



دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

بررسی تجربی و شبیه سازی لهیدگی لوله های جدار نازک شیاردار تحت بارگذاری محوری

سیداحسان میرمحمدصادقی

استاد راهنما:

دکتر سید جمال حسینی پور

استاد مشاور:

دکتر محمد بخشی

مهندس عبدالحمید گرجی

بهمن ۸۷



تقدیم به بهترین نعمتهای زندگی،
پدر و مادر مهربانم
خانواده عزیزم و
همه کسانی که دوستشان دارم.

سپاس‌گزاری

بر خود لازم می‌دانم از استاد محترم جناب آقای دکتر سید جمال حسینی پور استاد محترم راهنما و اساتید محترم جناب آقای دکتر محمد بخشی جویباری و جناب آقای مهندس عبدالحمید گرجی اساتید محترم مشاور به خاطر راهنمایی‌های صمیمانه و کمک‌های دلسوزانه ایشان در طول مدت انجام این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. از ایزد یکتا سلامتی و خرسندی همه این عزیزان را خواستارم.

چکیده

کاربرد سیستم های جذب انرژی ضربه در صنایع مختلف به ویژه در صنایع خودروسازی به عنوان راه حلی برای حداقل کردن اثر ضربه وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی خودرو از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای بالا بردن ایمنی خودروها در سوانح رانندگی و برخورد خودروها با موانع، اقدامات زیادی از سوی شرکتهای سازنده صورت گرفته است. جذب انرژی ضربه یکی از معیارهای مهم ایمنی خودرو می باشد که باید توسط شرکت سازنده مد نظر قرار گیرد. به این منظور سیستم های گوناگون جذب انرژی به کار گرفته شده اند که از این میان لوله های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا، طول لهیدگی زیاد و نسبت جذب انرژی به وزن بالا به عنوان یکی از کارآمدترین سیستمهای جذب انرژی کاربرد روز افزونی پیدا کرده اند. این سیستم ها علاوه بر صنایع خودرو سازی در صنایع کشتی سازی، راه آهن و نظامی نیز کاربرد دارند. لوله های جدار نازک در پشت سپر، ستون و فرمان خودرو، قسمت های در معرض ضربه کشتی ها، قطارها و همچنین کف آسانسورها، هلیکوپترها و فضاپیماها و همچنین مخازن سوخت به منظور نشست نرم، حفاظت از مواد بسته بندی شده و تجهیزات استفاده می شوند.

در این پژوهش با انجام آزمایشات تجربی و شبیه سازی اجزای محدود، نحوه لهیدگی، میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی لوله های جدارنازک شیاردار با ابعاد هندسی گوناگون تحت بارگذاری محوری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. شبیه سازی نمونه های آزمایش شده در نرم افزار ABAQUS¹ به صورت دو بعدی متقارن محوری¹ و سه بعدی و به روش صریح اجرا شده است. صحت کلیه نتایج شبیه سازی توسط نتایج حاصل از آزمایشات تجربی مورد تایید قرار گرفته است. نتایج نشان داده اند که نحوه لهیدگی و میزان انرژی جذب شده در لهیدگی محوری لوله های جدار نازک شیاردار می تواند به وسیله معرفی مقادیر فواصل شیار گوناگون کنترل شود. تطابق نسبتا خوب نتایج تجربی و شبیه سازی در این پژوهش با مقایسه رفتار منحنی بار - جابه جایی، نیروی آغاز لهیدگی، نیروی متوسط لهیدگی و نحوه تغییر شکل نمونه ها به روشنی نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: سیستم های جذب انرژی ضربه - بار گذاری محوری - لوله های جدارنازک شیاردار - شبیه سازی اجزای محدود - نیروی آغاز لهیدگی - نیروی متوسط لهیدگی

¹ Axissymmetric

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فصل ۱- مقدمه	۱۱
۱-۱ اهمیت استفاده لوله های جدار نازک به عنوان جاذب انرژی و کاربرد آنها.....	۱۲
۲-۱ انواع روشهای لهیدگی لوله ها.....	۱۵
۱-۲-۱ فشار محوری.....	۱۵
۲-۲-۱ بارگذاری مورب.....	۱۶
۳-۲-۱ فشار جانبی.....	۱۷
۴-۲-۱ وارونش.....	۱۸
۵-۲-۱ پارگی محوری.....	۱۸
۳-۱ مروری بر دیگر تحقیقات انجام شده.....	۱۹
۴-۱ هدف از انجام پژوهش حاضر.....	۲۸
فصل ۲- آزمایشات تجربی	۲۹
۱-۲ مقدمه.....	۳۰
۲-۲ مشخصات نمونه های آزمایش.....	۳۰
۳-۲ آزمایش فشار محوری.....	۳۴
۴-۲ نمونه ها پس از آزمایش.....	۳۷
فصل ۳- شبیه سازی	۳۸
۱-۳ مقدمه.....	۳۹
۲-۳ خصوصیات و فرضیات صورت گرفته.....	۳۹
۱-۲-۳ خواص مکانیکی قطعه کار.....	۳۹
۲-۲-۳ ابعاد قطعه کار.....	۴۰
۳-۳ مشخصات کلی و فرضیات شبیه سازی.....	۴۰
۱-۳-۳ نوع و تعداد بهینه المان.....	۴۱
۲-۳-۳ شبیه سازی شرایط تماس.....	۴۲
۳-۳-۳ انتخاب مقدار مناسب ضریب افزایش جرمی.....	۴۲
۴-۳-۳ المان بندی مجدد.....	۴۳
فصل ۴- نتایج و بحث	۴۴
۱-۴ بررسی نحوه تغییر شکل.....	۴۵
۲-۴ بررسی نوع لهیدگی و مکانیزم تغییر شکل.....	۴۹
۳-۴ بررسی منحنی های بار - جابه جایی.....	۵۷
۴-۴ بررسی نیروی آغاز لهیدگی.....	۶۹
۵-۴ لهیدگی موثر.....	۷۱
۶-۴ نیروی متوسط لهیدگی.....	۷۲

۷۳ ۷-۴ انرژی بر واحد طول اولیه
۷۵ فصل ۵- نتیجه گیری و
۷۵ پیشنهادات
۷۶ ۱-۵ نتیجه گیری
۷۷ ۲-۵ پیشنهادات
۷۸ مراجع
۸۰ پیوستها
۸۱ پیوست الف
۸۸ پیوست ب

فهرست شکل ها

عنوان.....	صفحه.....
شکل ۱-۱ محل قرار گیری سیستم جذب ضربه در پشت سپر خودرو	۱۲.....
شکل ۲-۱ مخزن سوخت هسته ای و نحوه قرار گیری جاذب های انرژی پیشنهادی در دو لایه	۱۳.....
شکل ۳-۱ الف- هندسه سیستم جذب انرژی ضربه به کار گرفته شده در NASA برای مخازن سوخت هسته ای ب- مرحله انبساط لوله ج- مرحله خمش لوله روی قالب د- شماتیک لوله و قالب و مراحل اولیه و نهایی جذب انرژی تحت بار محوری F و جابه جایی	۱۴.....
شکل ۴-۱ الف- مقایسه نمونه لهیده شده تجربی و شبیه سازی ب- منحنی نیرو - زمان تجربی و شبیه سازی	۱۶.....
شکل ۵-۱ لوله جدار نازک با مقطع مربع تحت بارگذاری مورب	۱۷.....
شکل ۷-۱ لوله های با مقطع دایره ای تحت فشار محوری	۱۸.....
شکل ۸-۱ نمونه های وارونش لوله یافته	۱۸.....
شکل ۹-۱ الف- منحنی بار - جابجایی برای پارگی محوری ب- نمونه های تحت پارگی	۱۹.....
شکل ۱۰-۱ الف) هندسه گوشه گرد قالب با شعاع های متفاوت $R=0,2.5,5,7.5,10$ and 20 ب) لوله های کامپوزیتی تغییر شکل یافته روی قالب با شعاع های متفاوت (ج) مقایسه منحنی های بار - جابه جای	۲۰.....
شکل ۱۱-۱ لهیدگی آکاردئونی لوله های جدار نازک آلومینیومی پر شده با فوم پلی استیرن و آلومینیوم	۲۱.....
شکل ۱۲-۱ مقایسه نتایج لهیدگی آکاردئونی لوله های جدار نازک آلومینیومی پر شده با فوم پلی استیرن	۲۱.....
شکل ۱۳-۱ مقایسه حالت تغییر شکل لوله خالی و پر شده با کرک	۲۲.....
شکل ۱۴-۱ شبیه سازی لهیدگی محوری لوله جدار نازک مربعی باریک شونده	۲۲.....
شکل ۱۵-۱ نمونه های جدار نازک فولادی استحکام بالا حین لهیدگی	۲۳.....
شکل ۱۶-۱ شبیه سازی لهیدگی محوری لوله های جدار نازک با مقطع چند ضلعی حین لهیدگی	۲۳.....
شکل ۱۷-۱ الف- شبیه سازی لوله ۸ ضلعی جدار نازک درز دار حین لهیدگی ب- مقایسه نمودار بار - جابجایی شبیه سازی و تجربی	۲۴.....
شکل ۱۹-۱ پدیده قارچی شدن لوله با دو ضخامت متفاوت الف - $t=0/78$ ب- $t=1/6$	۲۵.....
شکل ۲۰-۱ شماتیک و نمونه های آزمایش شده لهیدگی لوله های مربعی فولادی ساده و تقویت شده به وسیله جوشکاری ورق در راستای طول لوله	۲۵.....
شکل ۲۱-۱ لهیدگی محوری لوله های کامپوزیتی آلومینیوم/ فیبر شیشه ای حین آزمایش	۲۶.....
شکل ۲۲-۱ لهیدگی محوری لوله های جدار نازک دو جداره	۲۶.....
شکل ۲۳-۱ طرح شماتیک لوله های شیاردار (الف) شیار حلقوی خارجی (ب) شیار طولی داخلی	۲۶.....
شکل ۲۴-۱ ایجاد الگوی نوع a و b روی لوله های مربعی جدار نازک	۲۷.....
شکل ۱-۲ الف- نمونه تست کشش ساده (ب) منحنی تنش - کرنش مهندسی	۳۰.....
شکل ۲-۲ مشخصات هندسی نمونه	۳۱.....
شکل ۳-۲ تعدادی از نمونه های آزمایش پس از ماشینکاری	۳۳.....
شکل ۴-۲ نمایی از دستگاه پرس هیدرولیکی و رایانه متصل به آن	۳۴.....

- شکل ۲-۵ نمونه B4 حین آزمایش ۳۵
- شکل ۲-۶ نمونه A1 حین آزمایش ۳۶
- شکل ۲-۷ نمونه های آزمایش A1 و B4 پس از لهیدگی کامل، دید از بالا و روبرو ۳۷
- شکل ۳-۱ منحنی تنش- کرنش حقیقی نمونه های آزمایش ۴۰
- شکل ۳-۲ نحوه مدلسازی و المان بندی نمونه های شبیه سازی (الف) دو بعدی متقارن محور (ب) سه بعدی ۴۱
- شکل ۴-۱ مقایسه نحوه لهیدگی نمونه A7 با فاصله شیار $I = 22$ (الف) آزمایش تجربی (ب) شبیه سازی ۴۵
- شکل ۴-۲ مقایسه نحوه لهیدگی نمونه A5 با فاصله شیار $I = 16$ (الف) آزمایش تجربی (ب) شبیه سازی ۴۶
- شکل ۴-۳ مقایسه نحوه لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه B5 با فاصله شیار $I = 16$ ۴۷
- شکل ۴-۴ مقایسه نحوه لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه B7 با فاصله شیار $I = 22$ ۴۸
- شکل ۴-۵ نمونه A2 که به صورت دو بعدی متقارن محوری شبیه سازی شده است به همراه منحنی نیرو - جابه جایی آن در هر مرحله لهیدگی ۴۹
- شکل ۴-۶ مقایسه نمونه های شکل داده شده تجربی و شبیه سازی پس از لهیدگی محوری کامل از نمای بالا و روبرو (گروه آزمایشات A) ۵۲
- شکل ۴-۷ مقایسه نمونه های شکل داده شده تجربی و شبیه سازی پس از لهیدگی محوری کامل از نمای بالا و روبرو (گروه آزمایشات B) ۵۴
- شکل ۴-۸ منحنی های بار-جابجایی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه A ۵۷
- شکل ۴-۹ منحنی های بار-جابجایی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه B ۶۴
- شکل ۴-۱۰ نمودار نیروی آغاز لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه A ۷۰
- شکل ۴-۱۱ نمودار نیروی آغاز لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه B ۷۰
- شکل ۴-۱۲ مقایسه لهیدگی موثر تجربی نمونه های گروه A و B ۷۱
- شکل ۴-۱۳ نمودار نیروی متوسط لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه A ۷۳
- شکل ۴-۱۴ نمودار نیروی متوسط لهیدگی تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه B ۷۳
- شکل ۴-۱۵ نمودار مقایسه انرژی بر واحد طول اولیه تجربی و شبیه سازی نمونه های آزمایش گروه A و B ۷۴
- شکل پ ۱- نمونه های آزمایش گروه A پس از لهیدگی دید از بالا و روبرو ۸۱
- شکل پ ۲- نمونه های آزمایش گروه B پس از لهیدگی دید از بالا و روبرو ۸۵
- شکل پ ۳- مقایسه نمونه های شکل داده شده تجربی و شبیه سازی پس از لهیدگی محوری کامل از نمای جانبی (گروه آزمایشات A) ۸۸
- شکل پ ۴- مقایسه نمونه های شکل داده شده تجربی و شبیه سازی پس از لهیدگی محوری کامل از نمای جانبی (گروه آزمایشات B) ۹۰

فهرست جدول ها

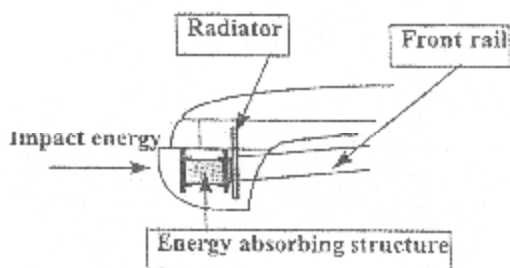
جدول ۱-۲ پارامترهای هندسی و ابعادی نمونه های گروه A.....	۳۲
جدول ۲-۲ پارامترهای هندسی و ابعادی نمونه های گروه B.....	۳۳
جدول ۱-۳ تغییرات نیروی آغاز لهیدگی براساس اندازه المان	۴۲
جدول ۱-۴ نوع لهیدگی نمونه های آزمایش گروه A.....	۵۶
جدول ۲-۴ نوع لهیدگی نمونه های آزمایش گروه B.....	۵۶

فصل ١

مقدمه

۱-۱ اهمیت استفاده لوله های جدار نازک به عنوان جاذب انرژی و کاربرد آنها

روز به روز آمار تصادفات که منجر به خسارات جانی و مالی می شود در سراسر جهان رو به افزایش می باشد. بنابراین صنایع خودروسازی در راستای ارتقای کیفیت محصولات خود به بالا بردن ایمنی وسایل نقلیه روی آورده اند. یکی از روش های افزایش ضریب ایمنی در خودرو ها حفاظت از جان سرنشینان و یا حداقل نمودن خسارات احتمالی وارد بر آنها به هنگام وقوع سوانح رانندگی می باشد. به همین منظور جذب انرژی ضربه ناشی از تصادفات باید مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. به طور کلی انرژی ضربه ناشی از تصادف با تغییر شکل پلاستیک بدنه جذب می شود. بنابراین ضربه پذیری^۱ سازه و بدنه خودرو مورد توجه قرار گیرد. منظور از سازه های ضربه پذیر، سازه هایی هستند که مقاوم و کاهنده اثر ضربه می باشند، به طوریکه با جذب انرژی ضربه به صورت برگشت ناپذیر، خسارات ناشی از ضربه را کاهش دهند و سلامت جان سرنشینان خودرو را حفظ نمایند. ضربه پذیری سیستم جذب انرژی به خاطر محدودیت در مقدار نیروی قابل تحمل و میزان تغییر شکل سیستم، دارای حالت بهینه ای می باشد که باید برای هر سیستم جذب انرژی ضربه بررسی و تعیین گردد. محدودیت در مقدار نیروی قابل تحمل به این دلیل است که با افزایش ظرفیت تحمل نیروی سیستم، این نیرو به سرنشینان وسیله نقلیه وارد شده و سلامت جان آنها را به خطر می اندازد. از طرف دیگر اگر به خاطر کاهش نیروی وارد به سرنشینان در سیستم جذب ضربه از مواد با استحکام پایین استفاده شود، سازه و بدنه خودرو دچار تغییر شکل های شدید شده که در آن حالت خسارات وارده قابل قبول نمی باشد. به خاطر این محدودیت ها بهتر است سیستم های جذب ضربه در قسمتهای حساس خودرو به کار برده شود. شکل ۱-۱ محل قرار گیری آنها را در پشت سپر خودرو نشان می دهد [۱].



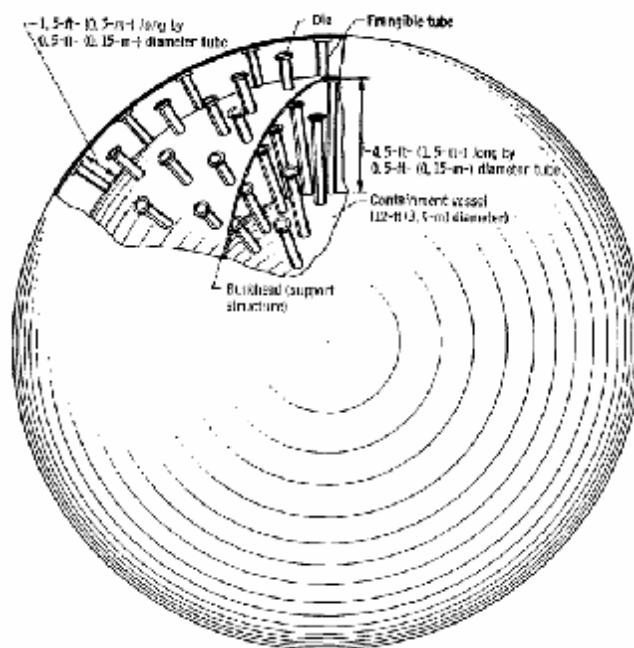
شکل ۱-۱ محل قرار گیری سیستم جذب ضربه در پشت سپر خودرو [۱].

ارزیابی کارایی سیستم های جذب ضربه با معیارهای متفاوتی انجام می شود. به عنوان مثال نسبت انرژی بر واحد جرم و انرژی بر واحد حجم یا طول، چند نمونه از این معیارها می باشند که پژوهشگران برای بررسی کارایی این سیستم ها استفاده می کنند. با توجه به پارامترهای جذب انرژی و

¹ Crashworthiness

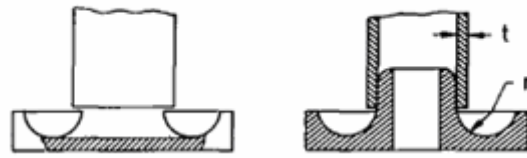
وزن لوله های جدار نازک به خاطر مقدار لهیدگی زیاد، وزن کم، فضای کم و پایداری بهتر به هنگام لهیدگی، ارزانی و دسترسی آسان، یکی از بهترین سیستم های جذب ضربه مورد توجه می باشند [۱]. کاربرد این قطعات نه تنها در پشت سپر، ستون و فرمان خودرو می باشد، بلکه در قسمتهای در معرض ضربه کشتی ها و قطارها و همچنین کف آسانسورها، هلیکوپترها و فضاپیماها به منظور نشست نرم، حفاظت از مواد بسته بندی شده و تجهیزات و همچنین مخازن سوخت نیز استفاده می شود.

به عنوان نمونه Richard و همکارانش [۲] در مرکز تحقیقات NASA از لوله های جنس ترد و شکننده^۱ به عنوان سیستم جذب انرژی ضربه احتمالی وارد به مخازن سوخت هسته ای هواپیما استفاده نموده اند. آنان یک مطالعه پارامتری به منظور تعیین حداقل وزن سیستم جذب انرژی انجام داده است. در شکل ۲-۱ مخزن سوخت هسته ای و نحوه قرار گیری جاذب های انرژی در دو لایه روی مخزن نشان داده شده است. در شکل ۳-۱ هندسه لوله و قالب و مراحل انبساط و خمش لوله روی قالب به کار رفته در این سیستم جذب انرژی و همچنین شماتیک لوله و قالب و مراحل اولیه و نهایی جذب انرژی تحت بار محوری F و جابه جایی S نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ مخزن سوخت هسته ای و نحوه قرار گیری جاذب های انرژی پیشنهادی در دو لایه [۲].

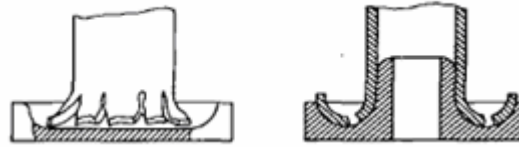
¹ Frangible



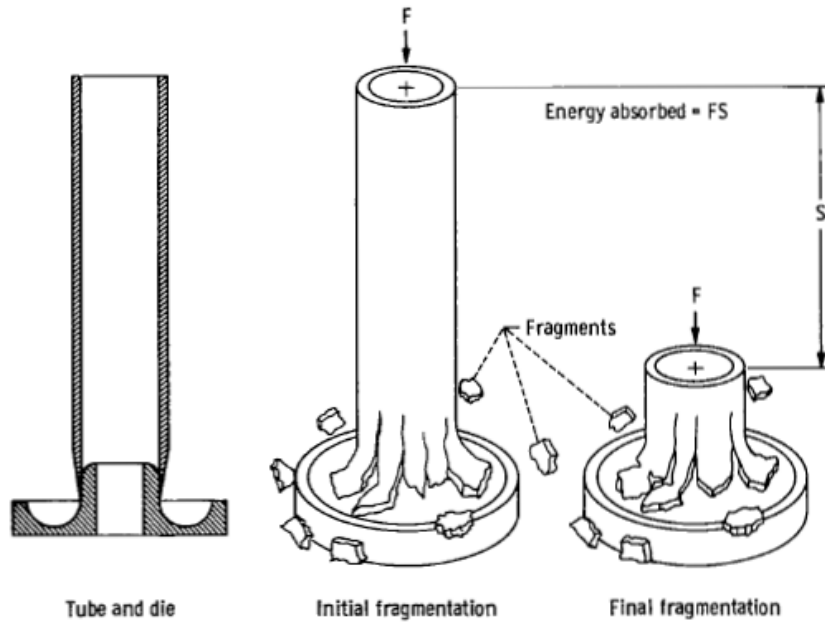
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱-۳ الف- هندسه سیستم جذب انرژی ضربه به کار گرفته شده در NASA برای مخازن سوخت هسته ای ب- مرحله انبساط لوله ج- مرحله خمش لوله روی قالب د- شماتیک لوله و قالب و مراحل اولیه و نهایی جذب انرژی تحت بار محوری F و جابه جایی S [۲].

۲-۱ انواع روشهای لهیدگی لوله ها

لهیدگی لوله ها به روش های گوناگونی اتفاق می افتد که در این بخش مهمترین آنها شرح داده می شوند.

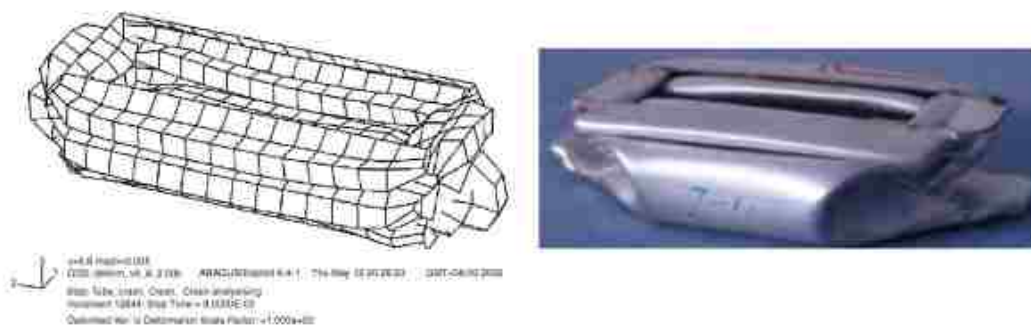
۱-۲-۱ فشار محوری

لوله ها تحت بارگذاری محوری به چهار حالت گوناگون تغییر شکل می دهند که عبارتند از:

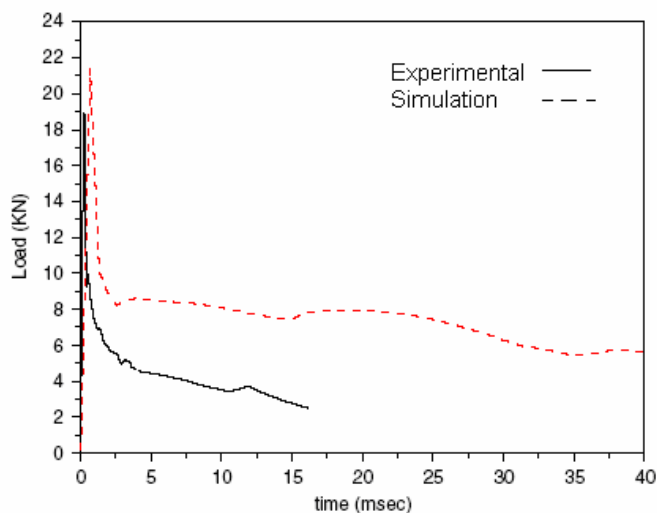
- آکاردئونی
- الماسی
- اولری
- خمه ی

تغییر شکل یا لهیدگی آکاردئونی نوعی از تغییر شکل پلاستیک است که در آن لوله به طور منظم و با حفظ تقارن محوری تغییر شکل پلاستیک پیدا می کند، به گونه ای که پس از پایان لهیدگی تحت بارگذاری محوری لوله به صورت یک آکاردئون درمی آید. لهیدگی الماسی به حالتی از تغییر شکل پلاستیک مربوط می شود که حین لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک لوله تقارن خود را نسبت به محور لوله از دست داده و شکل نامنظمی حین لهیدگی پیدا می کند. بنا بر نتایج بدست آمده برای لوله های جدار ضخیم تغییر شکل آکاردئونی محتمل تر بوده در حالیکه تغییر شکل الماسی بیشتر برای ضخامت های کمتر و لوله های جدارنازک اتفاق می افتد. همچنین تغییر شکل اولری و خمه ی به ترتیب به حالت ایجاد کمانش اولری و خمه ی (بشکه ای) شدن در لوله گفته می شود.

Qiao و همکارانش [۳] روی لهیدگی لوله های جدارنازک آلومینیومی با مقطع مربع تحت بارگذاری محوری کار کرده اند و نتایج حاصل از شبیه سازی را با آزمایشات تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار داده اند و تطابق خوبی میان نتایج شبیه سازی و تجربی بدست آورده اند. در شکل ۴-۱ مقایسه کیفی و کمی نتایج تجربی و شبیه سازی ایشان آورده شده است.



(الف)

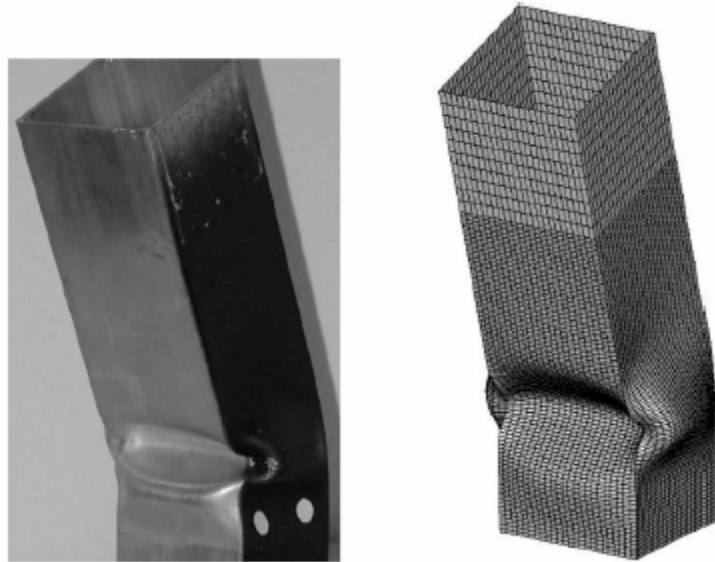


(ب)

شکل ۱-۴ الف- مقایسه نمونه لهیده شده تجربی و شبیه سازی ب- منحنی نیرو - زمان تجربی و شبیه سازی [۳].

۲-۲-۱ بارگذاری مورب

با توجه به اینکه در عمل به جای برخورد مستقیم، احتمال برخورد غیر مستقیم یا مورب نیز وجود دارد، تعدادی از پژوهشگران روی لهیدگی لوله های جدار نازک تحت بارگذاری محوری کار نموده اند. از آن جمله می توان Reyes و همکارانش [۴] را نام برد که تحقیقات خود را در زمینه جذب انرژی در لوله های جدار نازک آلومینیومی با مقطع مربعی تحت بارگذاری مورب انجام داده اند. آنان نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار LS-DYNA را با نتایج آزمایشات تجربی مقایسه نموده اند. نتایج آنها نشان می دهد که شبیه سازی نیروی آغاز لهیدگی به خوبی پیش بینی می کند، در حالیکه نیروی متوسط لهیدگی حاصل از شبیه سازی تا حدی با نتایج تجربی مطابقت می کند. در شکل ۱-۵ نتایج تجربی و شبیه سازی لوله آلومینیومی جدار نازک مربعی را حین لهیدگی ناشی از بارگذاری مورب نشان داده شده است. همچنین Thambiratnam و همکارانش [۵] روی بارگذاری مورب لوله با مقطع مربعی باریک شونده مطالعه نموده اند و به این نتیجه رسیده اند که میزان انرژی جذب شده و نیروی متوسط لهیدگی تا حد قابل توجهی با افزایش زاویه اعمال بار بر لوله افزایش می یابد. شکل ۱-۶ نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایش انجام شده توسط آنان را برای لوله های باریک شونده با مقطع مربعی را حین لهیدگی مقایسه شده است.



شکل ۱-۵ لوله جدار نازک با مقطع مربع تحت بارگذاری مورب [۴]



شکل ۱-۶ لوله جدار نازک باریک شونده با مقطع مربع تحت بارگذاری مورب [۵]

۳-۲-۱ فشار جانبی

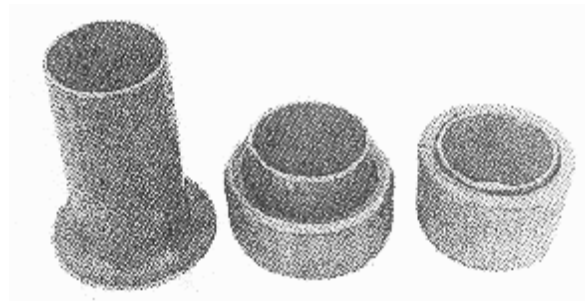
یکی از روشهای جذب انرژی به کاربردن لوله های جدارنازک تحت فشار جانبی می باشد. Olabi [۶] یکی از پژوهشگرانی است که تحقیقات خود را در این زمینه متمرکز کرده است. وی با انجام آزمایشات تجربی و شبیه سازی به این نتیجه رسیده است که قرارگیری چند لوله به طور موازی داخل یکدیگر سیستم کارایی در جذب انرژی حین لهیدگی ارائه می دهد. در شکل ۱-۷ این سیستم حین لهیدگی نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ لوله های با مقطع دایره ای تحت فشار محوری [۶]

۴-۲-۱ وارونش^۱

وارونش لوله عبارتست از فشردن لوله در راستای محوری بر روی قالب به طوریکه سر آن به درون یا به بیرون چرخیده و در ادامه جداره ای جدید در داخل و یا خارج لوله اولیه و به موازات آن تشکیل شود. شکل ۸-۱ تعدادی از نمونه های وارونش یافته لوله را نمایش داده است.

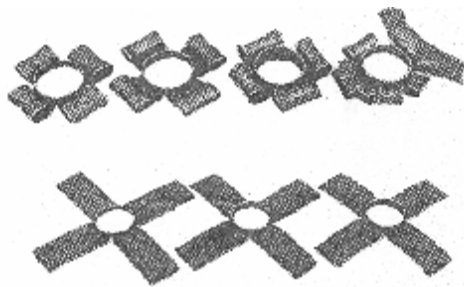


شکل ۸-۱ نمونه های وارونش لوله یافته [۱].

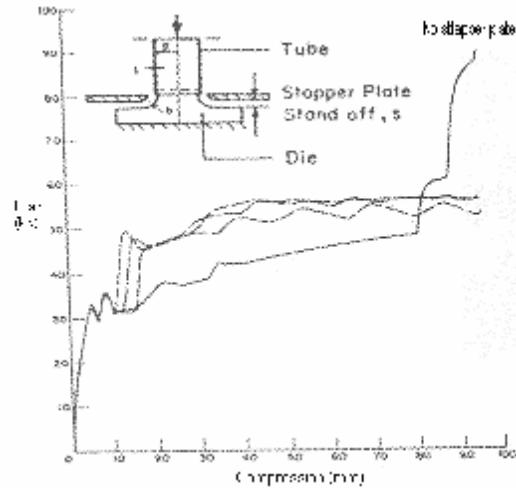
۵-۲-۱ پارگی محوری

در صورتیکه لوله به داخل قالب با شعاع متغیر فشرده شود، لبه های لوله بر اثر کشش محیطی بیش از حد شکافته شده و پارگی محوری رخ می دهد. پارگی محوری زمانی اتفاق می افتد که در وارونش پارامترهای متالورژیکی و ابعادی لوله با شعاع قالب در یک محدوده مشخص نباشد در این حالت ترک در لبه ها ایجاد می شود و گسترش می یابد. پارگی محوری به خودی خود به عنوان یک مکانیزم جذب انرژی عمل می کند. در شکل ۹-۱ منحنی های بار - جابه جایی و نمونه هایی که تحت پارگی محوری قرار گرفته اند آورده شده است.

¹ Inversion



(ب)

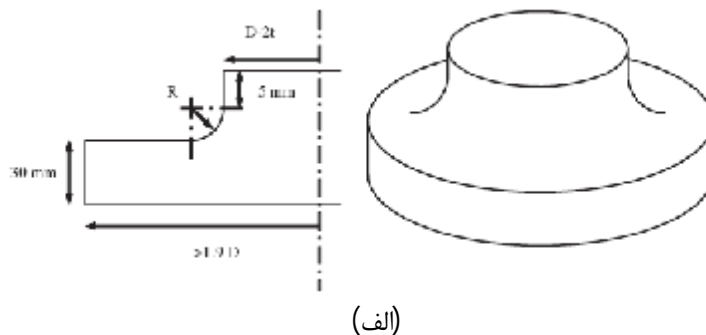


(الف)

شکل ۹-۱ الف- منحنی بار - جابجایی برای پارگی محوری ب- نمونه های تحت پارگی [۱]

۳-۱ مروری بر دیگر تحقیقات انجام شده

Warrior و همکارانش [۷] در مورد جذب انرژی در لوله های کامپوزیتی پلیمری تحت بارگذاری محوری با استفاده از یک قالب با هندسه نشان داده شده در شکل ۱۰-۱ (الف) کار کرده اند. در شکل D قطر خارجی لوله و t ضخامت جداره لوله می باشد. آنان ضمن انجام آزمایشات برای نسبت های $\frac{R}{t}$ گوناگون، دریافته اند که بیشترین جذب انرژی در نسبت های $\frac{R}{t}$ کمتر از ۱ صورت می گیرد.



(الف)