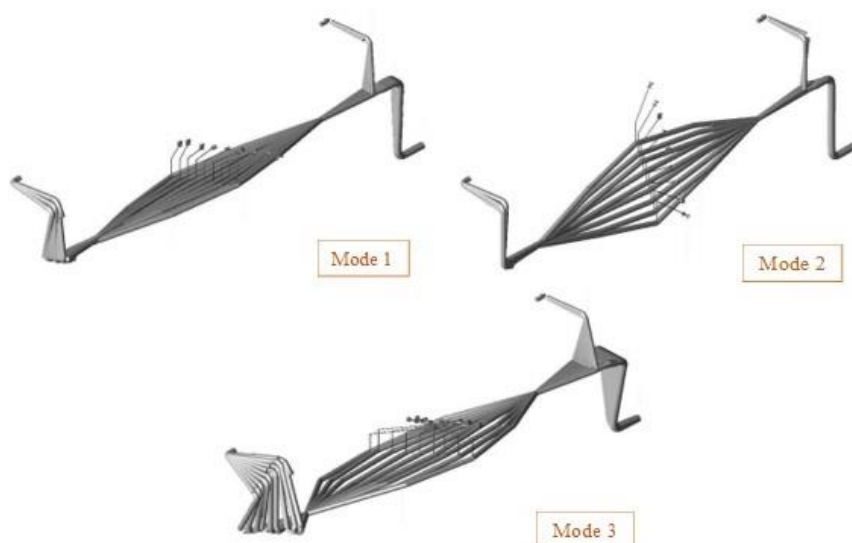
الف



ب

شکل ۵- مدلسازی در CAESAR II : الف) سیستم لوله‌کشی با beam DVA ب) beam DVA

سه فرکانسهای طبیعی اول سیستم لوله‌کشی با beam DVA عبارتند: از ۱۴/۹، ۱۶/۲، ۴۱/۵ هرتز و نمای متحرک شکل موده‌های مربوطه در شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است.

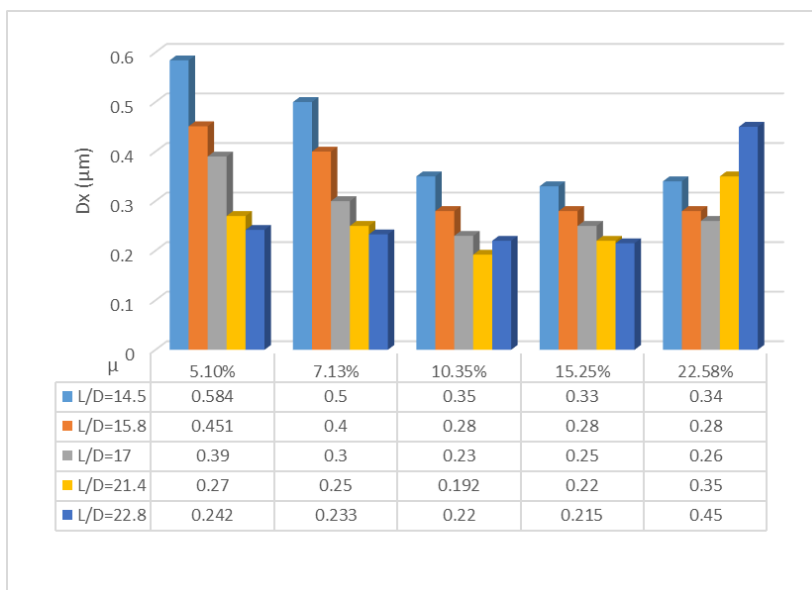


شکل ۶- مود شیپ‌های سیستم با beam DVA

۴- طراحی beam DVA

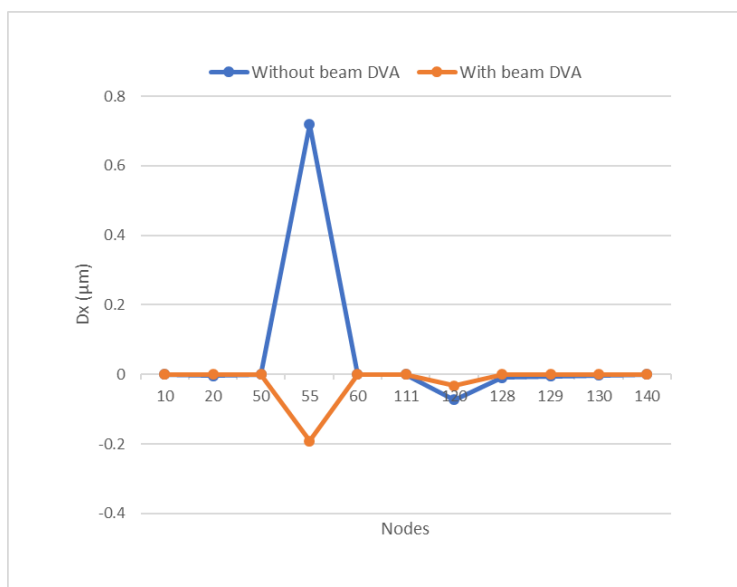
در تحلیل هارمونیک هدف استخراج پارامترهای بهینه جاذب است بطوری که جابجایی در گره ۵۵ در راستای x حداقل گردد. ابتدا مطابق استاندارد VDI 3833 part2 نسبت فرکانس طبیعی جاذب به فرکانس طبیعی لوله از رابطه $\frac{w_R}{w_T} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$ انتخاب می‌شود جایی که w_T و w_R بترتیب فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی جاذب می‌باشد. جنس تیر مطابق استاندارد ASTM A193 Gr.B7 در نظر گرفته می‌شود و از مقادیر جرم متمرکز ۱/۲۵ و ۱/۷۵ کیلوگرم استفاده می‌شود. در نهایت با تغییر در نسبت طول تیر به قطر آن (L/D) و میزان جرم متمرکز، ماکزیمم تنشها و جابجاییها در سیستم لوله کشی ثبت می‌گردد.

در نتیجه اجزای متفاوت، مقادیر دامنه جابجایی نقطه ۵۵ در راستای محور x با تغییر نسبت جرم و نسبت L/D جاذب ارتعاش در نمودار شکل ۷ ارائه می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش جرم متمرکز و نسبت L/D میزان جابجایی در لوله کاهش می‌یابد ولی این موضوع در نسبت جرم ۲۲/۵۸ صادق نیست. این می‌تواند به این دلیل باشد که در این نسبت جرم، جهت رسیدن به L/D های مناسب بطوریکه فرکانس تنظیم برآورده شود، طول تیر باید بسیار بلند شود لذا اثرات غیرخطی در سیستم و وجود اینرسی بالای جرم باعث افزایش جابجایی در لوله می‌شود. در نتیجه نمی‌توان عنوان کرد هر چه نسبت جرم و L/D بالاتر رود عملکرد جاذب بهتر می‌شود لذا تعیین دقیق مشخصات بهینه beam DVA بسته به مشخصات فیزیکی سیستم و خصوصیات ارتعاشات متغیر می‌باشد و برای هر سیستم خاص بایستی مدلسازی انجام گردد. همانطور که در شکل ۷ مشخص است استفاده از جاذب با مشخصات نسبت جرم ۱۰/۳۵ و $L/D = ۲۱/۴$ کمترین جابجایی را در سیستم بوجود می‌آورد.



شکل ۷- جابجایی گره ۵۵ برای L/D و نسبت جرمهای متفاوت

لذا مشخصات بهینه beam DVA از نتایج مدلسازی بدین ترتیب استخراج می‌گردد: جرم متمرکز ۲/۵۱ کیلوگرم، طول تیر ۳۹/۶ سانتیمتر و قطر تیر ۱/۷۵ سانتیمتر. شکل ۸ مقادیر جابجایی در نقاط مختلف لوله و در راستای محور x قبل و بعد از نصب beam DVA بهینه را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است جابجایی لوله در گره ۵۵ از ۰/۷۲ به ۰/۱۹۲ میلیمتر کاهش پیدا کرده است.

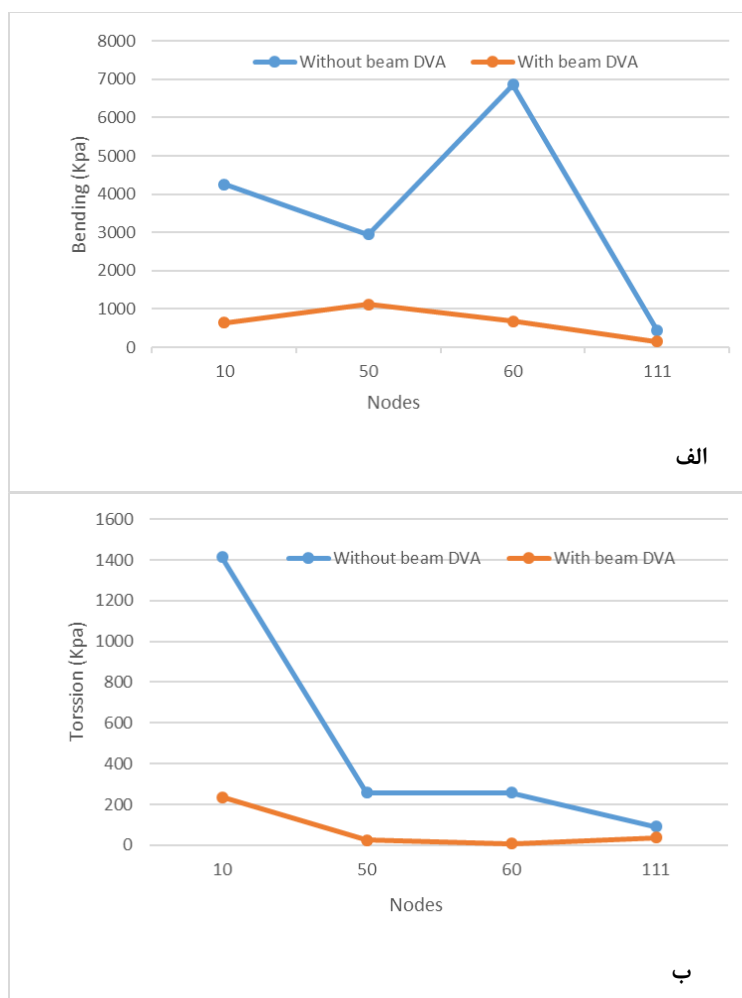


شکل ۸- جابجایی لوله در تحلیل دینامیکی قبل و بعد beam DVA بهینه

۴-۱- ارزیابی تنش

بعد از بررسی جابجایی‌ها در لوله بایستی مقادیر تنش در نقاط حساس سیستم نیز بررسی شود. نیروها و تنشهای وارد بر فلنچ‌های یاتاقان بسیار حائز اهمیت است. در صورتی که تنش‌هایی بیشتر از حد مجاز بر آنها وارد شود سیستم

دچار نشتی روغن می‌شود و در صورت ادامه حتی می‌تواند منجر به شکست پیچ‌های فلنج‌ها گردد. بالا بودن میزان تنشها در تکیه‌گاهها نیز می‌تواند منجر به آسیب به سیستم و خسارت گردد. در نمودارهای شکل ۹ تاثیر نصب جاذب بر کاهش تنشهای خمشی و پیچشی در فلنج‌ها و تکیه‌گاهها قبل و بعد نصب آورده شده است. بیشترین تنش خمشی قبل نصب در تکیه‌گاه شماره ۶۰ بمیزان ۶۸۵۵/۷ کیلو پاسگال بوده که با نصب جاذب به ۶۷۵/۸ کیلو پاسگال کاهش پیدا کرده است از طرفی بیشترین تنش پیچشی در فلنج شماره ۱۰ بمیزان ۱۴۱۴/۵ کیلو پاسگال بوده که با نصب جاذب به ۲۳۵/۳ کیلو پاسگال کاهش پیدا کرده است.



شکل ۹- تغییرات تنش قبل و بعد beam DVA بهینه الف) تنش خمشی ب) تنش پیچشی

اساس کار در جاذب‌های ارتعاش، انتقال انرژی هدفمند، یکطرفه و برگشت ناپذیر از سازه اصلی به جاذب ارتعاش است بطوری که انرژی ارتعاش تلف گردد. نمای متحرک سیستم مورد مطالعه وقتی beam DVA بهینه در آن نصب می‌گردد، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است جابجایی لوله در گره شماره ۵۵ که تحت جابجایی ۰/۷۲ میلیمتر قرار داشت با نصب جاذب ارتعاش بهینه بسیار ناچیز شده است و انرژی ارتعاش توسط جرم متمرکز beam DVA در صفحه افقی مستهلک می‌شود.

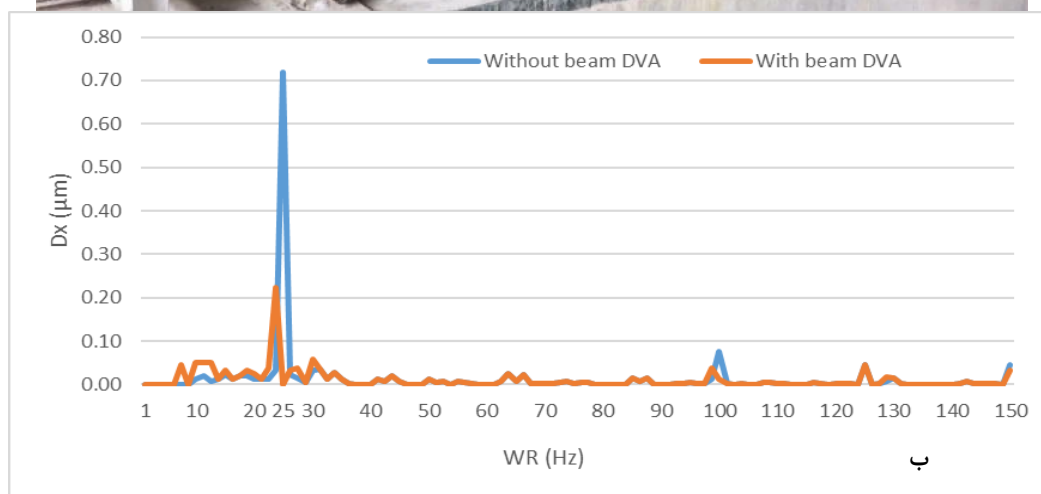


شکل ۱۰- نمای متحرک سیستم با beam DVA بهینه

۴- آزمایش تجربی

جهت اطمینان از صحت و دقت نتایج مدلسازی، مقرر گردید beam DVA بصورت تجربی در سیستم واقعی مورد آزمایش قرار گیرد. هر چند انجام آزمایشات عملی در واحدهای عملیاتی و بر روی خطوط لوله حامل سیال به دلیل نیاز به مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها و نیز نگرانی‌های ایمنی بسیار مشکل می‌باشد لذا با همکاری بعمل آمده مجوزهای مربوطه اخذ گردید.

ابتدا beam DVA بهینه مطابق ابعاد و مشخصات بدست آمده در بخش ۴ ساخته و سپس در میانه حد فاصل تکیه‌گاهها (گره ۵۵) مطابق شکل ۱۱ (الف) نصب شد. سپس اندازه‌گیری سطوح ارتعاشات توسط ارتعاش سنج پرتابل انجام گردید. نمودار جابجایی لوله در صفحه افقی بر حسب فرکانس که در شکل ۱۱ (ب) نشان داده شده است مستقیماً از داده‌های بدست آمده از ارتعاش سنج قبل و بعد از نصب جاذب ارتعاش ترسیم گردیده است. همانطور که از نمودار مشخص است، جابجایی لوله بعد نصب beam DVA، $0/223$ میلیمتر ثبت گردیده است بعبارتی کاهش دامنه جابجایی لوله با نصب جاذب ارتعاش در سیستم واقعی کاهش 69% را نشان می‌دهد. لذا نتایج آزمایش تجربی در مقایسه با کاهش دامنه جابجایی 73% که از نتایج مدلسازی بدست آمده بود تطابق قابل قبولی دارد.



شکل ۱۱- الف) نصب beam DVA بهینه بر روی لوله ب) نمودار جابجایی گره ۵۵ بر حسب فرکانس در اندازه گیری تجربی قبل و بعد نصب beam DVA

۴- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر استفاده از جاذب‌های ارتعاش بعنوان یک روش کلاسیک مهندسی در کنترل ارتعاشات بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. جاذب‌های ارتعاش در صورت طراحی مناسب می‌توانند بدون هیچ گونه تغییر در سیستم، سطح ارتعاشات را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. در این مقاله، تیریکسرگیردار با جرم متمرکز در انتها بعنوان جاذب ارتعاش در سیستم‌های لوله‌کشی پیشنهاد گردید. beam DVA به دلیل داشتن پارامترهای متعددی نظیر: میزان جرم متمرکز در انتهای تیر، شکل هندسی و ابعاد تیر، طول تیر، جنس تیر، محل نصب جاذب و ... دارای قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی هستند. جهت طراحی پارامترهای beam DVA در یک سیستم لوله‌کشی واقعی که خارج از محدوده مجاز ارتعاش داشت از استاندارد VDI 3833 part2 و مدل‌سازی سیستم با نرم افزار CAESAR II استفاده گردید. نتایج مدل‌سازی نشان داد در صورت استفاده از beam DVA بهینه، ماکزیمم دامنه جابجایی لوله به میزان ۷۳٪ کاهش پیدا می‌نماید. جهت صحت‌گذاری بر نتایج مدل‌سازی، ساخت و نصب beam DVA

انجام گردید. مطابق اندازه گیری‌های تجربی، ماکزیمم جابجایی لوله ۶۹٪ کاهش داشت که تطابق قابل قبولی با نتایج مدلسازی را نشان می‌دهد.

در نهایت استفاده از beam DVA بعنوان راه حل قابل اعتماد و طولانی مدت برای کنترل و کاهش ارتعاشات نامطلوب در سیستمهای لوله‌کشی صنایع پیشنهاد می‌گردد. قابلیت تنظیم در فرکانس مورد نظر، عدم تغییر در سیستم لوله‌کشی و تکیه‌گاهها، نصب سریع و بدون اینکه تجهیزاتی از سرویس خارج شود از مزایای استفاده آن در سیستمهای لوله‌کشی می‌باشد.

۵- منابع

- [1] Energy Institute, Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework, 2nd ed., 2008.
- [2] G. B. Song, P. Zhang, L. Y. Li, M. Singla, D. Patil, H. N. Li., 2016. "Vibration Control of a Pipeline Structure Using Pounding Tuned Mass Damper," *American Society of Civil Engineers (ASCE), J. Eng. Mech*, Article ID04016031.
- [3] Seongkyu Chang, Weipeng Sun, Sung GookCho and Dookie Kim., 2016. "Vibration Control of Nuclear Power Plant Piping System Using Stockbridge Damper under Earthquakes," *Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations*; Vol. 2016, Article ID5014093.
- [4] Yap Huey Tyng, Ong Zhi Chao, Kong Keen Kuan, Zubaidah Ismail, "Similitude Study of an in-Service Industrial Piping System under High Flow Induced Vibration", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Published by Springer. Vol. 31, pp. 3705-3713, 2018.
- [5] Mehrdad Shemshadi, Mahdi Karimi, Farzad Veysi, "A Simple Method to Design and Analyze Dynamic Vibration Absorber of Pipeline Structure Using Dimensional Analysis", *Journal of Shock and Vibration*, Vol. 202, 2018.
- [6] M. Jamuna, and K. Ramanathan., "Design and Analysis of Piping System with Supports Using CAESAR-II," *International Journal of Computer and Systems Engineering*, 10(5), pp. 980-984, 2016
- [7] Bhagwat B. Kedar, and Jayshri S. Gulave., "Mitigations to Flow Induced Vibration (FIV) in Control Valve Piping System using Visco-Elastic Damper & Neoprene pads, *International Journal of Science Technology & Engineering*, 3(7), pp. 40-46, 2017.
- [8] Anestis P. and MohamdI A., "Piping Evaluation of Flow Induced Vibrations using Harmonic Loads," *Proc. Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic, 2018.
- [9] Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf , VDI 3842:2004-6 Vibrations in piping systems, 2004.