

توسعه توابع شکنندگی دو متغیره برای سیستم‌های لوله در مجتمع‌های صنعتی

احسان قلیانی^۱، محمود حسینی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

از آنجایی که پالایشگاه یکی از ارکان‌های اساسی در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود، بررسی آسیب‌پذیری تجهیزات پالایشگاهی، شامل لوله‌ها، مخازن و ... در برابر عوامل تهدیدکننده از جمله حوادث طبیعی بسیاری حائز اهمیت است. این مساله بخصوص در کشور لرزه‌خیزی همچون ایران، از اهمیت مضاعفی برخوردار می‌باشد. در این پژوهش، یک مطالعه موردی با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قسمتی از سیستم لوله واحد آیزوماکس پالایشگاه تهران، انجام شده است. به این منظور در گام اول جمع‌آوری اطلاعات، کلیه نقشه‌های ایزومتریک مربوط به خطوط لوله در پالایشگاه، به منظور تعیین مشخصات مصالح، ابعاد هندسی و بارهای موجود گردآوری شده است. در گام دوم، خط لوله مورد نظر در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تحت بارگذاری‌های گرانث، فشار داخلی و با در نظر گرفتن اثر هر سه مولفه ۱۵۷ رکورد زلزله تحت تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی قرار گرفته است و در گام سوم با دریافت خروجی تنش بیشینه خط لوله، برای هر ۱۵۷ رکورد زلزله با بکارگیری روش تحلیلی، منحنی‌های شکنندگی تک متغیره ترسیم شده است بطوری که این منحنی‌ها احتمال خرابی سیستم لوله را با تغییر مقادیر شتاب و یا سرعت بیشینه به صورت جداگانه نشان می‌دهند. سرانجام، توابع شکنندگی دو متغیره (سطوح شکنندگی) نیز که احتمال خرابی سیستم لوله را با تغییر مقادیر شتاب و سرعت بیشینه به صورت همزمان نشان می‌دهد، ترسیم شده است. با این هدف، بیشینه تنش فون مایسز در سیستم لوله به عنوان شاخص خرابی استفاده شده و مطابق آیین‌نامه ASME، تنش مجاز به عنوان آستانه محاسبه احتمال فراگذشت در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از دو پارامتر زلزله در تهیه منحنی‌های شکنندگی، نتیجه قابل اطمینان‌تر و واقعی‌تری را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی بر روی سیستم لوله مورد بررسی نشان می‌دهد که دو قطعه زانویی در سیستم خط لوله مورد بررسی بیشترین آسیب را می‌بینند.

کلمات کلیدی: منحنی شکنندگی، توابع شکنندگی دو متغیره، سطوح شکنندگی، تحلیلی تاریخچه زمانی دینامیکی، واحد

آیزوماکس در پالایشگاه تهران

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2019.154421.1694	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.154421.1694	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۱۱/۲۶	۱۳۹۷/۱۱/۲۶	۱۳۹۷/۰۸/۰۹
محمود حسینی				*نویسنده مسئول:	
hosseini@iiees.ac.ir				پست الکترونیکی:	

Development of Two-Variable Fragility Functions for Piping Systems in Industrial Plants

Mahmood Hosseini^{*1}, Ehsan Ghalyani²

1 Associate professor, Structural Engineering Research Centre, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

2 Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Structural Engineering Group, Islamic Azad University, Tehran South Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

Regarding that refineries are essential facilities in oil and gas industries, evaluation of their equipment's vulnerability, including piping systems, tanks and ... subjected to natural hazards is of great importance. This issue is more crucial in Iran as a highly seismic country. In this research a case study has been carried out with the aim of seismic evaluation of a part of piping system of Isomax unit of Tehran oil refinery. For this purpose, first all required information and drawing maps have been gathered to identify the materials' characteristics, geometry, and applied loadings. Then, the considered piping system has been modeled in ABAQUS finite element software, subjected to gravity, internal pressure and 3-component earthquake acceleration records of 157 earthquakes, by time history analyses (THA). In the third stage, by using the maximum von Mises stress in the piping system for all 157 cases of THA, the single-variable fragility curves, once by using PGA, and once more using PGV as the IM, have been developed. Finally, the two-variable fragility function (fragility surface) has been developed for the piping system. Results show that the two-variable fragility functions are much more reliable than single-variable ones. Results also show that the two knees in the piping system are the more vulnerable parts.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 October 2018

Revise Date: 06 February 2021

Accept Date: 15 February 2019

Keywords:

Fragility Curve, Two-variable Fragility Function, Fragility Surface, Time history Analyses, Isomax unit of Tehran refinery

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.154421.1694

*Corresponding author: Mahmood Hosseini
Email address: hosseini@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

با فرارگیری ایران بر روی کمربند آلپ - هیمالیا این کشور در قرون گذشته ۱۳۰ زمین لرزه به بزرگی ۷/۵ ریشتر و یا بیشتر را تحمل کرده است، همچنین در ۱۰۰ سال گذشته تلفات ناشی از زلزله حدود یک درصد از جمعیت جهان بوده، و این در حالی است که در همین مدت در ایران تلفات ناشی از زلزله ۶ درصد اعلام شده است. از طرفی، به این دلیل که اقتصاد کشور ایران، تا حد زیادی وابسته به صنعت نفت می‌باشد به نظر می‌رسد مسأله زلزله و بررسی آسیب‌پذیری سازه‌ها در مورد پالایشگاه‌ها^۱، به عنوان یکی از اساسی‌ترین پایگاه‌های تولید فرآورده‌های نفتی از اهمیت مضاعفی برخوردار است. لرزه‌خیزی کشور ایران از یک سو و نفت‌خیز بودن کشور ایران از سوی دیگر، ضرورت مطالعه آسیب‌پذیری سازه‌های پالایشگاهی را بیش از پیش آشکار می‌کند.

آسیب‌دیدگی "پالایشگاه" ها در حین زلزله به دلیل آتش‌سوزی گسترده همواره تبعات جبران‌ناپذیر جانی، زیست محیطی و اقتصادی را در پی خواهد داشت. از جمله خسارت‌های گسترده وارد شده به سیستم‌های پالایشگاهی در جهان، که در اثر وقوع زلزله رخ داده است را می‌توان به آسیب‌دیدگی ۱۸ میلیارد دلاری پالایشگاه Tupras در سال ۱۹۹۹ در زلزله Kocaeli به بزرگی ۷/۶ ریشتر در کشور ترکیه و منطقه صنعتی از میت اشاره نمود. زلزله Bhuj Gujarat هند به بزرگی ۷/۷ ریشتر در سال ۲۰۰۱، زلزله Tokachi-Oki ژاپن با بزرگی ۸/۳ ریشتر در سال ۲۰۰۳ و زلزله Honsho (Tohoko) ژاپن با بزرگی ۹ ریشتر در سال ۲۰۱۱ از دیگر مثال‌هایی است که منجر به آسیب گسترده مجتمع‌های صنعتی و پالایشگاهی شده است.

در دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه آسیب‌پذیری و بررسی رفتار لرزه‌ای خطوط لوله، مخازن، اتصالات و ... توسط محققانی همچون F.Paolacci، O.S.Bursi، Md.Shahin Reza و Anil Kumar انجام شده است. تعدادی از مهم‌ترین مطالعات انجام شده در این مورد به شرح زیر می‌باشد:

در سال ۲۰۱۰ توسط Krausmann و همکاران، اثر زلزله Wenchuan در ۲۱ می ۲۰۰۸ بر روی تاسیسات صنعتی از جمله سیستم لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه انواع آسیب‌های وارد به سیستم لوله، مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این آسیب‌ها در زلزله مورد نظر شامل: ۱. خرابی سیستم لوله به دلیل فرسودگی و اثر نیروهای زلزله ۲. شکست اتصالات فلنجی ۳. له شدگی لوله‌ها ناشی از سقوط آوار و یا سایر تجهیزات صنعتی ۴. آسیب دیدگی تکیه گاه‌ها ۵. شکست لوله به دلیل وجود اتصالات صلب، می‌باشند [۱].

در سال ۲۰۱۳ توسط Fu و همکاران، شکنندگی لرزه‌ای سیستم‌های لوله‌کشی تاسیسات انتقال حرارت راکتور هسته‌ای در کشور چین با هدف معرفی مفهوم شکنندگی لرزه‌ای، شرح مدل تحلیل شکنندگی لرزه‌ای و تاکید بر جایگاه پارامترها در فرآیند تولید منحنی شکنندگی^۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، سیستم لوله‌کشی تاسیسات انتقال حرارات راکتور سریع چین در برابر بارهای زلزله دارای ظرفیت بالایی است [۲].

در سال ۲۰۱۳ توسط Lanzano و همکاران، آسیب‌پذیری خطوط لوله انتقال گاز در برابر بارهای لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. در مجموع از بین ۴۰ زلزله مورد بررسی، اطلاعات مربوط به ۲۲ زلزله که در آنها خطوط لوله متحمل خسارات جدی شده بود به عنوان داده‌های اولیه لرزه‌ای انتخاب شده است و تحلیل‌ها برای هر دو گروه از خطوط لوله شامل خطوط لوله انتقال و خطوط لوله توزیع پیگیری شده است. نتایج این مطالعه شامل منحنی‌های شکنندگی خط لوله توزیع و انتقال گاز، قابلیت استفاده به عنوان راهنما در دستورالعمل‌های ارزیابی لرزه‌ای تاسیسات صنعتی را دارد [۳].

در سال ۲۰۱۴ توسط Eshghi و Razzaghi ایمنی لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای نفت فاقد طراحی بر اساس دستورالعمل‌های عملکرد لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور ۷۵۰ مخزن ذخیره مایعات با در نظر گرفتن نسبت ارتفاع مخزن به قطر آن و میزان

¹ Refinery

² Fragility Curve

مایع نسبی درون مخزن جهت انجام تحلیل‌های لرزه‌ای و ترسیم منحنی‌های شکنندگی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مخازن بلند با نسبت ارتفاع به قطر بیش از $0/6$ در مقایسه با مخازن پهن با نسبت ارتفاع به قطر کمتر از $0/5$ آسیب پذیرتر می‌باشد. علاوه بر این برای تمامی حالات آسیب، مخازن با نسبت ارتفاع به قطر $0/3$ و $0/4$ بطور تقریبی شرایط یکسانی دارند [4].

در سال ۲۰۱۴ توسط Kumar, Reza و همکاران، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی اتصالات فلنجی^۳ پیچی تقویت شده لرزه‌ای انجام شده است. در این مطالعه دو اتصال فلنجی پیچی غیر استاندارد با ضخامت کمتر از حد، طراحی شده و بصورت تقویت شده لرزه‌ای تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای^۴ قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی عملکرد مناسب اتصالات پیشنهادی را تحت خمش، بار محوری و فشار داخلی از نظر ظرفیت نهایی، شکل پذیری و جذب انرژی نشان می‌دهد [5].

در سال ۲۰۱۴ توسط Gyu و همکاران، ارزیابی لرزه‌ای خطوط لوله نیروگاه‌های هسته‌ای با در نظر گرفتن اثر جداسازهای لرزه‌ای در این خطوط انجام شده است. به همین منظور، سیستم خط لوله مجهز به جداساز لرزه‌ای یک بار تحت تحلیل‌های عددی و بار دیگر تحت آزمایش شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مقایسه شده است و در نهایت با محاسبه مقادیر کرنش بیشینه، منحنی‌های شکنندگی براساس دو معیار PGA و PGD، توسعه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر انحراف معیار لگاریتم نرمال، برای هر دو معیار شدت زلزله، تطابق مناسبی دارد. همچنین در ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای سیستم‌های حساس به جابه‌جایی مانند جداسازهای بکار رفته در سیستم لوله تاسیسات هسته‌ای، استفاده از پارامتر حداکثر جابه‌جایی نسبی در برآورد شکنندگی لرزه‌ای این سیستم‌ها مفید می‌باشد [6].

در سال ۲۰۱۵ توسط Ju و Gupta بخشی از سیستم خط لوله اطفاء حریق یک بیمارستان جهت ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای تجهیزات بکار رفته در خط لوله به ویژه اتصالات سه‌راهی^۵، با در نظر گرفتن چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول منحنی‌های شکنندگی برای خط لوله دارای فقط یک اتصال سه‌راهی به دست آمده است. منحنی‌های شکنندگی در حالت دوم در وضعیتی استخراج گردیده که یک عامل غیرخطی ثانویه یعنی یک اتصال سه‌راهی دیگری به سیستم خط لوله افزوده شده است. در حالت سوم آسیب‌پذیری خط لوله‌ی شامل اتصال سه‌راهی در حالت اول با فرض رفتار خطی و با وجود یک عامل تقویت کننده مورد ارزیابی قرار گرفته است و در حالت نهایی سیستم خط لوله مورد بررسی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و با وضعیت بارگذاری یکطرفه^۶ یکنواخت مقایسه شده است [7].

در سال ۲۰۱۶ توسط Salimi Firoozabad و همکاران، آسیب‌پذیری لرزه‌ای بخشی از خط لوله بخار راکتور نیروگاه برق (APR1400)، مورد مطالعه قرار گرفته است، با هدف بررسی آسیب‌پذیری خط لوله مورد بررسی، تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی با در نظر گرفتن ۲۰ رکورد زلزله انجام شده و نتایج بیشینه تنش به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم خط لوله مذکور، زانویی بیشترین احتمال خرابی را دارد و به همین منظور برای اتصال زانویی بحرانی، منحنی‌های شکنندگی براساس دو معیار PGA^۷ و حداکثر تغییر مکان نسبی زمین (MDR)^۸ توسعه داده شده است [8].

در سال ۲۰۱۶ توسط Paolucci و همکاران، آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن فولادی حاوی نفت به منظور تولید منحنی‌های شکنندگی با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. دو روش تحلیل ابری^۹ و تحلیل دینامیکی افزایشی^{۱۰} برای تولید منحنی‌های

³ Flange

⁴ Cyclic Loading

⁵ Tee Joint

⁶ Monotonic Loading

⁷ Peak Ground Acceleration

⁸ Maximum Relative Displacement

⁹ Cloud Analysis

¹⁰ incremental dynamic analysis

شکندگی دو مخزن بکار گرفته شده است. یکی از مخازن دارای ساختار باریک و سقف ثابت بوده که به صورت مهار شده بر روی پی بتنی قرار گرفته است. قطر این مخزن ۸ متر و ارتفاع آن ۱۴ متر می‌باشد و گنجایش ذخیره ۷۰۰ متر مکعب، آب را دارد، ضخامت پوسته مخزن به صورت یکنواخت از بالا تا پایین ۶ میلی متر بوده و ضخامت کف و صفحه حلقوی واقع در محل اتصال پوسته به کف ۸ میلی متر می‌باشد. به منظور تعیین منحنی‌های شکندگی، با در نظر گرفتن ۲۰ رکورد زلزله، سه مود خرابی عمده در مخازن شامل کمانش پافیلی^{۱۱} در پوسته (برای هردو مخزن)، آسیب‌های مربوط به گردش سقف ثابت (برای مخازن بلند با سقف ثابت) و خرابی در ناحیه کف مخزن و صفحات زیرین پوسته در مخازن پهن، تعریف شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین آسیب در مخازن از نوع کمانش پافیلی می‌باشد. مقادیر حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که احتمال رخ داد کمانش پافیلی در دیواره مخزن در شتاب طیفی $0.16g$ برابر ۶۰ درصد بوده در حالیکه این رقم برای حالت حدی سقوط سقف، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد [۹].

در سال ۲۰۱۷ La Salandra، Ahmed، Bursi، Caprinuzzi و همکاران، آسیب‌پذیری لرزه‌ای سیستم‌های خط لوله پالایشگاه، به کمک مدل‌های شکندگی تک متغیره مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از پژوهش انجام شده توسعه منحنی‌های شکندگی برای خطوط لوله پالایشگاه به روش تحلیل ابری می‌باشد. به همین منظور بخشی از خط لوله موجود در یکی از تاسیسات پالایشگاهی واقع در شهر سیسیل در کشور ایتالیا به منظور ارزیابی لرزه‌ای انتخاب و تمامی تجهیزات مطابق با نقشه‌های اجرایی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. برای انجام تحلیل‌ها، مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله با در نظر گرفتن خطرپذیری منطقه و همچنین نوع خاک انتخاب شده و محاسبات احتمالاتی با در نظر گرفتن پارامترهای تقاضای مهندسی و مطابق با انتظاراتی که از نوع حالات خرابی در سیستم‌های خطوط لوله و سازه نگهدارنده آنها می‌رود، انجام شده است. در روند این بررسی، در مجموع چهار حالت حدی برای لوله‌ها، اتصالات پیچی^{۱۲}، سازه نگهدارنده و اتصالات زانوپی^{۱۳} در نظر گرفته شده و منحنی شکندگی برای این چهار حالت توسعه داده شده است. در نهایت نتایج تحلیل با مقادیر حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌های مربوط به طراحی خطوط لوله مانند ASME^{۱۴} مقایسه شده است [۱۰].

ملاحظه می‌گردد که در کلیه پژوهش‌های گذشته با اینکه به موضوع منحنی‌های شکندگی توجه شده، اما همواره از یک پارامتر و متغیر زلزله به عنوان شاخص خطر برای تهیه و توسعه این منحنی‌ها استفاده شده است، ولی تجارب تحقیقات مختلف نشان داده که استفاده از یک شاخص زلزله به تنهایی نمی‌تواند مبین آسیب‌رسانی زلزله به سیستم باشد. از آنجاییکه استفاده از یک متغیر زلزله در تهیه منحنی‌های شکندگی کافی نبوده و پراکندگی زیادی در داده‌های مبنای تهیه منحنی شکندگی وجود دارد، در سال‌های اخیر استفاده از چند متغیر زلزله به طور همزمان در تهیه این منحنی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. از جمله تحقیقات انجام شده در حوزه صنعت، می‌توان به ارزیابی آسیب‌پذیری پست‌های برق و توسعه منحنی‌های شکندگی با دو متغیر زلزله برای این تاسیسات توسط Zareei و همکاران [۱۱] اشاره کرد. در این پژوهش نیز سعی شده تا منحنی‌های شکندگی با بکارگیری دو پارامتر زلزله، یعنی PGA و PGV برای سیستم لوله تعمیم داده شود.

به همین منظور در این مطالعه، یک خط لوله، مربوط به بخش واحد آیزوماکس پالایشگاه تهران به صورت موردی انتخاب و پس از جمع‌آوری اطلاعات از نقشه‌ها، اطلاعات مربوط به جزئیات اتصالات و سایر قطعات شامل ابعاد هندسی، خصوصیات مصالح و ... در نرم‌افزار آباکوس^{۱۵} با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان بار وزن و فشار داخلی، تحت ۱۵۷ رکورد زلزله با شتاب بیشینه^{۱۶} 0.1 تا 0.6 برابر شتاب گرانش و سرعت بیشینه^{۱۷} 10 تا 60 سانتی متر بر ثانیه، مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا خط لوله مورد

¹¹ Elephant Foot Buckling

¹² Bolted flange joints

¹³ Elbow Joint

¹⁴ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

¹⁵ Abaqus

¹⁶ Peak Ground Acceleration

¹⁷ Peak Ground Velocity

نظر بصورت solid با مدلسازی کامل اتصالات فلنجی، زانویی و ولدولت^{۱۸} تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفته و نتیجه تحلیل فرکانسی با مدل wire مقایسه شده است، از آنجاییکه اختلاف چندان بین زمان تناوب دو سیستم لوله در دو حالت مدلسازی وجود نداشت ادامه روند تحلیل با مدل wire ادامه یافته است. در گام بعد، خروجی بیشینه تنش در نقاط بحرانی خط لوله مورد نظر استخراج شده و در نهایت برای نقاط مورد نظر با بکارگیری روش تحلیلی، منحنی شکنندگی تک متغیره ترسیم شده است. که در واقع این منحنی، احتمال خرابی نقطه بحرانی مورد نظر را به صورت تابعی از متغیر شتاب بیشینه و سرعت بیشینه زمین نشان می‌دهد. علاوه بر این برای نقاط بحرانی سطوح شکنندگی^{۱۹} با تشکیل توابع دو متغیره از احتمال خرابی وابسته به PGA و PGV ترسیم شده است.

در ادامه ابتدا پالایشگاه تهران و واحد مورد بررسی به طور مختصر معرفی و سپس مراحل مدلسازی و محاسبات انجام شده جهت تولید منحنی‌های شکنندگی به همراه نتایج ارائه می‌گردد.

۲- پالایشگاه تهران – واحد آیزوماکس

شرکت پالایش نفت تهران پس از پالایشگاه‌های نفت آبادان، اصفهان و بندرعباس، چهارمین پالایشگاه بزرگ نفت ایران از نظر پالایش روزانه نفت خام به شمار می‌رود. این شرکت در ۱۵ کیلومتری جنوب تهران در جاده قدیم قم، قبل از باقرشهر واقع گردیده و مشتمل بر دو پالایشگاه جنوبی و شمالی است. ظرفیت اولیه این پالایشگاه ۸۵۰۰۰ بشکه نفت خام در روز بود که با انجام تغییراتی در آن در سال ۱۳۵۵، ظرفیت آن به ۱۲۵۰۰۰ بشکه نفت خام در روز افزایش یافت. روند روبه رشد مصرف فرآورده‌های نفتی و ضرورت تامین نیازهای بازارهای داخلی، منجر به تاسیس و راه‌اندازی پالایشگاه دوم با ظرفیت تصفیه ۱۰۰۰۰۰ بشکه نفت خام در روز را در سال ۱۳۵۲ شد. در سال ۱۳۸۲ ظرفیت این پالایشگاه به ۱۲۵۰۰۰ بشکه در روز افزایش یافت. خوراک هر دو پالایشگاه از طریق دو خط لوله ۲۴ و ۲۶ اینچی از حوزه نفت مارون-شادگان، اهواز-آسماری، سراجه قم و منابع نفتی کشورهای آسیای میانه تامین می‌شود. پالایشگاه شمالی از سه قسمت منطقه (الف)، منطقه (ب) و منطقه ی تصفیه نفت سفید و گازوئیل تشکیل شده است. منطقه (الف) از پنج واحد تقطیر در جو^{۲۰}، واحد تقطیر در خلا^{۲۱}، واحد تهیه روغن، واحد غلظت شکن، واحد تهیه گاز مایع و همچنین منطقه (ب) از واحدهای آیزوماکس، تبدیل کاتالیستی^{۲۲} و واحد تهیه هیدروژن تشکیل شده است.

واحد آیزوماکس پالایشگاه تهران با قدمتی نزدیک به ۵۰ سال و با قابلیت دریافت خوراک ورودی به میزان ۱۵۰۰۰ بشکه نفت در روز، یکی از مهم‌ترین واحدهای موجود در این مجتمع صنعتی محسوب می‌شود. این واحد به دلیل دریافت ماده‌ی اولیه با کیفیت نامرغوب و تبدیل آن به مواد مفید و قابل استفاده‌ای همچون گاز مایع، بنزین خام مرغوب، بنزین خام سنگین، سوخت جت و ... از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

پالایشگاه تهران به عنوان یکی از مراکز مهم نه‌گانه پالایشگاهی ایران است، به دلیل قرارگیری این پالایشگاه بین دو گسل کهریزک و شهرری، خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد، آبرفتی بودن خاک منطقه و قدمت بالای تجهیزات، بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و تعیین احتمال خرابی تجهیزات پالایشگاه مذکور ضروری به نظر می‌رسد.

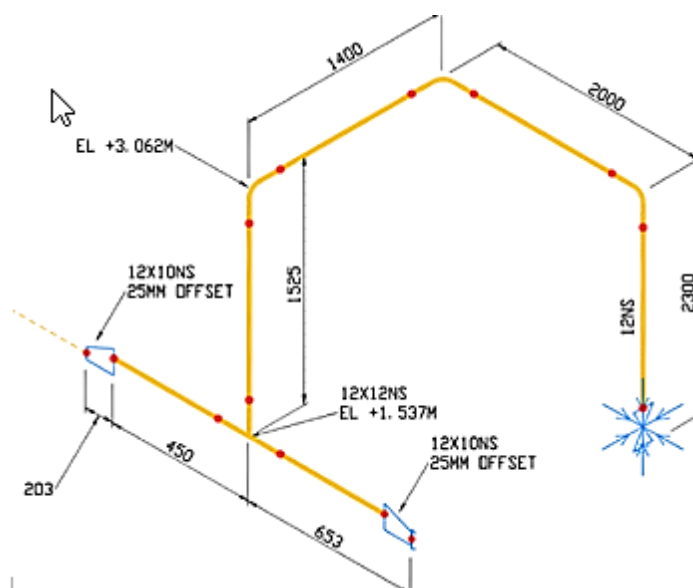
¹⁸ Weldolet

¹⁹ Fragility Surface

²⁰ Atmospheric Distillation Unit

²¹ Vacuum Distillation Unite

²² Cat Reformer Unite



شکل ۲: یک بخش از خط لوله مورد نظر با قطر ۱۲ اینچ (۳۰۴/۸ میلی متر)

جنس خط لوله مورد نظر، فولاد A335 در نظر گرفته شده است. جزییات مشخصات مصالح شامل جرم مخصوص، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، تنش تسلیم، تنش حد نهایی و کرنش حد نهایی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

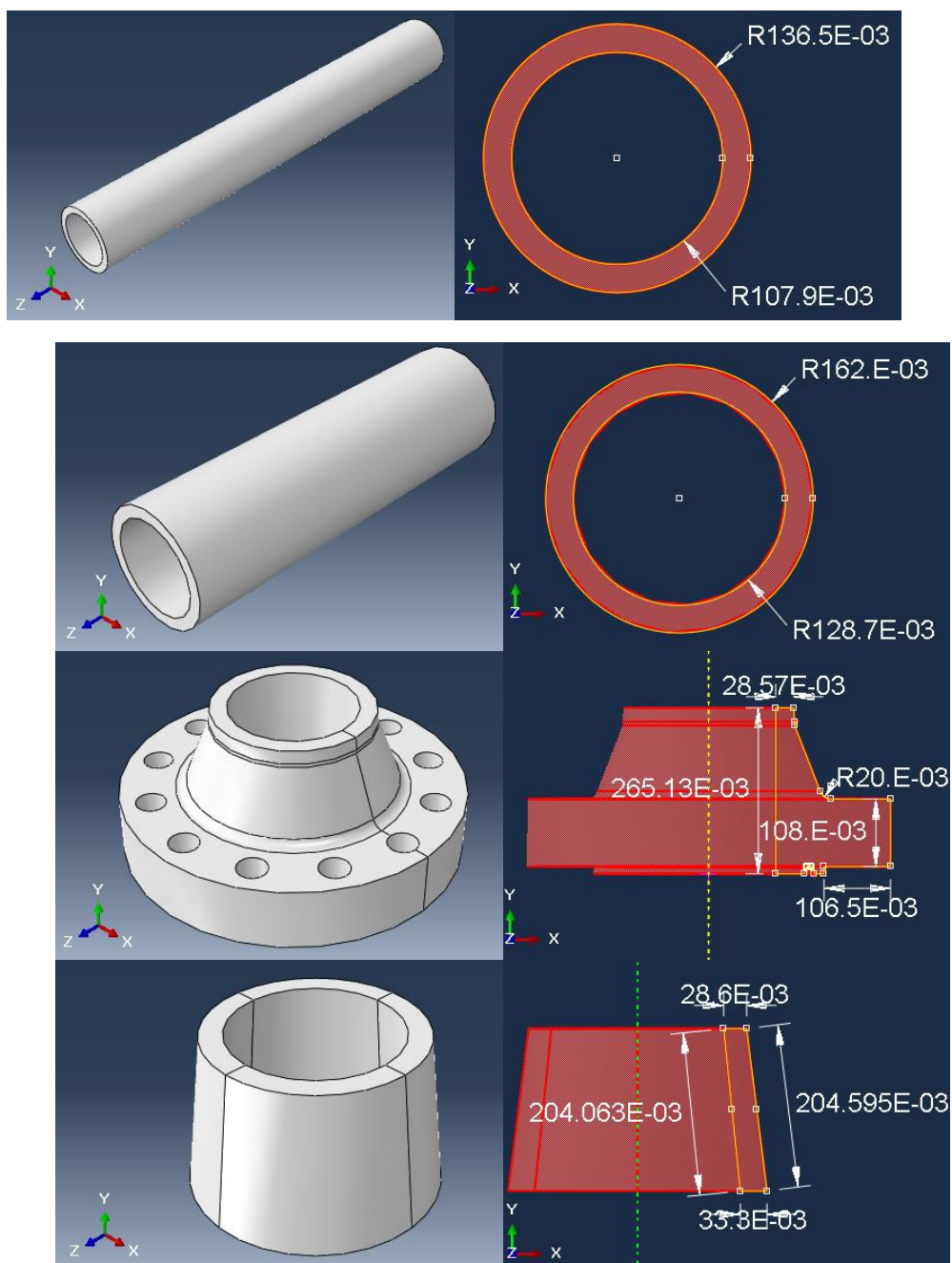
جدول ۱: مشخصات مصالح فولاد A335

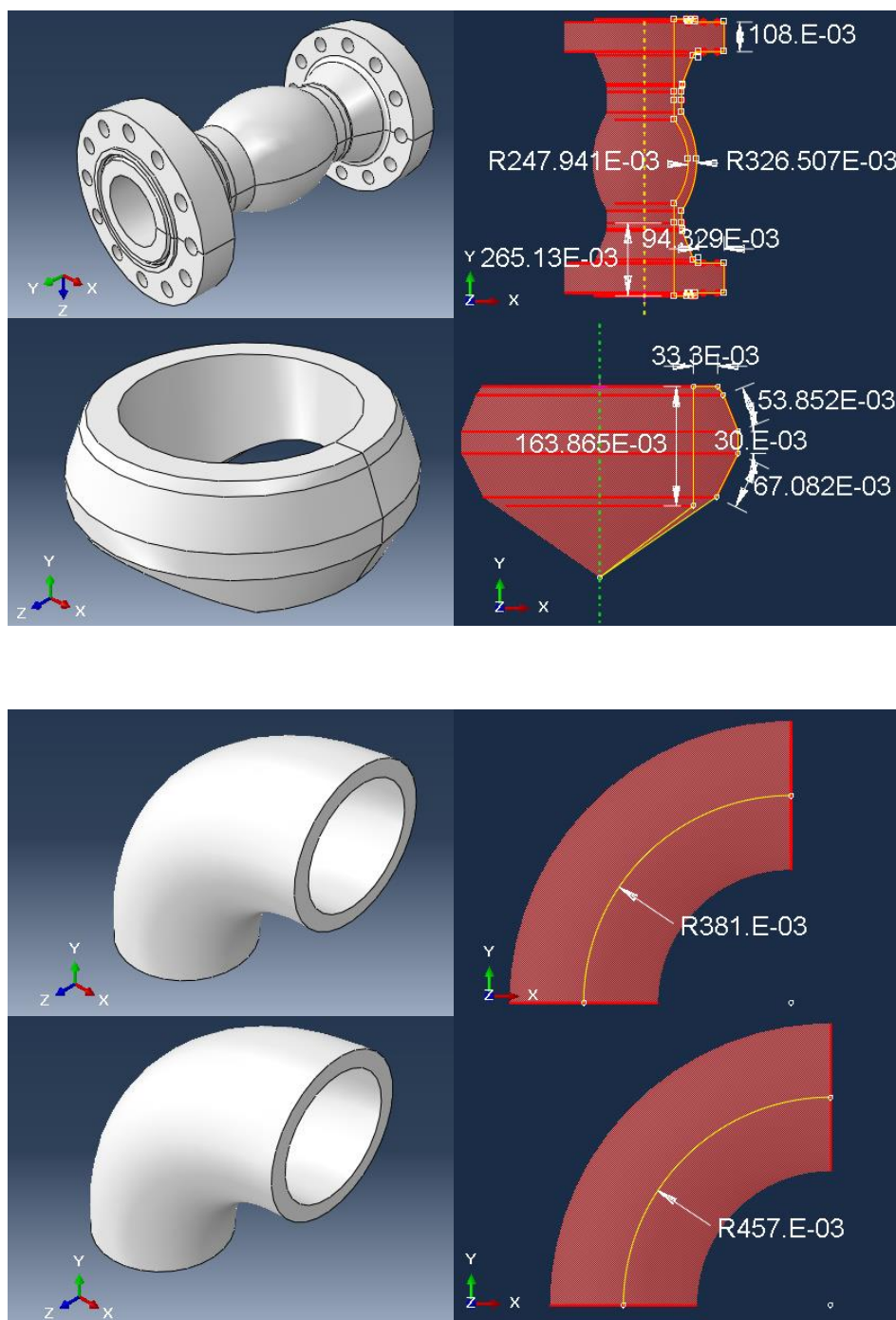
جرم مخصوص	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون	تنش تسلیم	تنش حد نهایی	کرنش حد نهایی
Kg/m ³	N/m ²		N/m ²	N/m ²	
7850	2.1E11	0.3	2.05E8	4.15E8	0.15

۳-۱- تحلیل فرکانسی خط لوله واحد آیزوماکس پالایشگاه تهران

۳-۱-۱- مدلسازی خط لوله با در نظر گرفتن المان Solid

در این بخش از مطالعه خط لوله مورد نظر به همراه تمامی اتصالات شامل زانویی، فلنج، ولدولت و ... با در نظر گرفتن المان Solid بصورت سه بعدی و شکل پذیر به طور کامل مدلسازی شده و تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفته است. کلیه بخش‌های در نظر گرفته شده به منظور مدلسازی با جزییات ابعاد هندسی در شکل ۳ قابل مشاهده است.

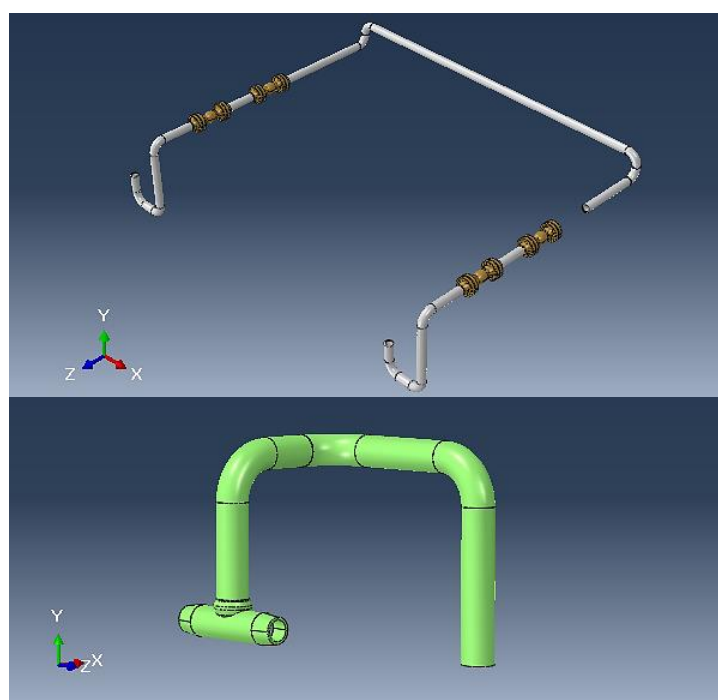
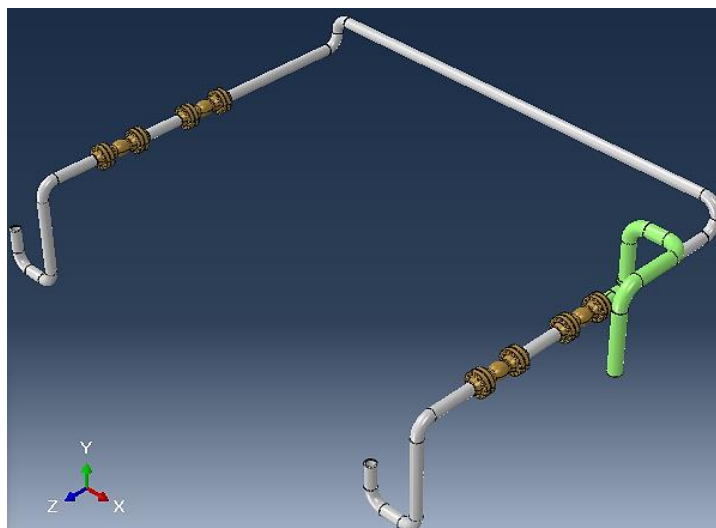




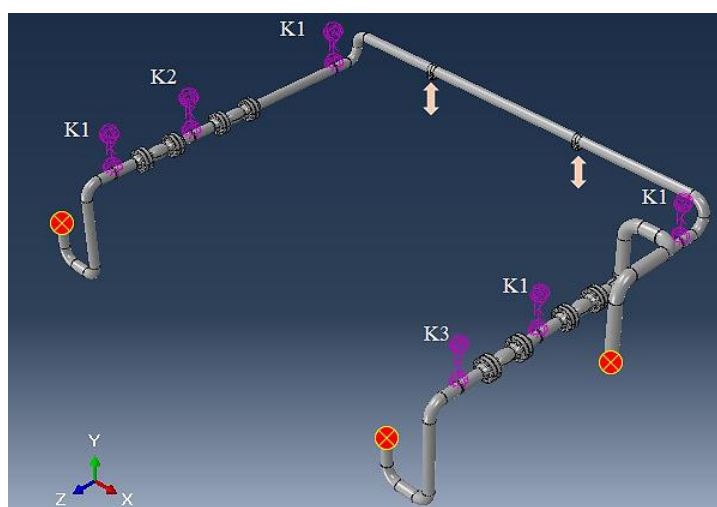
شکل ۳: بخش های مختلف خط لوله مورد نظر در مدل WELDOLET، VALVE، REDUCER، FLANGE، PIPE12in، PIPE10in-Solid و ELBOW12in و ELBOW10in

بعد از ساخت قطعات مختلف در نرم افزار Abaqus با ابعاد هندسی ذکر شده این قطعات مطابق نقشه مونتاژ شده است. شکل ۴ خط لوله مورد نظر را به همراه کلیه اتصالات مدلسازی شده با المان Solid نشان می دهد. محل قرارگیری تکیه گاه ها و فنرهای انبساطی در

شکل ۵ قابل مشاهده است. قابل ذکر است که تکیه‌گاه‌های گیردار با علامت دایره، تکیه‌گاه برشی با فلش دو سر جهت دار و فنرهای انبساطی با خطوط مشخص شده‌اند.



شکل ۴: مونتاژ قطعات خط لوله مورد نظر

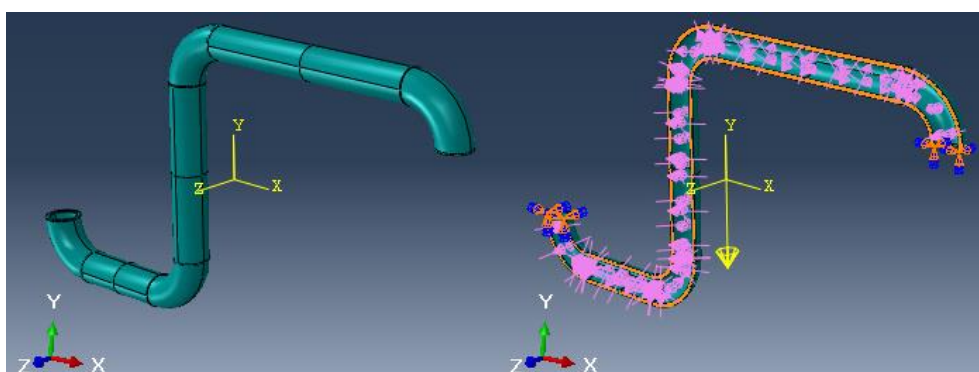


شکل ۵: تعریف قیود تکیه گاهی و فنرهای انبساطی

اندازه مش قطعات به منظور انجام تحلیل فرکانسی به روش اجزای محدود برای کلیه قطعات $0/05$ متر در نظر گرفته شده است. به منظور حصول اطمینان از نتایج به دست آمده اندازه مش مذکور مورد صحت سنجی قرار گرفته است. قابل ذکر است که نتایج بررسی اندازه مش در بخش صحت سنجی قابل مشاهده است. از طرفی مقادیر سختی فنرهای انبساطی برای فنرهای K_1 ، K_2 و K_3 مطابق با مقادیر ارائه شده در نقشه‌های اجرایی و مکانیکی، به ترتیب برابر 266600 ، 799900 و 133300 نیوتن بر متر می‌باشد.

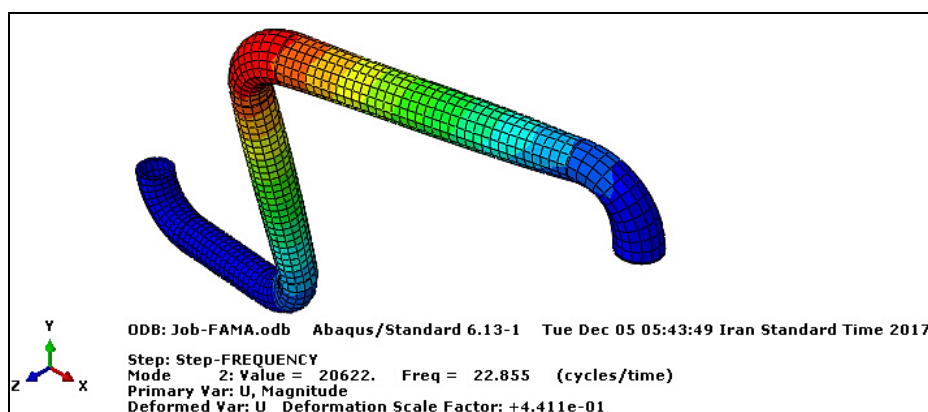
۳-۱-۱-۱- صحت‌سنجی اندازه مش خط لوله ساده با المان solid

به منظور دستیابی به یک اندازه مش مناسب برای مدل نهایی، تحلیل فرکانسی بر روی یک خط لوله ساده با در نظر گرفتن اثر وزن و فشار داخلی برای اندازه مش‌های مختلف صورت گرفته است. خط لوله ساده مورد نظر شامل سه لوله به قطر 10 اینچ و چهار زانویی می‌باشد. مصالح مصرفی مشابه جدول ۱ تعریف شده و تحلیل خط لوله در دو گام استاتیکی شامل اعمال وزن، اعمال فشار داخلی به مقدار $17/6$ مگاپاسکال و یک گام بصورت فرکانسی می‌باشد. در شکل ۶ نمایی از خط لوله ساده، شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری قابل مشاهده است.



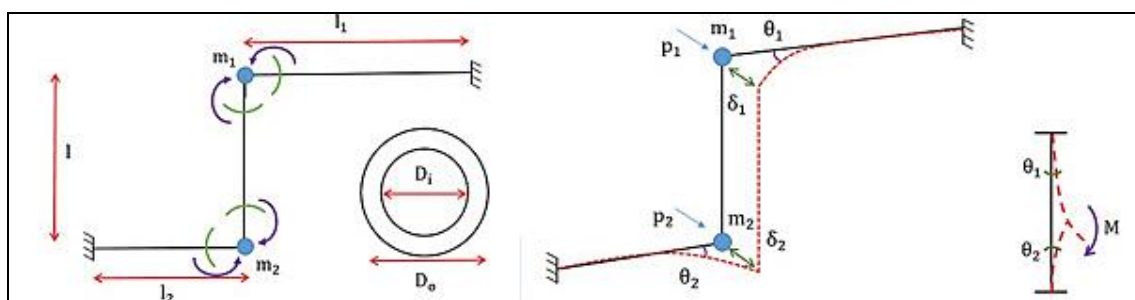
شکل ۶: خط لوله ساده و شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود مقدار فرکانس خط لوله ساده با اندازه مش $0/05$ مقدار $22/855$ هرتز می‌باشد.



شکل ۷: نتیجه تحلیل فرکانسی خط لوله برای مش ۰/۰۵

به همین ترتیب تحلیل فرکانسی با شرایط تحلیل مشابه، برای مدل خط لوله با اندازه مش‌هایی از ۰/۰۱ تا ۰/۱ پیگیری شده است. از طرفی فرکانس این خط لوله به روش رایلی محاسبه شده است. نتایج تحلیل فرکانسی با نرم‌افزار آباکوس و حل دستی به روش رایلی در جدول ۲ گردآوری شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، اندازه مش ۰/۰۵ به عنوان مقدار پیش فرض نرم افزار با درصد خطای ۶/۸۲ قابل قبول است. در ادامه روند محاسبه فرکانس خط لوله ساده به روش رایلی تشریح شده است. شکل لوله مورد بررسی به روش رایلی و پارامترهای مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: خط لوله مورد بررسی در حل دستی

$$I = \frac{\pi}{4} \left[\left(\frac{D_o}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^4 \right] \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (2)$$

$$\begin{cases} m_1 = \frac{L_1 + L}{2} \times A \times \rho \\ m_2 = \frac{L_2 + L}{2} \times A \times \rho \end{cases} \quad (3)$$

$$M = \frac{GJ}{L} (\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \frac{P_1 L_1^2}{2EI} - \frac{ML_1}{EI}, \quad \theta_2 = \frac{P_2 L_2^2}{2EI} - \frac{ML_2}{EI} \quad (5 \text{ و } 6)$$

$$M = \frac{GJ}{L} \left(\left(\frac{P_1 L_1^2}{2EI} - \frac{ML_1}{EI} \right) + \left(\frac{P_2 L_2^2}{2EI} - \frac{ML_2}{EI} \right) \right) = \frac{GJ}{L} \left[\frac{P_1 L_1^2 + P_2 L_2^2}{2EI} - \frac{M}{EI} (L_1 + L_2) \right]$$

$$\frac{ML}{GJ} = \frac{P_1 L_1^2 + P_2 L_2^2}{2EI} - \frac{M}{EI} (L_1 + L_2)$$

$$M \left(\frac{L}{GJ} + \frac{L_1 + L_2}{EI} \right) = \frac{P_1 L_1^2 + P_2 L_2^2}{2EI}$$

$$M = \frac{\frac{P_1 L_1^2 + P_2 L_2^2}{2EI}}{\frac{L}{GJ} + \frac{L_1 + L_2}{EI}} \quad (7)$$

$$\delta_1 = \frac{P_1 L_1^3}{3EI} - \frac{ML_1^2}{2EI}, \quad \delta_2 = \frac{P_2 L_2^3}{3EI} - \frac{ML_2^2}{2EI} \quad (8 \text{ و } 9)$$

$$\omega^2 = \frac{P_1 \delta_1 + P_2 \delta_2}{m_1 \delta_1^2 + m_2 \delta_2^2} \quad (10)$$

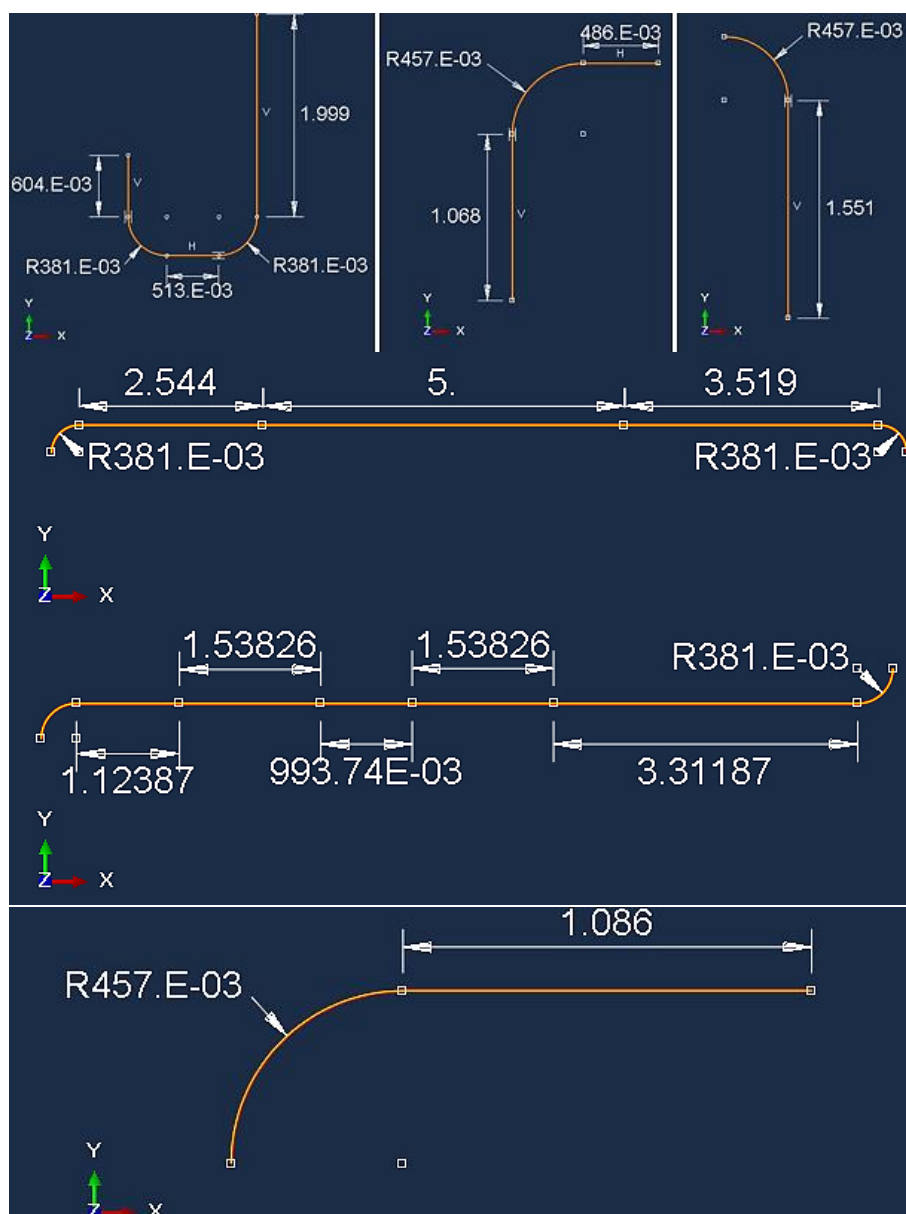
که در روابط بالا پارامترهای A, I, M, m, δ و ω به ترتیب معرف ممان اینرسی، سطح مقطع لوله، جرم، لنگر، طول، جابجایی و فرکانس طبیعی می‌باشند. مقدار فرکانس با محاسبه به روش رایلی برای خط لوله موردنظر مقدار $24/53$ هرتز به دست آمده است.

جدول ۲: نتایج تحلیل فرکانسی با نرم افزار آباکوس

اندازه مش (m)	مقادیر فرکانس	درصد خطا (%)
0/01	32/268	31/545
0/02	21/884	10/78
0/03	22/211	9/45
0/04	22/401	8/67
0/05	22/855	6/82
0/06	23/596	3/8
0/07	23/866	2/7
0/08	24/64	0/44
0/09	24/895	1/48
0/1	25/13	2/44

۳-۱-۲- مدلسازی خط لوله با در نظر گرفتن المان Wire

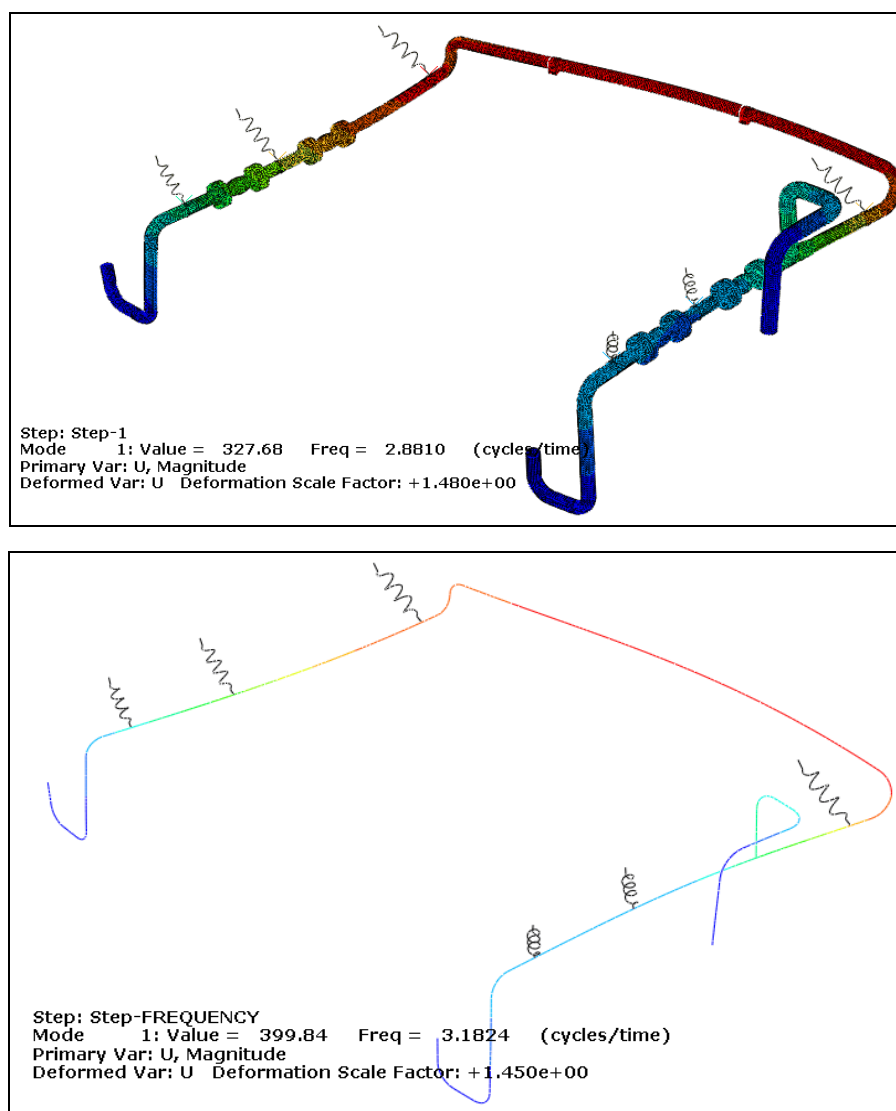
در این بخش از مطالعه به منظور کاهش سرعت تحلیل نرم افزار، خط لوله مورد نظر با نرم افزار آباکوس بصورت Wire با صرفه نظر کردن از جزییات اتصالات مدلسازی شده است. به این منظور خط لوله مورد نظر به شش بخش تقسیم بندی شده است. کلیه مشخصات اعم از ابعاد هندسی، خواص مصالح و شرایط قیود و تکیه‌گاه‌ها دقیقاً مشابه مدل Solid در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ شش بخش مختلف مدل Wire مشاهده می‌شود این شش بخش پس از مونتاژ تحت تحلیل فرکانس قرار گرفته است.



شکل ۹: بخش‌های مختلف مدل خط لوله بصورت Wire

۳-۱-۳- مقایسه نتایج تحلیل فرکانسی خط لوله مورد نظر در نرم افزار آباکوس با در نظر گرفتن المان Solid و Wire

در این مطالعه خط لوله مورد نظر در نرم افزار آباکوس تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۱۰ نتیجه تحلیل برای خط لوله با المان Solid فرکانس ۲/۸۸۱ هرتز و با المان Wire فرکانس ۳/۱۸۲۴ هرتز را نشان داده است. از آنجاییکه نتایج تحلیل فرکانسی در دو حالت Solid و Wire اختلاف چندانی ندارند ادامه روند محاسبات برای تحلیل تاریخچه زمانی و محاسبه تنش بیشینه با مدل Wire پیگیری می‌شود.

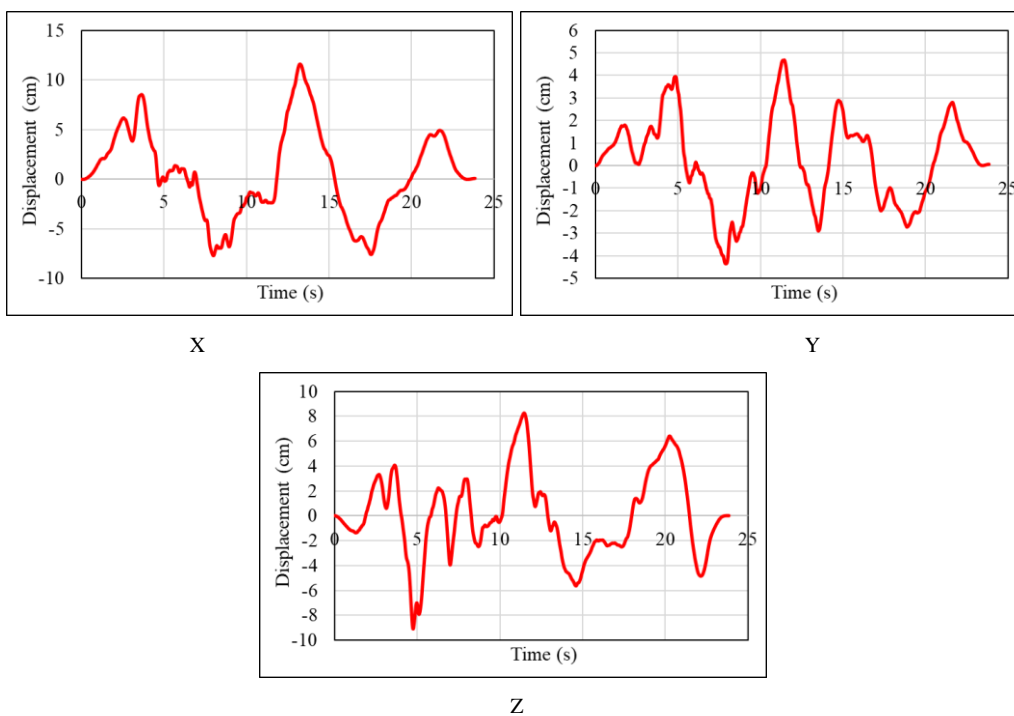


شکل ۱۰: نتیجه تحلیل فرکانسی با المان Wire و Solid

۲-۳- تحلیل تاریخچه زمانی

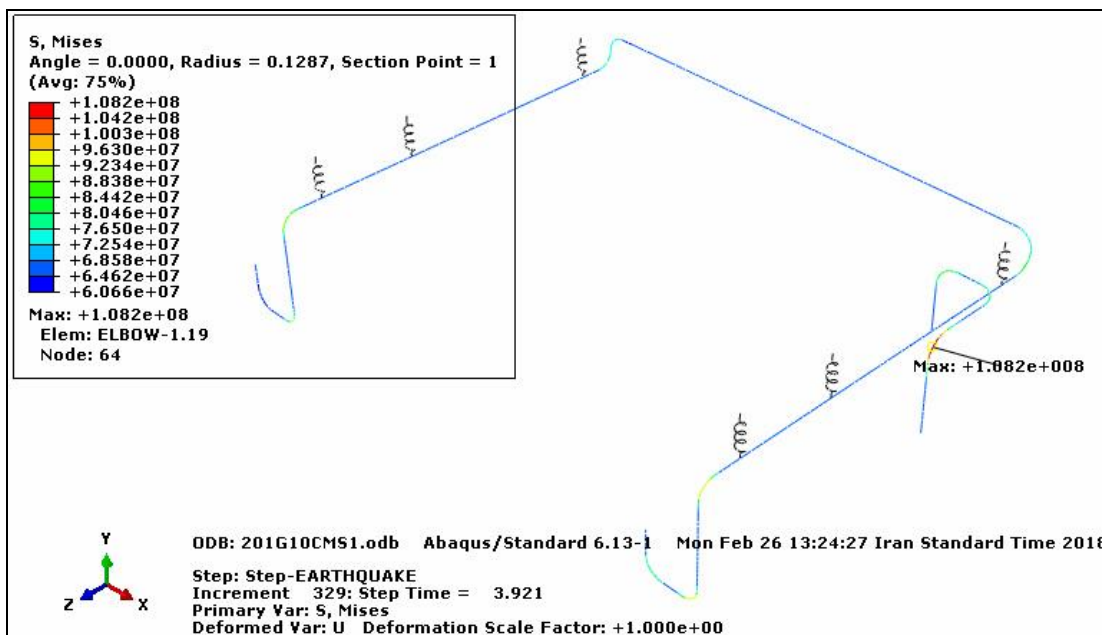
تحلیل تاریخچه زمانی در نرم افزار آباکوس برای مدل با المان Wire و با اعمال ۱۵۷ رکورد تغییر مکان زلزله و در نظر گرفتن اثر هر سه مولفه، به محل تکیه گاهها، انجام شده است. مراحل کار به این ترتیب است که ابتدا پس از ساخت قطعات و اختصاص مصالح، سه گام بارگذاری تعریف شده است بطوریکه در گام اول خط لوله مورد نظر تحت بار وزن خود قرار گرفته و در گام دوم فشار داخلی در خط لوله به مقدار ۱۷/۶ مگاپاسکال اعمال شده است و در گام نهایی رکورد تغییر مکان زلزله به محل تکیه گاهها اعمال شده است. از طرفی مقادیر تنش بیشینه استخراج شده و به عبارتی به ازای هر شتاب و سرعت بیشینه مربوط به زلزله، یک مقدار تنش بیشینه حاصل شده است.

در شکل ۱۱ یک نمونه از رکورد تغییر مکان مورد استفاده در تحلیلها نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: رکورد تغییر مکان زلزله طیس در جهت Z,Y,X با $PGA=0.4g$ و $PGV=30cm/s$

پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سیستم مورد نظر، مقدار تنش بیشینه مربوط به هر یک از تحلیل‌ها مشخص و براساس دسته‌بندی رکوردها با در نظر گرفتن مقادیر PGA و PGV مشخص مرتب شده است. نتایج مربوط به یک نمونه از تحلیل تاریخچه زمانی با در نظر گرفتن اثر همزمان وزن و فشار داخلی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین نتایج تنش بیشینه برای دسته‌ای از رکوردها با $PGV=30$ سانتی متر بر ثانیه و PGA های مختلف در جدول ۳ قابل مشاهده است.

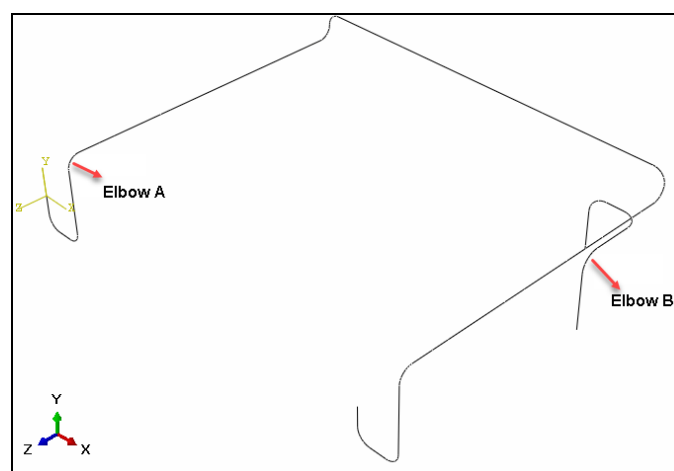


شکل ۱۲: نتایج تنش بیشینه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی خط لوله

جدول ۳: نتایج تنش بیشینه (10^8 *) برای دسته رکوردهای با $PGV=30\text{cm/s}$ و PGA های مختلف

شماره رکورد	$PGA=0.1g$	$PGA=0.2g$	$PGA=0.3g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.5g$
Record 1	1/173	1/204	1/917	2/051	1/158
Record 2	1/798	1/617	2/071	1/170	1/546
Record 3	1/419	1/297	1/118	1/852	1/030
Record 4	1/375	1/852	1/133	1/225	1/127
Record 5	1/838	2/052	1/033	1/516	1/403
Record 6	1/798	1/647	1/055	1/424	2/070

نتایج تحلیل تاریخچه زمانی و استخراج مقادیر تنش بیشینه برای ۱۵۷ تحلیل تاریخچه زمانی، تعداد ۸۲ بار خرابی را برای زانویی B و ۴۱ بار خرابی را برای زانویی A نشان می‌دهد به همین دلیل این دو نقطه به عنوان نقاط بحرانی خط لوله معرفی شده و ادامه روند محاسبات به منظور ترسیم منحنی‌های شکنندگی بر اساس نتایج تنش بیشینه این دو نقطه پیگیری شده است. محل قرار گیری دو زانویی A و B در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۱۲].

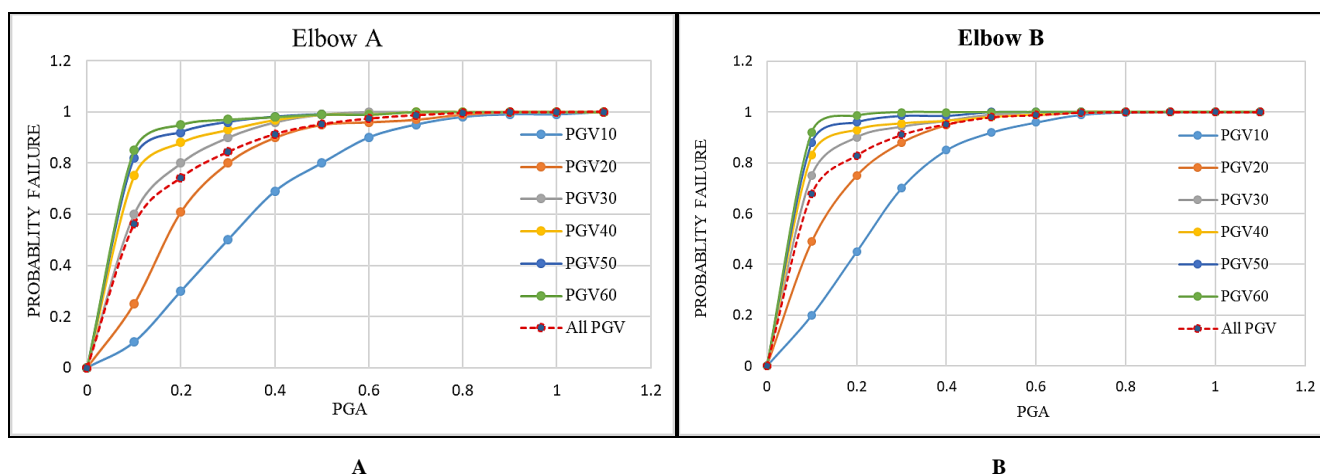


شکل ۱۳: محل وقوع بیشترین تعداد رخ داد تنش بیشینه در کل تحلیل‌ها

۴- ترسیم منحنی شکنندگی

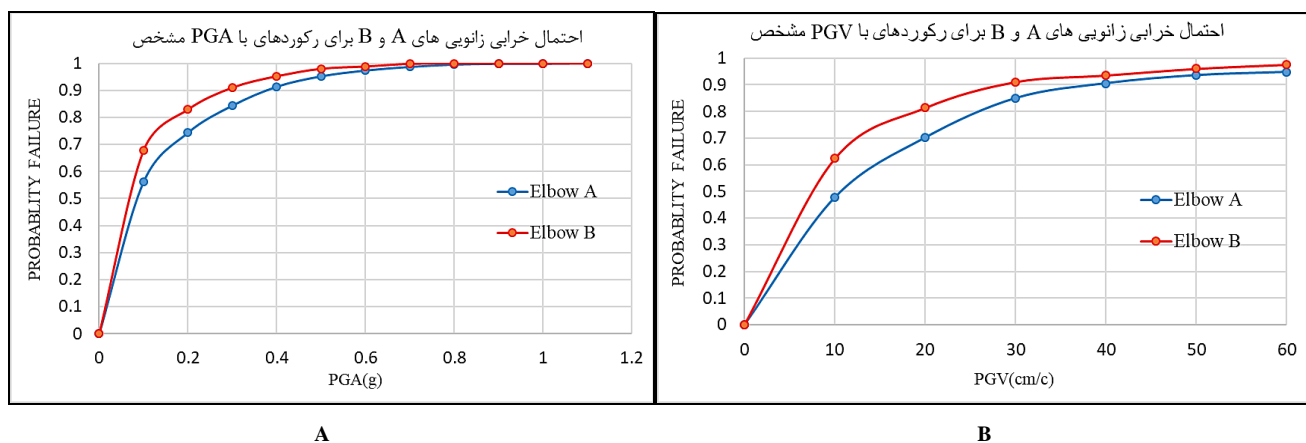
با در نظر گرفتن تنش مجاز با مقدار $1.13E8$ به عنوان معیار خرابی خط لوله، منحنی شکنندگی بصورت تک متغیره و دو متغیره برای دو نقطه بحرانی از خط لوله ترسیم شده است. با داشتن مقادیر تنش بیشینه یک توزیع لوگ-نرمال برای تشکیل تابع CDF استفاده شده و برای هر دسته رکورد با PGA و PGV مشخص احتمال خرابی سیستم محاسبه شده است.

نتایج این منحنی‌ها برای دو نقطه بحرانی زانویی A و زانویی B یک بار براساس PGA و بار دیگر براساس PGV به صورت تک متغیره مرتب شده و بار دیگر بصورت دو متغیره ارائه گردیده است. این نتایج در شکل ۱۴ ارائه شده است [۱۳].



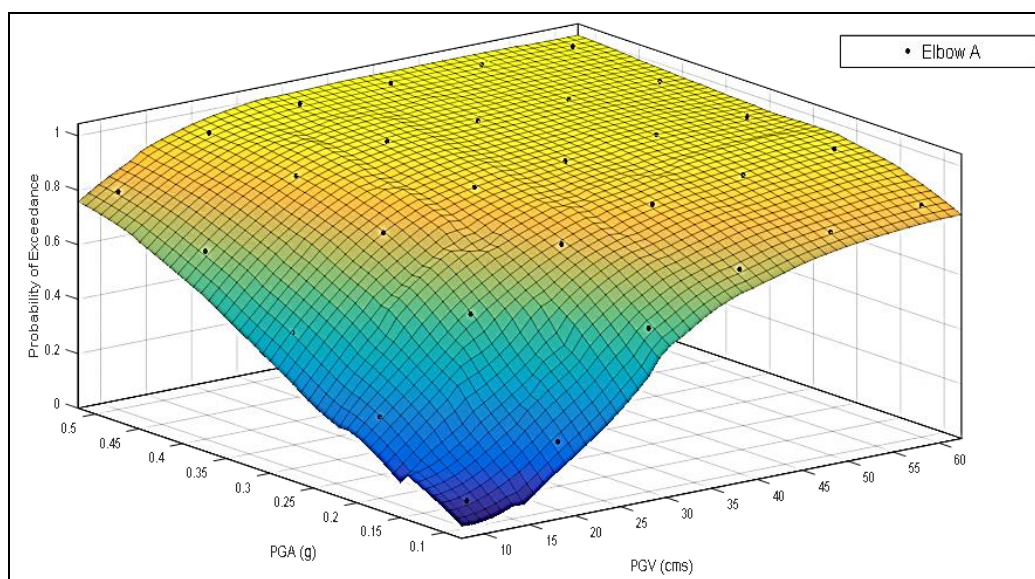
شکل ۱۴: منحنی شکنندگی قطعه زانویی برای PGVهای مختلف (A – Elbow B) (B – Elbow A)

برای دو نقطه ی بحرانی مشخص شده در سیستم لوله یعنی زانویی A و B منحنی شکنندگی تک متغیره میانگین یک بار مرتب شده بر اساس PGA و بار دیگر براساس PGV در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

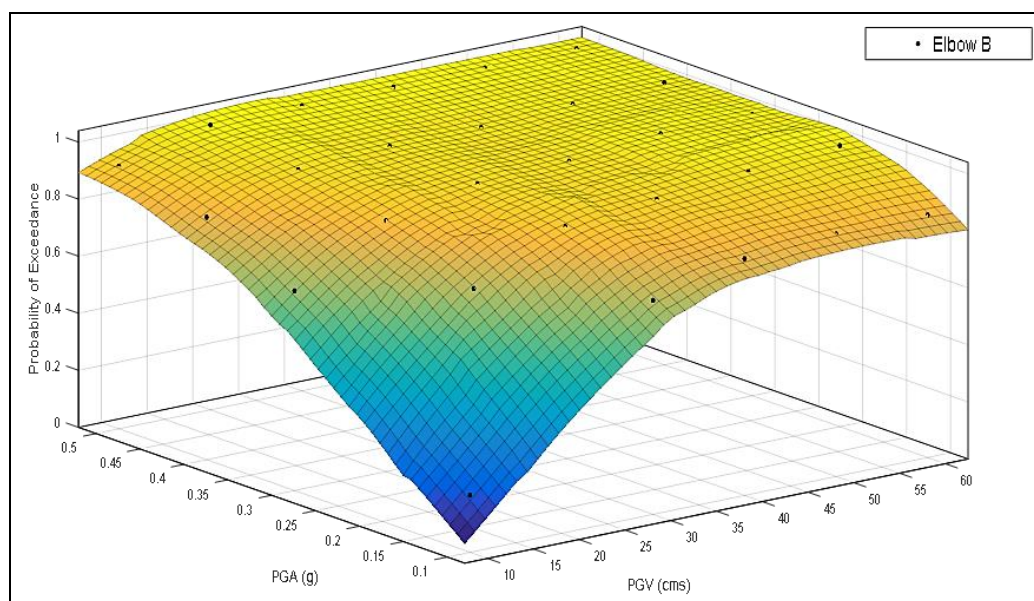


شکل ۱۵: احتمال خرابی زانویی های A و B (A – B) برای PGA مشخص (B – A) برای PGV مشخص

منحنی های سطوح شکنندگی برای دو زانویی A و B در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: سطوح شکنندگی دو متغیره برای قطعه Elbow A



شکل ۱۴: سطوح شکنندگی دو متغیره برای قطعه Elbow B

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه آسیب پذیری خط لوله در واحد آیزوماکس پالایشگاه تهران بصورت موردی مطالعه شده است. به این منظور سیستم خط لوله مورد نظر در نرم افزار آباکوس ابتدا با مدل Solid تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفت و از آنجاییکه اختلاف ناچیزی بین نتایج تحلیل فرکانسی مدل خط لوله با المان Solid و Wire وجود داشت ادامه روند مطالعه به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی با مدل Wire انجام شد. مدل Wire تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با اعمال ۱۵۷ رکورد تغییرمکان زلزله در هر سه جهت مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر تنش بیشینه برای رکوردها با PGA و PGV ها مختلف به دست آمد سپس دو نقطه زانویی A و B با بیشترین تعداد دفعات خرابی به عنوان نقاط بحرانی معرفی و در نهایت با در نظر گرفتن یک توزیع لوگ-نرمال برای مقادیر تنش بیشینه و تشکیل تابع

احتمال خرابی، منحنی های شکنندگی تک متغیره یک بار بر اساس PGA و بار دیگر بر اساس PGV برای دو نقطه بحرانی مورد نظر، ارائه گردید همچنین احتمال خرابی سیستم بصورت سطوح شکنندگی وابسته به هردو متغیر PGA و PGV ترسیم شد از جمله نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- بعد از تحلیل سیستم لوله مورد نظر در نرم افزار آباکوس از بین ۱۵۷ رکورد زلزله اعمال شده به سیستم ۴۱ بار Elbow A و ۸۲ بار Elbow B و ۳۴ بار سایر نقاط به حد تنش بیشینه رسیده‌اند بنابراین Elbow B با ۶۶ درصد امکان خرابی و Elbow A با ۳۳ درصد امکان خرابی به عنوان نقاط بحرانی سیستم تعریف شده‌اند.
- با مقایسه منحنی شکنندگی میانگین دو زانویی بحرانی A و B، استنباط می‌شود که زانویی B، به دلیل فرم هندسی، ابعاد و محل قرارگیری نسبت به زانویی A خرابی بیشتری را متحمل شده است.
- از آنجایی که براساس تحقیقات گذشته همواره در نظر گرفتن متغیرهای بیشتر برای تابع احتمال منجر به جواب دقیق تری می‌شود در این پژوهش برای تعیین تابع احتمال به جای یک متغیر از دو متغیر PGV و PGA به طور همزمان استفاده شده است که البته همان طوری که پیش بینی می‌شد نتایج به واقعیت امر نزدیک‌تر است به طور مثال به منظور تهیه منحنی شکنندگی برای زانویی A، در صورت در نظر گرفتن فقط یک پارامتر زلزله ($PGA=0.2g$)، احتمال خرابی نزدیک ۷۸ درصد می‌باشد این در حالیست که با لحاظ شدن متغیر دوم PGV (از 10 cm/s تا 60 cm/s) احتمال خرابی از ۳۰ تا ۹۵ درصد تغییر می‌کند. به عنوان مثال دیگر، به منظور تهیه منحنی شکنندگی برای زانویی B، در صورت در نظر گرفتن فقط یک پارامتر زلزله $PGV=20\text{ cm/s}$ ، احتمال خرابی نزدیک ۷۲ درصد می‌باشد این در حالیست که با افزودن متغیر دوم PGA (از $1g$ تا $0.5g$) احتمال خرابی از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند.
- در این پژوهش علی‌رغم اینکه از دو پارامتر شتاب و سرعت بیشینه جهت تهیه منحنی‌های شکنندگی خطوط لوله استفاده شده است، وجود پدیده تشدید و تاثیر آن بخصوص در زلزله‌های با PGA پایین‌تر بر روی سیستم خط لوله، با هموارسازی آماری نتایج و نمودارها اثر این شرایط نادیده گرفته شده است در حالی که در واقعیت چنین نیست. این نتیجه نشان می‌دهد که در تهیه منحنی شکنندگی گاه استفاده از دو متغیر نیز کافی نبوده و نیاز به ورود برخی دیگر از پارامترهای زلزله مانند پربود غالب، زمان موثر و یا شدت آریاس در کنار پارامترهای بیشینه شتاب، سرعت و تغییر مکان است [۱۴].

مراجع

- [1] Krausmann, Elisabeth. (2010). The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 242-248. doi:10.1016/j.jlp.2009.10.004
- [2] Fu, Zhiwei. (2013). Study on Seismic Fragility Analysis for Piping of CEFRR. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1, 82-88. doi:10.4236/jump.2013.16016
- [3] Lanzano, Giovanni. (2013). Seismic vulnerability of natural gas pipelines. *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, 117, 73-80. doi:10.1016/j.ress.2013.03.019
- [4] S. Razzaghi, Mehran. (2014). Probabilistic Seismic Safety Evaluation of Precode Cylindrical Oil Tanks. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 04014170. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000669
- [5] Reza, M.S. (2014). Enhanced Seismic Performance of Non-Standard Bolted Flange Joints for Petrochemical Piping Systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 30, 124-136. doi: 10.1016/j.jlp.2014.05.011
- [6] Gyu, Bub. (2014). Seismic Fragility Evaluation of Base Isolated Nuclear Power Plant Piping System. In: *International Conference on Thin-Walled Structures*. Busan, Korea: ICTWS2014, 8 pages.
- [7] Ju, Bu Seog. (2015). Seismic Fragility of Threaded Tee-Joint Connections in Piping Systems. *Journal of Pressure Vessels and Piping*, 132-133, 106-118. doi: 10.1016/j.ijpvp.2015.06.001
- [8] Salimi Firoozabad, Ehsan. (2016). Seismic Fragility of APR1400 Main Steam Piping System. In: *International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management*. Seoul, Korea: PSAM 13, 9 pages.
- [9] Phan, Hoang Nam. (2016). Fragility Analysis Methods for Steel Storage Tanks in Seismic Prone Areas. In: *International Conference on Pressure Vessels and Piping*. Vancouver, British Columbia, Canada: ASME 2016, 9 pages.
- [10] Caprinuzzi, Stefano. (2017). Univariate Fragility Models for Seismic Vulnerability Assessment of Refinery Piping Systems. In: *International Conference on Pressure Vessels and Piping*. Waikoloa, Hawaii, United States: ASME 2017, 10 pages.
- [11] Zareei, Seyed Alireza. (2017). Evaluation of power substation equipment seismic vulnerability by multivariate fragility analysis: A case study on a 420 kV circuit breaker. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 72-94. doi: 10.1016/j.soildyn.2016.09.026
- [12] Moayeri, Hamed. and Forouzesh, Farinaz. (2014). *Finite Element Analysis of Engineering Problems by Abaqus*. Tehran: Danesh Bonyad, 805.
- [13] Nowak, Andrzej S. and Collins, Kevin R. (2012). *Reliability of Structures*. New York: CRC Press, 407.
- [14] Ghalyani, Ehsan. (2018). *Development of two-variable fragility functions for piping systems in industrial plants*. M.Sc. Islamic Azad University, South Tehran Branch.