

چکیده

انتقال فرآورده‌های نفتی و گاز در مراکز صنعتی توسط خطوط لوله که یکی از روش‌های ارزان‌قیمت، سریع و مطمئن است، انجام می‌گیرد که خطوط لوله یکی از اعضای اصلی شریان‌های حیاتی هستند. ارزیابی لرزه‌ای اتصالات رزوه‌ای از مهم‌ترین مسائل در خطوط نفت و گاز و در صنعت نیروگاهی است زیرا آسیب در این خطوط سبب ایجاد بحران در حین و پس از زلزله خواهد شد. در این مطالعه از یکی از متداول‌ترین اتصالات رزوه‌ای برای مدل‌سازی استفاده شده است. پس از مدل‌سازی و بارگذاری، اتصال مورد نظر در دو حالت رو زمینی و مدفون مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مقاوم‌سازی اتصال نیز از یک قطعه انعطاف‌پذیر به نام آکاردئونی در محل اتصال استفاده شده است. علاوه بر طول آکاردئونی، شرایط تکیه‌گاهی و جنس آکاردئونی در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده بیشترین تنش و آسیب در اتصال بر روی پین و همچنین در آخرین رزوه‌ی درگیر پین با باکس اتفاق می‌افتد. همچنین مشخص شد تنش در محل اتصال مستقل از شرایط تکیه‌گاهی است و با جنس مصالح رابطه مستقیم دارد و مشخص گردید استفاده از آکاردئونی رویکرد مناسبی جهت مقاوم‌سازی این گونه اتصالات می‌باشد.

واژگان کلیدی: تحلیل لرزه‌ای، شریان‌های حیاتی، مقاوم‌سازی، اتصال رزوه‌ای، لوله مدفون، لوله سطحی، آکاردئونی.

ارزیابی لرزه‌ای آسیب‌پذیری اتصالات رزوه‌ای در صنعت نیروگاهی

سید محسن برقی رضوی (نویسنده مسئول)

کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

m.razavi@iiees.ac.ir

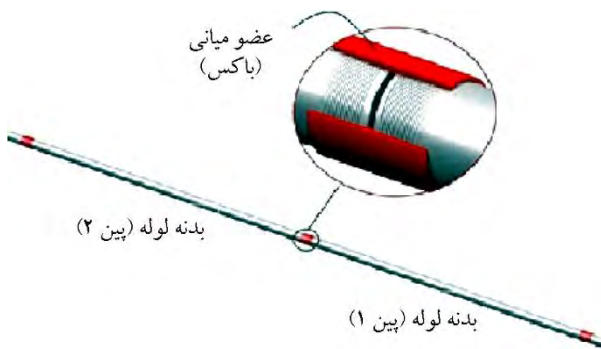
فریبرز ناطقی الهی

استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۱- مقدمه

ترکیه زیان رساند که بخش عمده آن به علت تخریب گسترده صنایع موجود در منطقه و تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم آن بود. یکی از دلایل خسارت گسترده در نیروگاه توپراس در این منطقه، تداوم جریان مواد شیمیایی در لوله‌ها به دلیل عدم کارایی مناسب شیرهای تعبیه شده در مسیر خطوط لوله بود [۱]. همچنین یکی از علل شروع آتش‌سوزی، شکست خطوط لوله انتقالی در اثر سقوط یک دودکش بر روی این خطوط و جریان یافتن سوخت در محل برآورد شده است. مقاوم‌سازی سیستم‌های سازه‌ای و صنعتی در مقابل زلزله با توجه به تغییرات مکرر و تکامل آیین‌نامه‌ها در چند دهه اخیر از مباحث غیر قابل‌گریز است. اولین گام جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها تعیین آسیب‌پذیری آنها در مقابل زلزله می‌باشد [۲]. منظور از

شریان‌های حیاتی به مجموعه سازه‌ها، تأسیسات و تجهیزاتی اطلاق می‌شود که وظیفه ذخیره، تأمین، انتقال و توزیع نیازهای حیاتی شامل آب، برق، گاز و یا جمع‌آوری، ذخیره و تصفیه یا بازیافت فاضلاب و مواد زائد و یا برقراری ارتباط شامل تلفن ثابت و همراه، اینترنت و دیتا را به عهده دارند [۱]. پدیده زلزله، جزو سوانح طبیعی است که همه‌ساله خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی فراوانی بر جای می‌گذارد. علاوه بر خسارات انسانی در محدوده‌های مسکونی شهری و روستایی، خسارات متعدد صنعتی، مالی و زیست‌محیطی مهم‌ترین معضلاتی هستند که یک زلزله در نواحی صنعتی بر جای می‌گذارد. زلزله ۱۷ اوت ۱۹۹۹ ترکیه که ناحیه صنعتی از میت را دچار خسارات گسترده‌ای نمود، به‌طور تقریبی ۱۸ میلیارد دلار به اقتصاد



شکل (۱): شماتیکی از اتصالات رزوه‌ای به همراه کوپلینگ آن [۳].

برای لوله‌های منقطع خصوصاً با قطرهای بالا و دیواره‌ی ضخیم، گسیختگی‌ها عموماً ناشی از خرابی در اتصالات هستند. برای مثال در زلزله‌ی تانگشان (۱۹۷۶)، سان و شین [۴] مشاهده کردند که در حدود ۸۰ درصد خرابی‌ها مرتبط با اتصالات است. بیرون کشیدگی محوری در ترکیب با پیچش زاویه‌ای در اتصالات یک مکانیسم متداول خرابی در مناطق با کرنش‌های کششی زمین است، زیرا مقاومت برشی مصالح درزبندی اتصالات، کمتر از مقاومت کششی لوله است. در مناطق با کرنش‌های فشاری در زمین، خرد شدن سر کاسه‌ای یک مکانیسم متداول گسیختگی است. در مورد لوله‌های با قطرهای کوچک‌تر، گسیختگی خمشی محیطی در مناطق با انحنای زمین مشاهده شده است [۴]. ارورک و نرد برگ [۵] مشاهده کردند بیش از ۸۰ درصد شکست‌ها در لوله‌های چدنی با اقطار کوچک (۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر) در زلزله‌ی لوماپریتا به شکل ترک‌های گرد در نزدیکی اتصال بوده است [۵]. شاه و چو [۶] نتیجه‌گیری کردند که جابه‌جایی نسبی بین لوله و خاک اطراف با افزایش سرعت ذرات افزایش یافته و با افزایش سرعت موج کاهش می‌یابد. داتا و همکاران [۷] نشان دادند که پاسخ‌ها با افزایش فرکانس امواج p و sv با زاویه برخورد صفر افزایش می‌یابد. برای سایر زوایا تنش‌های دایره‌ای ممکن است با افزایش فرکانس کاهش یابند. از میرایی لوله در مقابل میرایی خاک می‌توان صرف‌نظر کرد. تنش‌ها در مجاورت انتهای لوله به دلیل شرایط انتهایی افزایش می‌یابند [۸]. عمق دفن لوله اثر کمی بر روی تنش‌ها دارد.

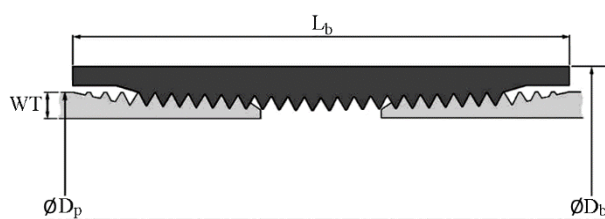
بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، بررسی تجهیزات، ارتباطات، ایمنی و نحوه عملکرد یک مجموعه در زمان وقوع زلزله می‌باشد. با استفاده از این رویکرد (بررسی عملکرد خطوط لوله در زلزله‌های گذشته) با سرعت و هزینه مناسبی می‌توان مناطق دارای بیشترین سطح خطر را تعیین و برای مراحل بعد که شامل تهیه نقشه‌های اجرایی مقاوم‌سازی و در نهایت اجرای مقاوم‌سازی است، اولویت‌بندی کرد. موضوع دیگری که ضرورت بررسی خسارت در لوله‌های انتقال نفت و گاز را بیشتر نشان می‌دهد، عدم امکان تعمیم ویژگی‌های انواع خطوط لوله مختلف به یکدیگر می‌باشد. در سیستم‌های خطوط لوله شبکه‌ای (مانند خطوط لوله آب‌رسانی)، خرابی در بخشی از سیستم باعث از کار افتادن کل سیستم نمی‌شود اما در سیستم خطوط لوله خطی مانند خطوط انتقال نفت یا گاز، از کار افتادن بخشی از سیستم می‌تواند کل سیستم و سیستم‌های وابسته را دچار توقف و حذف سیستم از شبکه خدمت‌رسانی کند [۳]. در شکل (۱) شماتیکی از اتصالات رزوه‌ای آورده شده است. به‌طور کلی این نوع اتصالات از یک پین و یک باکس (کوپل) تشکیل شده است. در حال حاضر استاندارد فراگیری برای ارزیابی تجهیزات موجود در مقابل زلزله وجود ندارد و عموماً ارزیابی‌ها داوطلبانه و با صلاح‌دید صاحبان صنایع صورت می‌گیرد. بنابراین نحوه مقاوم‌سازی و تصمیمات مربوط به آن بر پایه ملاحظات سود و هزینه و با توافق مالکان یا گردانندگان این صنایع تعیین می‌شود. یکی از روش‌های بررسی آسیب‌پذیری استفاده از درس‌های آموخته شده از زلزله‌های گذشته و رفتار تجهیزات در برابر نیروهای لرزه‌ای می‌باشد [۳]. این رویکرد یک رویکرد منطقی و قابل دفاع است زیرا شرایط واقعی مجموعه در نظر گرفته می‌شود و رفتار لرزه‌ای تجهیزات مشابه در زلزله‌های گذشته بررسی می‌شود و با تلفیق اطلاعات و قضاوت مهندسی، نتایج ارزیابی می‌گردد. شکل (۱)، یکی از اتصالات متداول رزوه‌ای و پرکاربرد در صنعت را نشان می‌دهد.

۲- طرح مسئله

همان‌طور که ذکر شد در تحقیقات گذشته به بررسی رفتار اتصال بر اساس پارامترهای هندسه اتصال، ضریب اصطکاک تماسی بین پین و باکس، توزیع تنش و تسلیم رزوه‌های اتصال و... پرداخته شده است [۱۰]. با توجه به قرارگیری کشور ایران بر روی کمربند لرزه‌ای آلپ-هیمالیا و آسیب‌پذیری خطوط لوله و اتصال در برابر مخاطرات لرزه‌ای، نیاز است تا این گونه لوله‌ها و اتصالات به‌صورت لرزه‌ای نیز بررسی شوند. متأسفانه علی‌رغم اهمیت تحلیل لرزه‌ای در لوله‌ها و اتصالات، این امر در ادبیات فنی و تحقیقات گذشته مغفول مانده است. در این مقاله به‌وسیله‌ی تحلیل عددی به روش اجزای محدود، آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر روی لوله‌ها و اتصالات رزوه‌ای بررسی شده است. به‌منظور دستیابی به این هدف بارگذاری شامل زلزله (اعمال رکورد زلزله طبرس)، بر روی مدل بررسی گردید. همچنین جهت بهبود و مقاوم‌سازی رفتار اتصال از یک قطعه انعطاف‌پذیر به نام آکاردئونی که علاوه بر انعطاف‌پذیری، قدرت جذب و استهلاک بالایی دارد، استفاده شده است.

۳- مدل‌سازی و صحت‌سنجی

برای آنکه صحت تحلیل انجام شده در نرم‌افزار [۱۱] مورد استفاده مورد تأیید قرار گیرد، به کمک یک مدل آزمایشگاهی که در ادامه شرح داده خواهد شد، صحت‌سنجی انجام می‌شود. طبق مدل آزمایشگاهی انجام شده جدول ۱ توسط ون ویتنبرگ [۱۲]، آزمایش کشش محوری روی اتصال خط لوله استاندارد API 5L [۱۳]، ۴/۵ اینچی ملاک انجام صحت‌سنجی قرار گرفته است. طبق استاندارد API 5L [۱۳] هندسه اتصال استاندارد ۴/۵ اینچی به شرح شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲): مقطع عرضی از اتصال خط لوله استاندارد API [۱۳].

تنش‌های لوله‌ها برای عمق دفن سطحی در حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابند و برای اعماق بیش از ۳۰ برابر شعاع میزان تنش تقریباً یکسان است. به‌علاوه وجود مایع درون لوله اثر خاصی بر پاسخ‌ها ندارد مگر اثر آشفستگی که مهم است [۹].

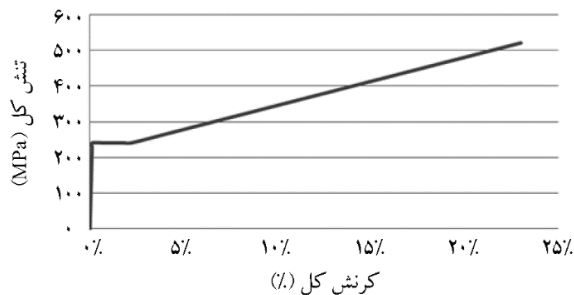
ویتنبرگ و همکاران [۱۰] با استفاده از روش مدل‌سازی اجزای محدود یک‌سری مطالعات پارامتریک بر روی اتصالات رزوه‌ای انجام دادند. هدف آنها بررسی تأثیر ضریب اصطکاک، ضخامت پین و باکس در عملکرد اتصالات رزوه‌ای بود. برای مدل‌سازی اتصالات رزوه‌ای باید دو رفتار غیرخطی در نظر گرفته شود، ابتدا رفتار غیرخطی مصالح و سپس رفتار غیرخطی در هندسه اتصال. به دلیل پیچیده بودن شرایط تماسی و زمان‌بر بودن تحلیل یک مدل سه‌بعدی، از یک مدل دو بعدی کاملاً متقارن استفاده شده است. آنها بر اساس شبیه‌سازی آماری نتیجه گرفتند که مقدار بازشدگی با افزایش تنش افزایش می‌یابد و حداکثر آن در تنش ۱۵۰ (Mpa) اتفاق می‌افتد. با تغییر ضریب اصطکاک در طول یک‌سری تحلیل، دریافتند که بازشدگی اتصال به ضریب اصطکاک به شدت وابسته است و با افزایش آن مقدار بازشدگی کاهش می‌یابد. آنها بر اساس یک‌سری مطالعات تجربی مقدار ضریب اصطکاک را برای اتصالات لوله‌ای API برابر ۰/۱۲ توصیه نمودند و دریافتند با افزایش ضریب اصطکاک مقدار بازشدگی افزایش می‌یابد اما توزیع بار بر روی رزوه‌ها تغییری نمی‌کند. همچنین با تغییر ضخامت باکس دریافتند که مقدار بازشدگی (به دلیل صلب شدن رفتار اتصال) کاهش می‌یابد اما توزیع بار در رزوه‌ها تقریباً ثابت و عملکرد نیز بسیار کم تغییر می‌کند. بار دیگر با تغییر ضخامت پین دریافتند که بازشدگی کاهش می‌یابد اما توزیع بار بر روی رزوه‌ها تغییری نمی‌کند و عملکرد نیز بهبود می‌یابد. آنها بر اساس مطالعات صورت گرفته نتیجه گرفتند که با تغییر ضریب اصطکاک و ضخامت پین عملکرد اتصال به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهتر می‌شود اما تغییر ضخامت باکس تأثیر چندانی در عملکرد اتصال نداشته و تنها مقدار بازشدگی را کاهش می‌دهد [۱۰].

جدول (۱): مشخصات هندسی نمونه مورد آزمایش [۱۳].

نوع اتصال	D_b (mm)	WT (mm)	D_b (mm)	L_b (mm)	tpi	نوع دندانه
خط لوله استاندارد ۴/۵ اینچی	۱۱۴/۳	۶/۰	۱۳۲/۱۱	۱۱۴/۳	۸	مثلثی

tpi تعداد دندانه‌ها در هر اینچ می‌باشد.

تنش - کرنش مصالح مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): نمودار تنش - کرنش الاستیک - پلاستیک مصالح [۱۲].

خصوصیات مکانیکی مصالح نمونه‌های مورد آزمایش مطابق جدول (۲) می‌باشد، این مقادیر بر اساس حداقل خواص مکانیکی API رده B بر اساس استاندارد API 5L [۱۳] به دست آمده است.

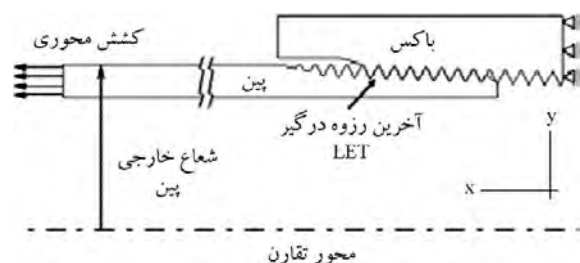
جدول (۲): خواص مکانیکی مصالح نمونه مورد آزمایش.

مصالح	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش تسلیم (%)
رده B، نمونه ۴/۵ اینچی	۲۴۱	۵۲۱	۲۳

تماس بین دندانه‌های پین و باکس به صورت برهم کنش نقطه به صفحه^۱ تعریف می‌شود. دندانه‌های باکس به عنوان سطح اصلی^۲ و دندانه‌های پین به عنوان سطح فرعی^۳ به نرم افزار معرفی می‌شود. اثر اصطکاک به صورت مدل اصطکاک کولمب و با ضریب اصطکاک ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. ضریب اصطکاک بین دندانه‌های پین و باکس ۰/۱۲ در نظر گرفته شده است. درجات آزادی لبه انتهایی باکس بسته شده و یک تنش کششی محوری یکنواخت به مقدار ۱۶۱ مگاپاسکال به انتهای پین وارد می‌شود.

در آزمایش انجام شده مقادیر کرنش ثبت شده در آزمایش کشش محوری تحت تنش ۱۶۱ مگاپاسکال، در نقاط ذکر شده در شکل زیر آورده شده است. در مدل اجزای محدود نیز با تعریف نقاط کنترلی (SET) (شکل ۵)، مقدار کرنش در همین نقاط به دست می‌آید. در ادامه با توجه به محورهای لوله در شکل (۳) (وینترگ جهت بررسی عملکرد لوله یک محور طولی (XX) در نظر گرفته که جهت بررسی کرنش محوری و آسیب‌های مربوطه از آن استفاده کرده است و همچنین جهت بررسی عملکرد غیر محوری، از جهت (ZZ) که عمود بر صفحه است، استفاده نموده است و از آنجایی که نیرو در راستای محور طولی وارد شده، کرنش‌های جهت ZZ احتمال ایجاد یک سری تغییر شکل‌های حلقوی در مقطع دایره‌ای را دارند که در ادبیات فنی به کرنش هوپ نام گذاری شده است) با کنار هم قرار دادن مقادیر کرنش ثبت شده از آزمایش و مدل اجزای محدود در شکل‌های (۶) و (۷) و مقایسه آنها با هم به اعتبارسنجی مدل اجزای محدود پرداخته شده است.

بار با سرعت ۵۰ KN/min به نمونه وارد می‌شود. در چهار مرحله در طول انجام آزمایش، بارگذاری به مدت ۳۰ ثانیه متوقف می‌شود تا کرنش سنج‌ها مقدار ثابتی را برای کرنش اندازه بگیرند. این کرنش‌های ثبت شده به عنوان معیاری برای اعتبارسنجی با مدل اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشترین نیروی اعمال شده (KN) ۳۲۸/۸ که باعث به وجود آمدن تنش برابر ۱۶۱ مگاپاسکال در بدنه لوله می‌شود. برای ساده‌سازی در مدل‌سازی نمونه، از مدل دو بعدی استفاده شده است. در واقع نمونه دو بعدی اجزای محدود (شکل ۳) مورد بررسی به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود. در شکل زیر LET به معنای آخرین دندانه در گیر در پین است.



شکل (۳): مدل ۲ بعدی جهت تحلیل اجزای محدود [۱۲].

مطابق استاندارد API 5L و خواص مکانیکی API رده B مدول الاستیسیته ۲۰۸ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ می‌باشد [۱۳]. نمودار

نتیجه می‌توان به اعتبار مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود پی برد. کد ASME B31.1 طراحی را ملزم می‌کند تا جهت بررسی تحلیل تنش در خطوط لوله اثرات بارهای دینامیکی را بر روی لوله مورد بررسی و ارزیابی قرار دهند [۱۴] (اثرات ناشی از آن در جهت قائم عملاً توسط ساپورت‌های نصب شده برای حالت بار مرده خنثی می‌شود). همچنین این آیین‌نامه بیان می‌دارد که لوله مستقیم کمترین انعطاف‌پذیری را داراست و باید با افزودن خم‌ها، زانویی‌ها، سه‌راهی و ... انعطاف‌پذیری را در این خطوط بالا برد. با اعمال این قطعات در خط لوله علاوه بر تأمین انعطاف‌پذیری در بسیاری موارد سبب افزایش تنش و تسلیم در خم‌ها و زانویی‌ها و ... شده و با افزایش مسیر لوله کشی سبب غیر اقتصادی شدن طرح می‌شود. هدف این مطالعه ارائه روشی است که علاوه بر تأمین انعطاف‌پذیری در خطوط لوله مستقیم و کاهش آسیب در این خطوط با حذف قطعات فوق به یک طرح اقتصادی دست پیدا کنیم.

در این تحقیق به‌طور کلی اتصال خطوط لوله در دو حالت لوله رو زمینی و لوله زیرزمینی و هر کدام در دو حالت اتصال استاندارد و اتصال آکاردئونی تحلیل و بررسی شده است [۱۵]. به‌علاوه به‌منظور بررسی تأثیر طول اتصال آکاردئونی در مدل‌های مربوطه از سه طول مختلف اتصال آکاردئونی استفاده شده است. در لوله‌های رو زمینی از رکورد شتاب زلزله و در لوله‌های زیرزمینی از پروتکل جابه‌جایی برای تحلیل استفاده شده است. رکوردهای شتاب موردنظر برای تحلیل لوله‌های روزمینی سه رکورد زلزله کوبه، امپریال ال‌سترو و طیس می‌باشد، پروتکل جابه‌جایی برای تحلیل لوله‌های زیرزمینی نیز از پروتکل جابه‌جایی ATC-40 است [۱۶]. مدل‌های مورد نظر در حالت رو زمینی و مدفون به شرح زیر می‌باشند:

اتصال استاندارد:

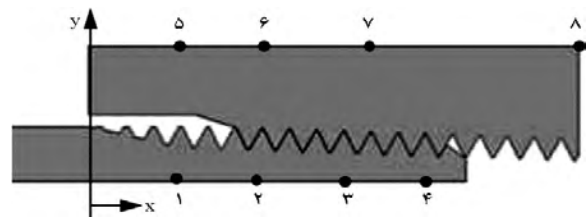
اتصال استاندارد با طول لوله L (I-mam)

اتصال آکاردئونی:

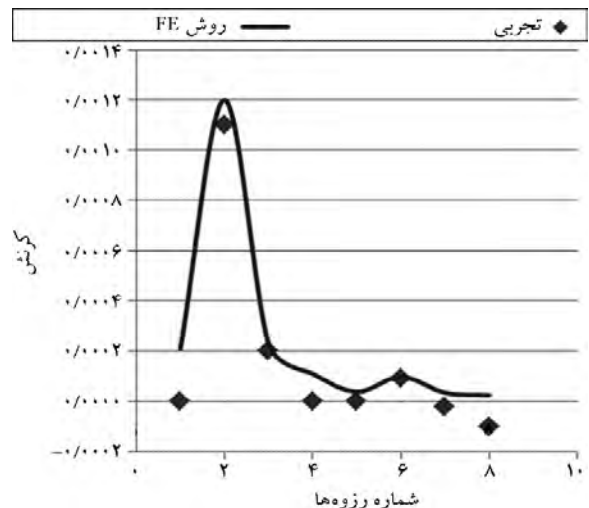
اتصال آکاردئونی با طول لوله L

اتصال آکاردئونی با طول لوله L و طول اتصال آکاردئون x (I-x)

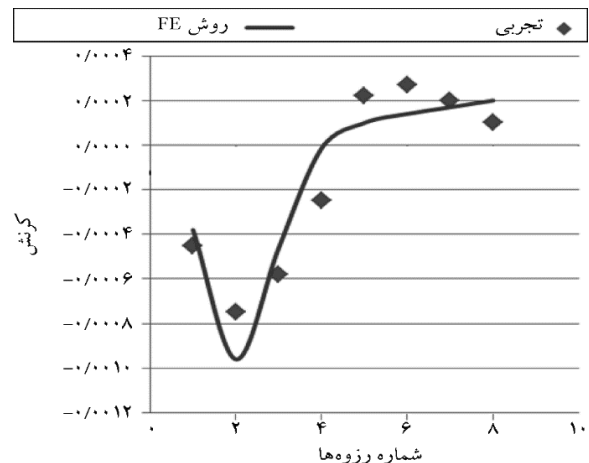
اتصال آکاردئونی با طول لوله L و طول اتصال آکاردئون $2x$ (I-2x)



شکل (۵): نقاط مینا برای اندازه‌گیری و محاسبه کرنش در نمونه [۱۲].



شکل (۶): مقایسه نتایج کرنش محوری (حول محور XX) حاصل از اجزای محدود و آزمایش کشش محوری.



شکل (۷): مقایسه نتایج کرنش محوری (حول محور ZZ) حاصل از اجزای محدود و آزمایش کشش محوری.

همان‌طور که از مقایسه بین نتایج تحلیل و آزمایش پیداست، مقادیر محاسبه شده از آزمایش و تحلیل اجزای محدود با تقریب مناسبی (حداکثر ۱۰ درصد اختلاف) به هم نزدیک هستند و در

اتصال آکاردئونی با طول لوله L و طول اتصال آکاردئون $3x(1-3x)$ تمامی مدل‌ها به صورت سه بعدی در نرم افزار مدل سازی شده اند؛ که به منظور بررسی رفتار واقعی و بررسی دقیق آسیب در مدل‌ها این کار صورت گرفته است. مصالح به صورت غیرخطی به نرم افزار معرفی شده است؛ که این مقادیر با توجه به مشخصات اتصال مورد نظر از استاندارد API برداشت شده است. مشخصات قطعه آکاردئونی در جدول (۳) آورده شده است.

شده به g حاصل از این قسمت هستند. مطابق نشریه ۶۰۰ [۱]، راهنمای بارگذاری و تحلیل لرزه‌ای شریان‌های حیاتی ایران [۱]، بر اساس بند ۲-۳-۲ در صورت استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی و استفاده از رکوردهای روی سطح زمین، باید حداکثر شتاب افقی رکوردهای انتخاب شده بر اساس رابطه زیر محاسبه شود:

$$\alpha_H = 700\beta_1\beta_2\beta_3 \quad (1)$$

که در این رابطه داریم:

α_H = شتاب افقی حداکثر روی سطح زمین در تحلیل تاریخچه زمانی (سانتی متر بر مجذور ثانیه)

β_1 = ضریب اهمیت بر اساس جدول نشریه

β_2 = نسبت شتاب منبای طرح بر اساس جدول نشریه

β_3 = ضریب بزرگنمایی لایه‌های خاک بر اساس جدول نشریه

بدین ترتیب با در نظر گرفتن دسته اهمیت خیلی زیاد و وضعیت لرزه خیزی خیلی شدید و نوع خاک ۲ و با استفاده از جداول نشریه ۶۰۰، مقدار شتاب افقی حداکثر برای رکوردهای شتاب زلزله محاسبه می شود:

$$\alpha_H = 700 \times 1.4 \times 0.35 \times 1.5 = 514.5 \text{ cm/s}^2 = 5.145 \text{ m/s}^2$$

در نتیجه از مقدار ۵/۱۴۵ متر بر مجذور ثانیه به عنوان ضریب مقیاس برای هر سه رکورد نرمال شده به g در نرم افزار استفاده می شود. به منظور بارگذاری لرزه‌ای مدل‌های زیرزمینی و به دلیل انتخاب خاک نوع ۲ از تحلیل شبه استاتیکی سیکلی و از پروتکل جابه جایی 40-ATC استفاده شده است [۱۶]. این جابه جایی به صورت نشست تکیه گاهی متغیر در زمان به صفحه ابتدایی لوله‌ها اعمال می شود.

یکی از مهم ترین مراحل مدل سازی، مش بندی مدل می باشد که نتایج نهایی فوق العاده به آن حساس می باشند. انتخاب بهترین نوع مش، بهترین شکل مش و بهترین اندازه مش بندی مرحله ای مهم از مدل سازی است که باید در این قسمت انجام گیرد. یکی از اساسی ترین مراحل مش بندی اجزای مدل، انتخاب بهترین اندازه مش می باشد. بدین منظور ابتدا یک خروجی خاص و در نقطه مشخص از مدل به عنوان معیار تحلیل حساسیت انتخاب می شود. معیار مورد نظر این تحقیق جهت

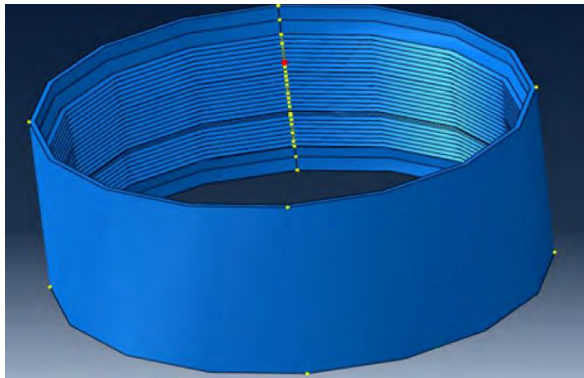
جدول (۳): مشخصات آکاردئونی [۱۷].

تعداد پریس در اینچ	ضرایب میرایی		تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (Mpa)	کرنش نهایی (%)
	α	β			
۳	۰/۱۵	۰/۲	۱۰۰	۲۵۰	۲۲

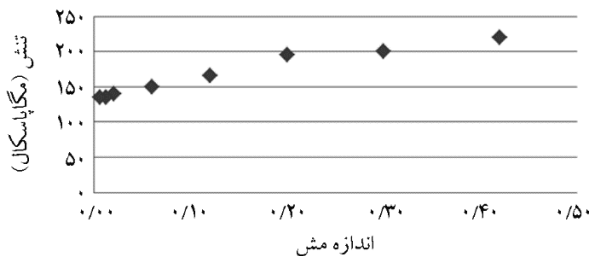
مدول الاستیسیته = ۲۰۰۵۹ نیوتون بر متر مربع، ضریب پواسون = ۰/۳

علاوه بر بارگذاری‌های لرزه‌ای که در لوله‌های رو زمینی به صورت رکورد شتاب و در لوله‌های زیرزمینی به صورت پروتکل جابه جایی می باشد، به منظور در نظر گرفتن فشار داخلی لوله‌ها، فشاری معادل ۲۰۰ psi (یا $1/35 \text{ e}6 \text{ N/m}^2$) به سطح داخلی مدل‌ها وارد شده است. به منظور بارگذاری لرزه‌ای مدل‌های روزمینی، سه رکورد شتاب زلزله به صورت مجزا به صفحه ابتدایی لوله‌ها اعمال می شود. سه رکورد شتاب مورد نظر برای تحلیل عبارتند از رکورد شتاب زلزله کوبه، رکورد شتاب زلزله ال سسترو، رکورد شتاب زلزله طبس. به منظور آنکه سه رکورد شتاب وارد به مدل‌ها در یک سطح باشد نیاز است مقیاس شده و سپس مورد استفاده برای تحلیل قرار گیرند. برای این منظور مراحل زیر طی می شود:

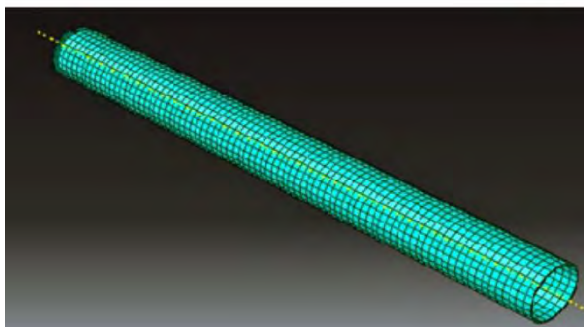
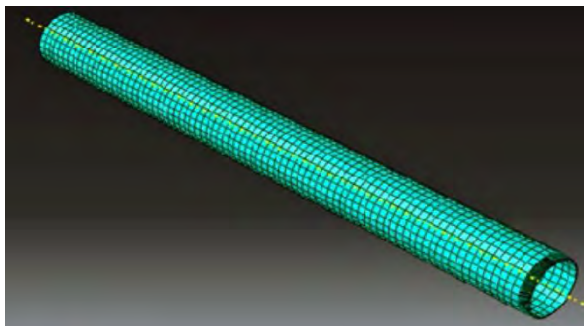
- ۱- در مورد هر کدام از سه رکورد شتاب مورد نظر، از بین زوج رکورد شتاب افقی هر کدام، رکوردی انتخاب می شود که بیشترین PGA را دارد.
- ۲- سه رکورد انتخاب شده، هر کدام به PGA خود تقسیم می شود تا بیشترین مقدار هر کدام برابر ۱ g شود. رکوردهایی که در تحلیل مورد استفاده قرار می گیرند، رکوردهای نرمال



شکل (۸): نقطه مرجع انجام تحلیل حساسیت مدل به مش بندی در مدل‌های با قطعه اتصال معمولی با نام‌گذاری Box 2 [۱۱].



شکل (۹): تحلیل حساسیت مدل به اندازه مش بندی.



شکل (۱۰): مدل مش شده لوله‌ها.

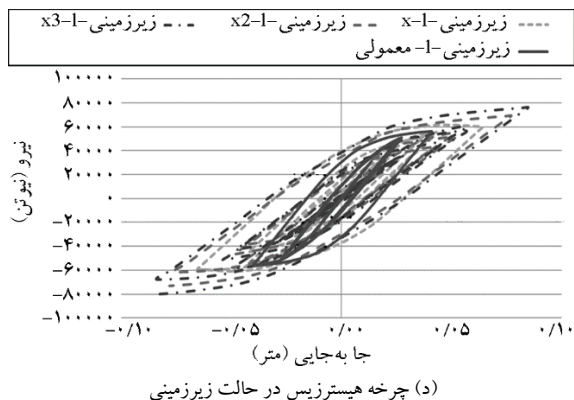
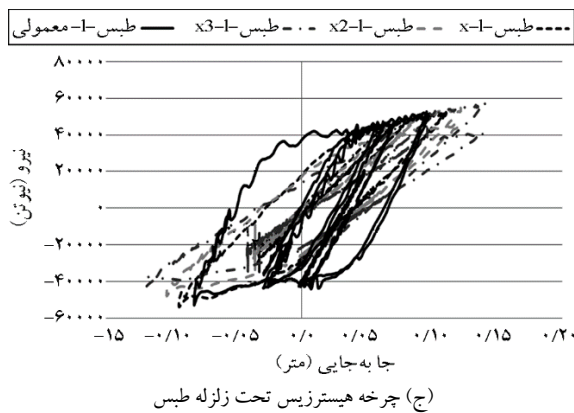
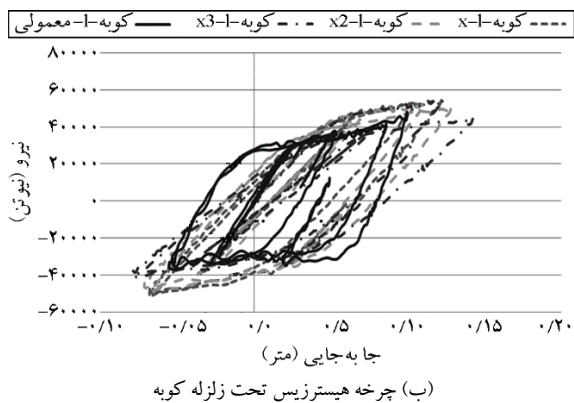
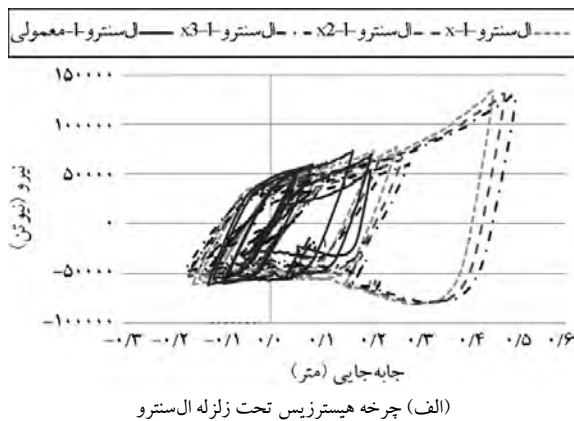
یک طرف و انتخاب یک نقطه برای کنترل تغییر مکان در طرف دیگر لوله، این منحنی برای تمامی حالات رسم می‌گردد.

تحلیل حساسیت، مقدار تنش فون میزس در نقطه نشان داده شده در شکل (۸) می‌باشد. سپس اندازه مشی که نرم‌افزار برای هر جزء از مدل پیشنهاد می‌دهد به عنوان یک انتخاب اولیه استفاده می‌گردد، حال تحلیل مدل توسط نرم‌افزار انجام می‌شود و خروجی مورد نظر استخراج می‌گردد. سپس به دلخواه اندازه مش هر جزء ریزتر شده و دوباره تحلیل انجام می‌گردد. پس از هر بار تحلیل مقدار خروجی مورد نظر در یک نمودار بر حسب اندازه مش رسم می‌شود. در این نمودار محور افقی، اندازه مش و محور قائم تنش فون میزس در نقطه مورد نظر بعد از تحلیل مدل می‌باشد. فرآیند کوچک کردن اندازه مش و تحلیل مجدد آن قدر تکرار می‌شود تا نمودار مورد نظر موازی محور افقی شود. بدین ترتیب بزرگ‌ترین اندازه مشی که منجر به جواب یکسان در خروجی مورد نظر می‌شود اندازه مش بهینه می‌باشد. این بدین معناست که هرچه اندازه مش کوچک‌تر از اندازه بهینه انتخاب شود تغییری در اندازه تنش در نقطه مرجع ایجاد نمی‌شود یا به عبارت دیگر نتیجه خروجی تحلیل دیگر به اندازه مش وابسته نیست [۱۱]. در نمودار حاصله در شکل (۹) نمودار تحلیل حساسیت مدل به اندازه مش نشان داده شده است.

با توجه به نتایج فوق، اندازه ۰/۰۲ به عنوان سایز مش بهینه انتخاب شده و در انتها اجزای مختلف تمامی مدل‌ها مطابق نوع و اندازه در نظر گرفته شده مش بندی می‌شوند. در شکل ۱۰ مدل مش بندی شده اجزای مدل نشان داده شده است.

۴- نتایج و تفسیر

پس از طی مراحل مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود و تحلیل مدل‌ها، در این بخش به ارائه نتایج تحلیل فرکانسی و خروجی‌های تعریف شده در تک‌تک مدل‌ها پرداخته شده است. در این قسمت اثرات تغییرات طول آکاردئونی، شرایط تکیه گاهی و اثر تغییر مدول الاستیسیته آکاردئونی در تمامی حالات بررسی شده و پس از اتمام تحلیل هر مدل، خروجی‌های از پیش تعیین شده تحلیل استخراج می‌شود. در بخش‌های بعدی، این خروجی‌ها به تفکیک برای هر مدل ارائه شده است. در این قسمت خروجی‌های زیر برای مدل‌های رومینی و زیرزمینی به تفکیک طول لوله‌ها ارائه شده است: منحنی‌های هیستریزیس (شکل ۱۱): که با تعریف تکیه‌گاه در



شکل (۱۱): چرخه هیستریزیس لوله‌های رو زمینی و زیرزمینی در زلزله‌ها و قطعه‌های اتصال مختلف.

ماکزیمم تنش های فون میزس روی دندان‌های مختلف رزوه‌های لوله سمت چپ و سمت راست (بین - شکل ۱۲): با توجه به تحقیقات گذشته صورت گرفته بر روی این اتصالات، بین یکی از حساس ترین قطعه‌ها در این گونه اتصالات می‌باشد که در این پژوهش با انتخاب یکسری از نقاط مهم به صورت دقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

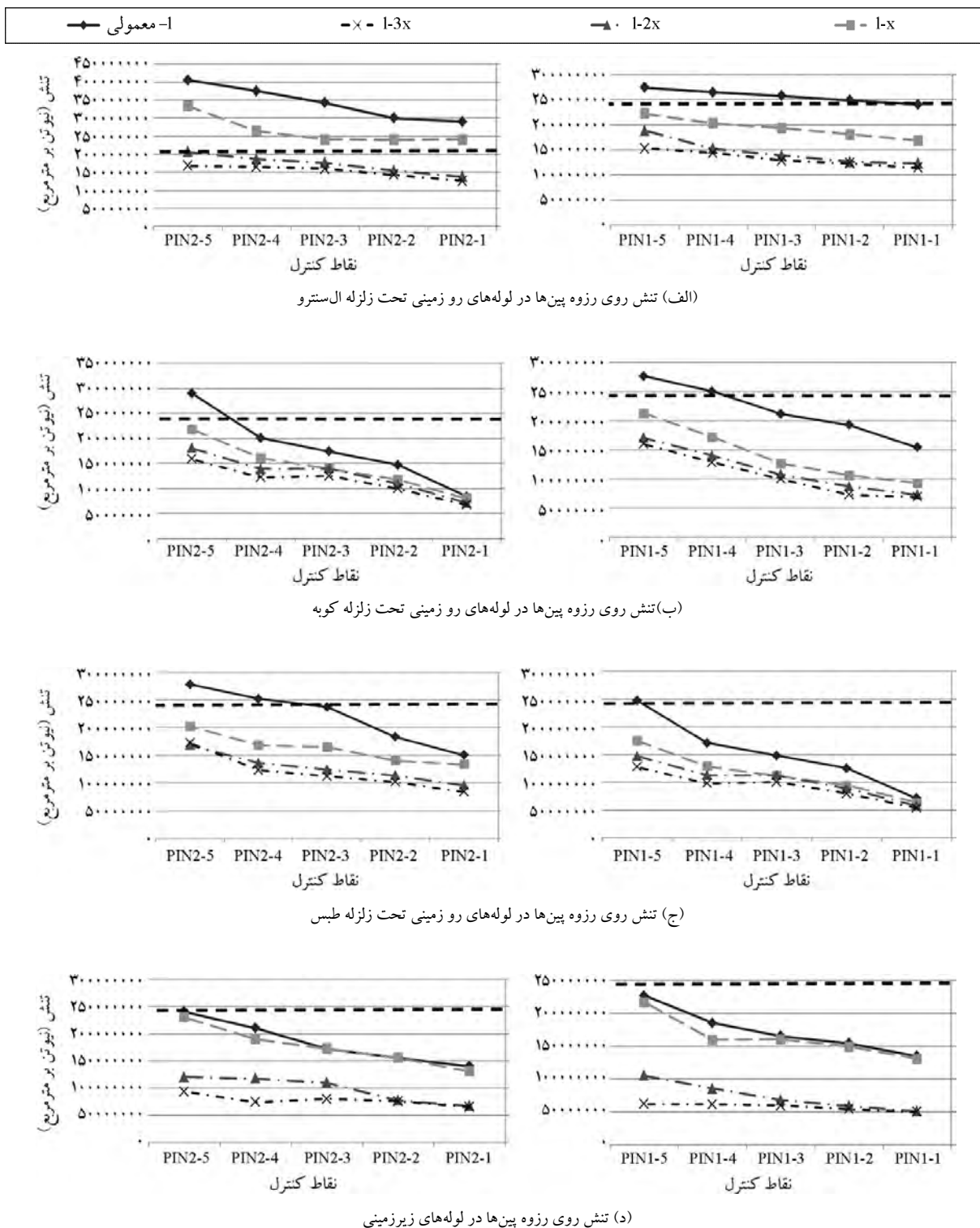
۴-۱-۱- منحنی‌های هیستریزیس

یکی از بهترین نمودارهایی که می‌تواند عملکرد سیستم را به طور کامل مورد ارزیابی قرار دهد نمودارهای هیستریزیس (شکل ۱۱) می‌باشد که نحوه‌ی جذب انرژی، جابه‌جایی، افت مقاومت و سختی و بسیاری از رفتار سیستم را می‌توان با آن ارزیابی کرد. در این قسمت و در حالت رو زمینی و مدفون این نمودارها برای لوله و اتصال مورد نظر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند؛ بدین صورت که ابتدا سیستم در حالت استاندارد و بدون آکاردئونی تحلیل می‌شود. سپس با ثابت نگه داشتن طول لوله، آکاردئونی جایگزین طولی از قطعه وسط اتصال یعنی باکس شده و در مراحل بعد طول آن دو و سه برابر می‌شود و نمودار مورد نظر برای هر حالت جداگانه استخراج می‌گردد.

۴-۲-۴- ماکزیمم تنش فون میزس روی دندان‌های مختلف رزوه‌های بین

در این بخش اثرات زلزله بر روی لوله‌ها و رزوه‌های آنها بررسی می‌شود (شکل ۱۲). در این حالت تنها اثرات تغییر طول آکاردئونی در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.

در شکل (۱۲) نتایج حاصل از توزیع تنش بر روی بین‌ها نشان داده شده است. همچنین خط چین بیان کننده حد تسلیم در این نمودارها می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده تنش‌های ایجاد شده بر روی نقاط بین ۲ کمی بیش از نقاط بین ۱ می‌باشد و این به دلیل شرایط گیرداری تکیه‌گاه و قرارگیری بین ۲ در مجاورت آن می‌باشد. همچنین بیشترین تنش ایجاد شده در بین ۱ و ۲ در نقطه ۵ رخ داده است و این به دلیل درگیری و برخورد بیشتر آن تحت زلزله با سایر نقاط می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین ۱ مقدار تنش در برخی از نقاط از حد تسلیم (240Mpa) بیشتر شده و برخی از نقاط آسیب دیده‌اند اما با اعمال آکاردئونی مقدار تنش کمتر از حد مجاز شده به طوری که با افزایش



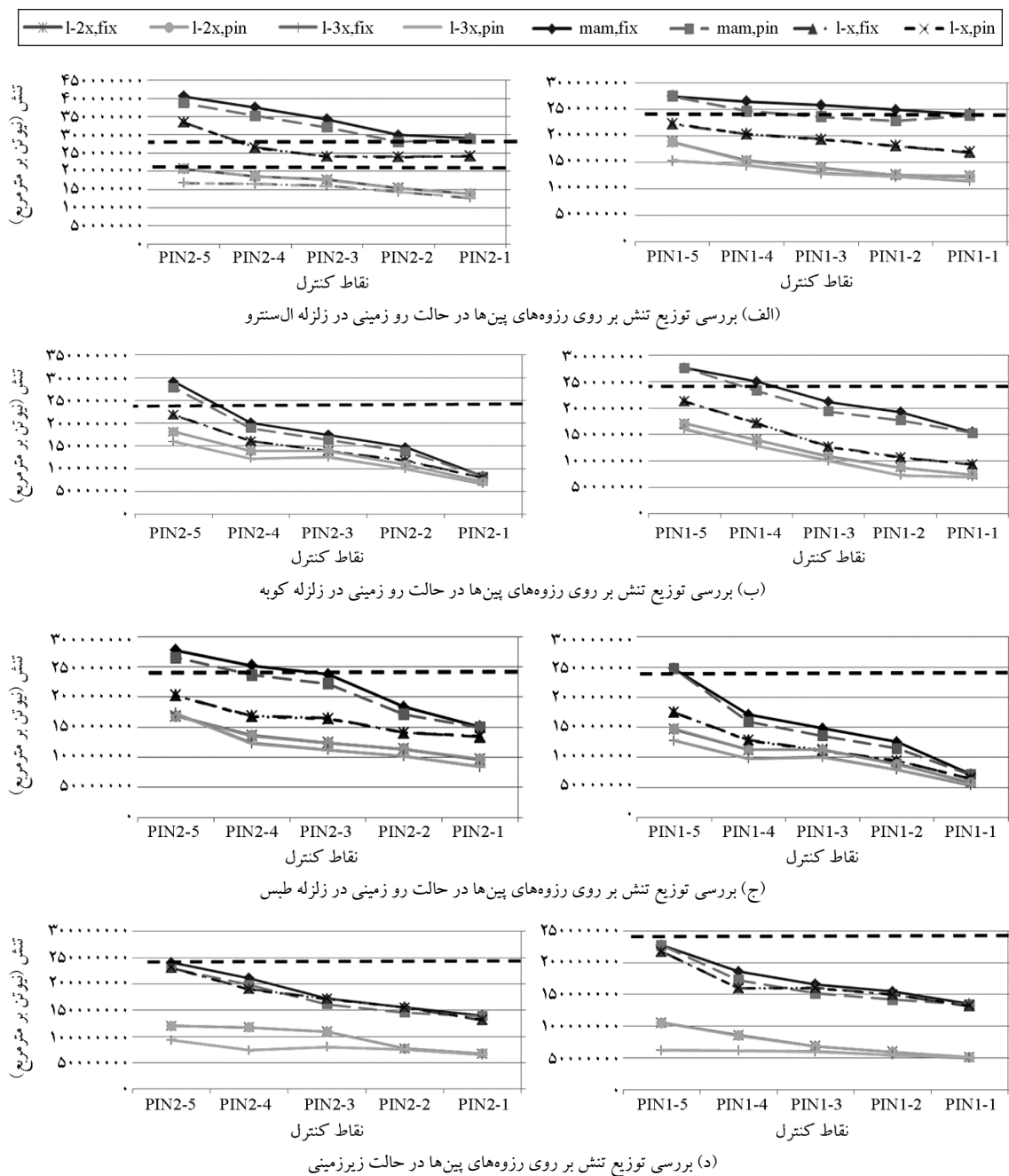
شکل (۱۲): توزیع تنش روی دندانه‌های رزوه لوله پین ۱ و پین ۲، در لوله‌های رو زمینی و زیرزمینی با قطعه‌های اتصال و در زلزله‌های مختلف.

مقدار تنش کاهش یافته ولی کمتر از حد مجاز نشده، ولی با افزایش دو و سه برابری طول آکاردئونی مقادیر تنش ایجاد شده در تمامی نقاط کمتر از حد مجاز شده و آسیبی رخ نداده است.

دو و سه برابری طول آکاردئونی در مقادیر تنش ایجاد شده تغییر کمی حاصل می‌شود. همچنین در پین ۲ مقدار تنش در برخی از نقاط از حد تسلیم بیشتر شده و برخی از نقاط آسیب دیده‌اند اما با اعمال آکاردئونی

می‌پردازیم (شکل ۱۳). در این بخش در ابتدای لوله، ابتدا شرایط گیردار و سپس شرایط مفصلی مدل شده و سپس این شرایط بر روی تمامی مدل‌های مورد مطالعه اعمال شده و مدل‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بر اساس نتایج به‌دست آمده در حالت معمولی مقدار تنش بر روی رزوه‌های سمت چپ و راست در حالت تکیه‌گاه گیردار کمی بیشتر از مقدار تنش در حالت تکیه‌گاه مفصلی می‌باشد (شکل ۱۳) (که این افزایش در تمامی نقاط کمتر از یک درصد می‌باشد). با اعمال آکاردئونی

۳-۴- بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی روی تنش رزوه‌های پین‌ها یکی از مواردی که بر روی نتایج و مدل‌سازی تأثیر گذار است شرایط تکیه‌گاهی می‌باشد. بدین منظور و برای یکسان‌سازی شرایط مدل‌سازی و واقعیت شرایط تکیه‌گاهی در دو حالت گیردار (Fix) و مفصلی (Pin) مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اثر آن در توزیع تنش و آسیب بر روی رزوه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. در این بخش با تغییر شرایط تکیه‌گاهی در دو حالت ذکر شده به بررسی اثرات آن به همراه تغییر طول آکاردئونی



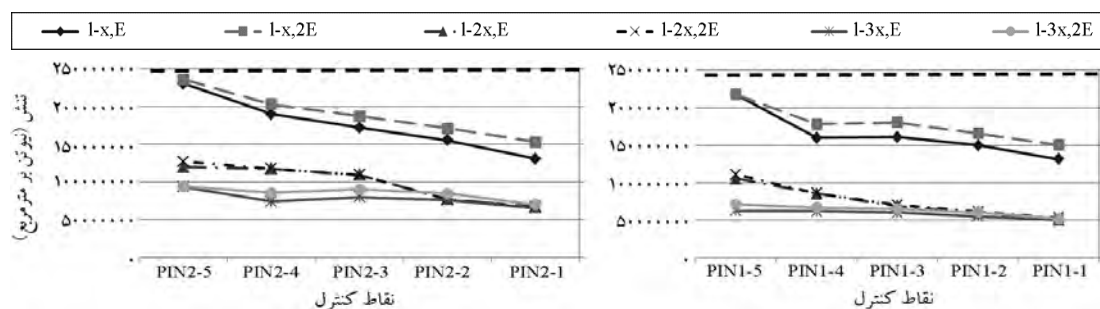
شکل (۱۳): بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی بر روی توزیع تنش رزوه‌های پین‌ها در حالت رو زمینی و زیرزمینی در زلزله‌های مختلف.

مدول الاستیسیته می‌باشد. بدین منظور برای بررسی اثر این پارامتر در تحلیل، مدول الاستیسیته قطعه آکاردئونی را تغییر داده تا اثر آن در نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گیرد.

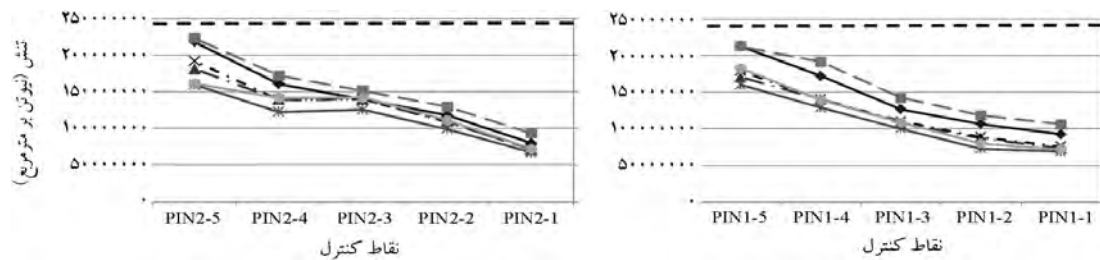
در این بخش تنها مدول الاستیسیته آکاردئونی دو برابر (400 Gpa) شده است. از آنجایی که مدول الاستیسیته در حالت آکاردئونی تغییر یافته است، بررسی حالت استاندارد ضرورتی ندارد و به همین دلیل مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود (شکل ۱۴) با افزایش مدول الاستیسیته مقدار

و افزایش طول آن بر روی مدل‌ها در بقیه حالات مقدار تنش تغییر چندانی نداشته و تقریباً نتایج تنش بر روی رزوه‌ها در دو حالت تکیه‌گاه گیردار و مفصلی باهم برابر می‌باشد. همچنین با توجه به حد آسیب، تغییر چندانی در مقادیر آسیب بر روی مدل‌ها ایجاد نشده است؛ بنابراین با صرف‌نظر از تغییرات اندک به وجود آمده و بر خلاف تصور، نتایج توزیع تنش بر روی رزوه‌ها و نقاط میانی مستقل از شرایط تکیه‌گاهی است.

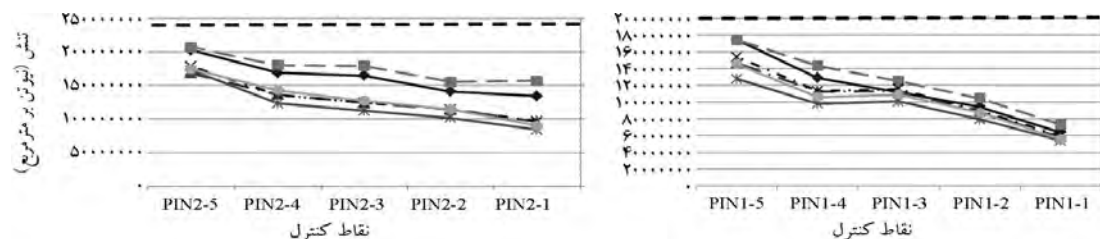
۴-۴- بررسی اثر تغییر مدول الاستیسیته آکاردئونی روی تنش رزوه‌های پین‌ها یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در تحلیل، جنس مصالح یا



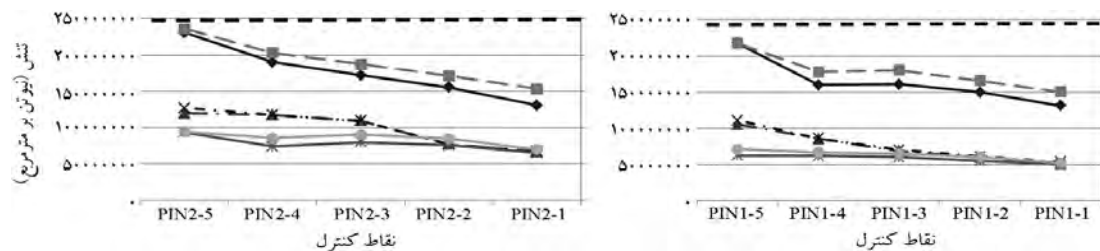
(الف) بررسی توزیع تنش بر روی رزوه‌های پین‌ها در حالت روزمینی در زلزله الاسترو



(ب) بررسی توزیع تنش بر روی رزوه‌های پین‌ها در حالت روزمینی در زلزله کوبه



(ج) بررسی توزیع تنش بر روی رزوه‌های پین‌ها در حالت روزمینی در زلزله طیس



(د) بررسی توزیع تنش بر روی رزوه‌های پین‌ها در حالت زیرزمینی

شکل (۱۴): بررسی اثر تغییر مدول الاستیسیته آکاردئونی بر روی توزیع تنش رزوه‌های پین‌ها در حالت روزمینی و زیرزمینی در زلزله‌های مختلف.

۲- حداکثر تنش و تسلیم بر روی نقطه کنترلی ۵ بر روی پین‌ها در حالت استاندارد اتفاق می‌افتد و با اعمال آکاردئونی تنش بر روی این نقطه و بسیاری از نقاط کمتر از حد مجاز شده است.

۳- در همه مدل‌ها میزان کاهش تنش در دندان‌های رزوه‌های پین‌ها و با تبدیل قطعه اتصال استاندارد به آکاردئونی به طول x بسیار بیشتر از میزان این کاهش تنش با تبدیل قطعه اتصال آکاردئونی به طول x به $2x$ می‌باشد. این میزان کاهش با تبدیل قطعه اتصال آکاردئونی به طول $2x$ به $3x$ بسیار کم است.

۴- میانگین تنش حاصله در طول قطعه‌های اتصال با تبدیل قطعه اتصال استاندارد (معمولی) به آکاردئونی و افزایش طول آن، کاهش می‌یابد.

۵- با تبدیل قطعه استاندارد به آکاردئونی به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی در سیستم، اتصال مورد نظر توانسته انرژی بیشتری را جذب و مقاومت بیشتری از خود نشان دهد اما با افزایش طول قطعه مورد نظر، دچار کمی افت مقاومت شده است که به دلیل کاهش سختی در سیستم می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در صورت احتمال تسلیم در مقطع می‌توان با تبدیل باکس به آکاردئونی و استفاده از طول $2x$ از ایجاد تسلیم در اتصال جلوگیری نمود.

در ادامه به منظور شبیه‌سازی و یکسان نمودن شرایط مدل‌سازی و اجرایی، شرایط مرزی را از گیردار به مفصلی در مدل‌ها تغییر داده تا اثر شرایط تکیه‌گاهی بر روی توزیع تنش‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. همان‌طور که مشاهده شده تنش در محل اتصال تقریباً تغییر چندانی نداشته و برخلاف تصور تنش در محل اتصال مستقل از شرایط تکیه‌گاهی است. همچنین یکی از پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی جنس مصالح مصرفی می‌باشد. به‌منظور بررسی این موضوع مدول الاستیسیته قطعه آکاردئونی در محل اتصال دو برابر شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار تنش بر روی نقاط محل اتصال تا ۱۵ درصد افزایش یافته و آسیب بیشتری در مدل ایجاد شده است؛ بنابراین مدول الاستیسیته

تنش در تمامی نقاط و در تمامی حالات افزایش یافته است اما با دو برابر کردن مدول الاستیسیته مقدار تنش حداکثر ۱۵ درصد تغییر کرده که این به دلیل رفتار غیرخطی مصالح می‌باشد که بیشتر این تغییرات در نقاط ابتدایی رزوه‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین با تغییر جنس آکاردئونی حدود آسیب و تسلیم در مدل و بر روی نقاط تفاوت چندانی نداشته است؛ بنابراین افزایش تنش در حالت دوم (تغییر مدول الاستیسیته) نسبت به حالت قبل، به دلیل افزایش نسبی سختی و جذب نیروی بیشتر می‌باشد؛ بنابراین آسیب در مدل رابطه مستقیمی با افزایش مدول الاستیسیته و تغییر جنس مصالح دارد.

۵- نتیجه‌گیری

مقاوم‌سازی سیستم‌های سازه‌ای و صنعتی در مقابل زلزله با توجه به تغییرات مکرر و تکامل آیین‌نامه‌ها در چند دهه اخیر از مباحث غیر قابل‌گریز است. با توجه به بررسی‌های انجام شده در زلزله‌های گذشته بیشترین آسیب در مراکز صنعتی و خطوط لوله در اتصالات رخ داده است که یکی از ضعیف‌ترین نوع اتصالات، اتصالات رزوه‌ای می‌باشد که بیشترین خرابی در زلزله‌های گذشته در آنها اتفاق افتاده است. ارزیابی لرزه‌ای اتصالات رزوه‌ای از مهم‌ترین مسائل در خطوط نفت و گاز، خطوط انتقال، خطوط شبکه و در صنعت نیروگاهی است زیرا آسیب در این خطوط سبب ایجاد بحران در حین و پس از زلزله خواهد شد. پس از طی مراحل مدل‌سازی و تحلیل و ارائه نتایج تحلیل در مراحل قبل، در این قسمت به نتیجه‌گیری از نتایج ارائه شده پرداخته می‌شود. با مقایسه تنش در نمودارهای رسم شده در فصل قبل موارد زیر مشاهده می‌شود:

۱- در همه مدل‌ها میزان کاهش تنش در دندان‌های رزوه قطعه اتصال با تبدیل قطعه اتصال استاندارد به آکاردئونی به طول x بسیار بیشتر از میزان این کاهش تنش با تبدیل قطعه اتصال آکاردئونی به طول x به $2x$ می‌باشد. این میزان کاهش با تبدیل قطعه اتصال آکاردئونی به طول $2x$ به $3x$ بسیار کم می‌باشد.

7. Datta, S.K., Shah, A.H., Wong, K.C. (1984) Dynamic stresses and displacements in buried pipe. *J. Eng. Mech, ASCE*, **110**, 1451-1465.
8. Datta T.K. (1999) Seismic response of buried pipelines: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design*, **192**(2-3), 271-284.
9. Mashaly, E.A., Datta, T.K. (1989) Seismic stress at the intersection of buried pipelines. *J. Pipelines*, **7**, 281-299.
10. Van Wittenberghe, J., De Baets, P., and De Waele W. (2009) Modeling of preloaded threaded pipe connections. *8th National congress on Theoretical and Applied Mechanics (NCTAM 2009)*, 149-156.
11. ABAQUS Finite Element Documentation, Version 6.11 (2013).
12. Van Wittenberghe, J. (2011) *Experimental Analysis and Modelling of the Fatigue Behaviour of Threaded Pipe Connections*. Ph.D. dissertation, Ghent University.
13. Specification, A.P.I. 5L (2004) *Specification for Line Pipe*. Edition March.
14. Compliance, A. ASME. (2007) ASME B31. 1 for power piping valves. Exceptions: Domestic hot-and cold-water piping valves unless referenced.
15. Vice President of Strategic Planning and Supervision (2012) *Handbook of Seismic Design of the Gas System*. Journal No. 601 (in Persian).
16. ATC (1996) *ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council, report ATC-40, Redwood City.
17. Van Wittenberghe, J. (2011) Experimental analysis and modelling of the fatigue behaviour of threaded pipe connections. Ph.D. dissertation, Ghent University.

با آسیب و افزایش آن در لوله رابطه مستقیمی دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با تبدیل قطعه اتصال استاندارد به آکاردئونی و افزایش طول قسمت آکاردئونی آن، در تمامی مدل‌ها به لحاظ وقوع خرابی، تسلیم و گسیختگی مشاهده شده است. در صورت مشاهده این خرابی‌ها می‌توان با طول 2x آکاردئونی به‌عنوان طول بهینه در طراحی، از ایجاد آسیب در سیستم که می‌تواند سبب توقف یا حذف عملکرد و کارایی سیستم شوند، جلوگیری نمود.

مراجع

1. Vice President of Strategic Planning and Supervision (2012) *Handbook of Seismic Loading and Analysis of Iranian Vessels, Issue 600* (in Persian).
2. ASCE (2002) *Seismic Design and Retrofit of Piping Systems*. American Society of Civil Engineering.
3. Brahman, F., Manshouri, M.R., Nik Nohad, D. (2004) *Pipe Damage in Past Earthquakes and Examination of Pipe Damage Modes*. Report (005), Deputy of Engineering and Technology of Oil Ministry (in Persian).
4. Sun, S. and Shien, L. (1983) 'Analysis of Seismic Damage to Buried Pipelines in Tangshan Earthquake'. In: *Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77, American Society of Mechanical Engineers, New York, June, 365-367.
5. O'Rourke, M. and Nordberg, G. (1991) Analysis Procedures for Buried Pipelines Subject to Longitudinal and Transverse Permanent Ground Deformation. *Proceedings of the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, San Francisco, CA, Technical Report NCEER-91-0001, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 439-453.
6. Shah, H.H., Chu, S.C. (1974) Seismic analysis of underground structural elements. *J. Power Div. ASCE*, **100**, 53-62.

واژه‌نامه

Node to Surface Interaction	۱- برهم‌کنش نقطه به صفحه
Master Surface	۲- سطح اصلی
Slave Surface	۳- سطح فرعی