

بررسی تجربی و عددی جذب انرژی لوله‌های جدار نازک موج‌دار و دارای سوراخ جانبی تحت ضربه محوری

ابراهیم سالک^۱، علیرضا نداف اسکوی^۲، مجتبی قمری زاده^{۳*}، روح‌الله حسینی^۴، خداداد واحدی^۵

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۵- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷)

چکیده

در این مقاله به بررسی جذب انرژی در لوله‌های موج‌دار جدار نازک با و بدون سوراخ به روش تجربی و عددی پرداخته شده است. لوله‌های جدار نازک موج‌دار با و بدون سوراخ برای جذب انرژی ضربه محوری یک وزنه استفاده شده است. این لوله‌ها با کمانش پلاستیک نامتقارن، در هنگام برخورد جسم ضربه زنده، نیروی ناشی از ضربه را در خود جذب می‌نمایند. در صورتی که نیروی جسم ضربه زنده از حداقل نیروی میانگین کمانش بیشتر باشد، لوله دچار فرورفتگی شده و طول آن کاهش می‌یابد. میزان فرورفتگی لوله به انرژی وارد شده به آن، مشخصات هندسی و جنس لوله بستگی دارد. در این مقاله نشان داده می‌شود که با سوراخ کردن لوله جدار نازک برای جذب انرژی ضربه یکسان، طول جمع شدگی با افزایش همراه است و هرچه طول جمع شدگی بیشتر باشد، از میزان نیروی اولیه کاسته می‌شود و به عبارت دیگر امکان کنترل نیرو و آسیب فراهم می‌شود. انطباق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد.

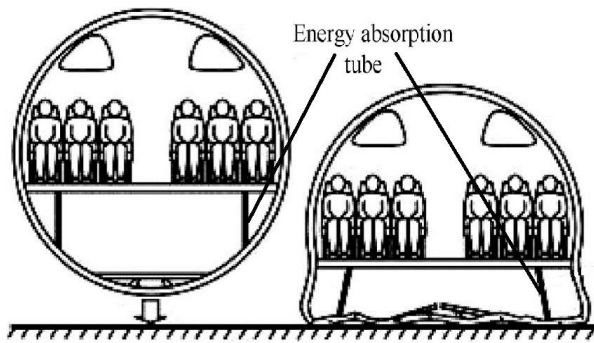
واژه‌های کلیدی: جذب انرژی، لوله جدار نازک موج‌دار، ضربه محوری

Experimental and numerical investigation of energy absorption of corrugated thin-walled tubes with lateral holes under axial impact

Abstract

In this article, the study of energy absorption in thin-walled corrugated pipes with and without holes has been investigated experimentally and numerically. Corrugated thin wall tubes with and without holes have been used to absorb the axial impact energy of a weight. These tubes absorb the force of the impact with asymmetric plastic buckling. If the force of the impacting object is greater than the minimum average buckling force, the tube will be dented and its length will decrease. The amount of pipe depression depends on the energy input to it, the geometric characteristics and the material of the pipe. In this article, it is shown that by piercing the thin-walled tube to absorb the same impact energy, the length of contraction is associated with an increase, and the longer the length of contraction is, the amount of initial force is reduced, and in other words, the possibility of force and damage control is provided. There is a good agreement between experimental and simulation results.

Key words: Energy absorption, corrugated thin-walled tubes, perforated, axial impact



شکل ۱ - کاربرد جاذب‌های لوله‌ای در هواپیما

الکساندر [۱] نخستین محقق جداره‌های دایره‌ای بود که با ارائه الگوی فروریزش متقارن در اطراف لوله، نیروی میانگین چین‌خوردگی را به صورت یک تئوری تقریبی و برای یک حالت ایده آل محاسبه نمود. آلفرد [۲] مدهای چین‌خوردگی نامتقارن را به روش تجربی اریگامی بررسی نمودند. جانسون و همکارانش [۳] تئوری مد نامتقارن را بر اساس هندسه چین‌خوردگی گسترش داده و نیروی فروریزش میانگین محوری را پیش‌بینی نمودند. هوانگ و همکاران [۴] به مطالعه عددی ورق‌های استوانه‌ای با جداره سوراخ بیضوی شکل تحت بارگذاری ضربه‌ای و تأثیر جداره آن بر ظرفیت جذب و فروریزش سازه پرداختند. وجود این حفره‌های بیضی‌شکل در جداره‌ها باعث کاهش نیروی بیشینه اولیه شده است. سونگ و همکاران [۵] به بررسی جاذب‌هایی با جداره مقطع مربع جهت کاهش وزن سازه پرداختند. این الگو سبب کاهش نیروی بیشینه اولیه و افزایش میزان جذب انرژی و لهیدگی زودتر شده است. ژو یانگ و همکاران [۶] به بررسی جذب انرژی لوله‌های دایره‌ای تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند و اثرات نرخ کرنش مواد را بر نیروی میانگین لهیدگی بررسی کردند. نتایج بدست آمده حاکی از انطباق مناسب نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی عددی دارد. نیک نژاد و همکاران [۷] به پیش‌بینی نیروی لهیدگی بیشینه در ستون‌هایی چهار وجه و مقایسه با ستون پر شده با فوم، پرداختند. محاسبات نظری انجام‌شده در نمودار نیرو جابه‌جایی، مطابقت خوبی نسبت به تست‌های تجربی انجام‌شده در مقالات تجربی داشته است. گراسیانو و همکاران [۸] از جاذب‌های انرژی سوراخ‌کاری شده جهت اعمال بارگذاری شبه استاتیک و محاسبه نیروی فروریزش و ظرفیت جذب انرژی جاذب پرداختند. این مطالعه نشان داد که ظرفیت جذب انرژی جاذب و یا کاهش نیروی بیشینه اولیه به تعداد

مقدمه

از موضوعات مهم در مهندسی مکانیک، جذب انرژی در سازه‌هایی است که در مواجهه با ضربه از خود تغییر شکل نشان می‌دهند. لوله‌هایی که نسبت قطر به ضخامت D/t آن‌ها از عدد ۹۰ بیشتر باشند، به لوله جدار نازک مشهور هستند. جنس این لوله‌ها می‌تواند از ورق گالوانیزه، آلومینیوم و غیره باشد. در صورتی که جسم ضربه زنده در راستای محور طولی لوله به آن برخورد نماید و سایر مشخصات هندسی آن از تقارن محوری برخوردار باشد، کمانش و چروکیدگی آن در راستای محور طولی خواهد بود. هر چقدر انرژی ضربه بیشتر باشد، لوله دچار فرورفتگی بیشتری خواهد شد. انرژی ضربه به وزن و ارتفاع جسم ضربه زنده بستگی دارد.

از دیگر موارد تأثیرگذار بر روی میزان چروکیدگی لوله، مشخصات هندسی لوله از جمله قطر و ضخامت آن می‌باشد. چروکیدگی جداره لوله‌ها در اثر کمانش در جداره و ایجاد حداقل دو لولای پلاستیک در آن است. نیروی محوری وارد شده بر لوله سبب ایجاد گشتاور پلاستیک شده و با تبدیل انرژی ضربه به کار لازم جهت ایجاد گشتاور پلاستیک، انرژی آن را دفع می‌کند. طول بازوی چروکیدگی به مشخصات هندسی لوله از جمله قطر و ضخامت آن بستگی دارد. هر چه انرژی ضربه زنده بیشتر باشد، تعداد چروکیدگی در طول لوله افزایش می‌یابد. فلسفه استفاده از لوله‌های جدار نازک تنها دفع انرژی ضربه نیست، زیرا در هر صورت کل انرژی ضربه زنده با هر نوع جاذب نیرویی جذب می‌شود. بلکه استفاده از لوله‌های جاذب نیرو، جهت کنترل نیروی ضربه زنده مناسب است. به این معنا که نیروی ضربه زنده، در صورتی که در زمان بیشتری دفع شود، سبب کاهش نیرو اولیه بیشینه و جلوگیری از ضربه مرگ‌آور با معیار جهانی HIC15 (معیار ضربه مغزی) می‌گردد. پس در صورتی که انرژی ثابت، در زمان طولانی‌تر به جسمی وارد گردد، سبب کاهش صدمات وارده خواهد شد. در بحث سوراخ‌کاری متقارن لوله‌ها، افزایش میزان جذب انرژی مدنظر نیست بلکه روشی برای کنترل انرژی و کاهش نیروی انتقالی جهت کاهش صدمات وارده می‌باشد. از این روش در بسیاری از جاذب‌های ضربه مانند شاسی خودرو، ضربه‌گیرهای سقوط آسانسور و هواپیما و دیگر موارد مطابق شکل ۱ می‌تواند توسط طراحان به کارگیری شود.

سلول‌های جداره و نوع سطح مقطع از لحاظ شکل دایروی و مربعی بستگی دارد. همچنین مشخص شد که رفتار جاذب مربعی شبیه به رفتار جاذب استوانه سوراخ‌دار می‌باشد. همچنین در نمونه لوله سوراخ‌دار، پاسخ سازه به جهت قرارگیری جداره پنجره بستگی دارد. زاویه مناسب جداره سوراخ‌شده به افزایش ظرفیت جذب و جلوگیری از ایجاد کماتش اولیری کمک بسزایی می‌کند. در آزمایش‌های تجربی دیگر دامغانی و همکاران [۹] نشان دادند که با استفاده از ستون‌های سوراخ‌دار، ظرفیت جذب انرژی بیشتر می‌شود. این آزمایش توسط سقوط آزاد وزنه به انجام رسید و در روش عددی توسط نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی صورت گرفته است. سانگ و همکاران [۱۰] اثر جداره را بر روی لوله‌های مربعی با دیواره نازک بررسی نمودند. نتایج تجربی نشان داد، لوله‌های جداره دار علاوه بر وزن کمتر، نیروی بیشینه را کاهش داده و جذب انرژی را افزایش داده‌اند. سینگاس و همکاران [۱۱] از قالب پیش فرم جهت ایجاد رینگ موجدار به منظور فروپاشی متقارن لوله‌های جدار ضخم، استفاده نمودند. تست‌های آزمایشگاهی نشان داد که جذب انرژی بهبود یافته است. باوانشارو و همکاران [۱۲] رفتار لوله جدار ضخم که درون آن پلیمر تقویت‌شده با فیبر شیشه قرار داشت را تحت فشار محوری بررسی نمود و متوجه شد که این روش اثر مثبتی در استحکام نهایی و شکل‌پذیری لوله در ایجاد کماتش پافیلی لوله‌های فولادی توخالی دارد. یاب و همکاران [۱۳] آزمایش فشار شبه استاتیک را بر روی لوله‌های جدار نازک آلومینیومی و مربعی انجام دادند و روابط تنش بدست آمده را با دیگر محققان مقایسه نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد عملکرد لوله‌های دایروی ۵۷٪ بهتر از قوطی مربعی بوده و انرژی جذب‌شده توسط لوله‌های دایروی دو برابر مقطع مربعی می‌باشد. علوی نیا و همکارانش [۱۴] و [۱۵] به بررسی ظرفیت جذب انرژی لوله‌های جدار نازک با شکل مقطع دایروی، مربعی، مستطیل، شش‌ضلعی، هرمی و مخروطی، به صورت تجربی و عددی پرداختند. نتایج تست‌های شبه‌استاتیک نشان داد که هندسه مقطع تأثیر قابل توجهی بر جذب انرژی دارد. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که لوله‌های دایروی بیشترین ظرفیت جذب را دارا هستند. سوپیان و همکارانش [۱۶] از الیاف کامپوزیت جهت تقویت جداره لوله‌هایی با مقاطع دایره و مربع، که توسط فوم آلومینیومی جهت جذب انرژی پر شده بودند،

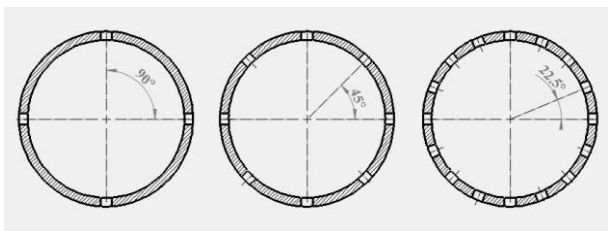
استفاده نمودند. این سازه باعث کاهش نیروی بیشینه اولیه شده و کنترل جذب انرژی به صورت کماتش متقارن صورت گرفته است. قمریان و همکارانش [۱۷] به بررسی تجربی و عددی لوله‌های مخروطی و مقایسه آن با لوله پر شده با فوم پلیمری پرداختند. نتایج نشان داد قابلیت جذب انرژی در لوله‌های پلیمری بهبود یافته است. در اسناد ایالات متحده [۱۸] در یک سیستم سپر خودرو از جاذب‌های دوکی شکل جهت جذب انرژی ناشی از تصادفات استفاده شده است. کالاشتی و همکاران [۱۹] از قوطی‌های جداره نازک مربع با جنس آلومینیوم به عنوان جذب‌کننده انرژی در شبیه‌سازی عددی بارگذاری محوری دینامیک و شبه‌استاتیک، جهت محاسبه نیروی بیشینه استفاده نمودند. آنه‌ماری و همکاران [۲۰] از لوله‌های دایروی با پوششی از الیاف شیشه / اپوکسی با هسته‌های پلیمری فوم جهت جذب انرژی استفاده نمودند. نسبت ضخامت دیواره به قطر در لوله‌های پر شده با فوم، بهینه‌سازی شده و از قابلیت بالایی در جذب انرژی برخوردار شده است. پرونی و همکاران [۲۱] با استفاده از قوطی‌های مربع شکل که مقطع آن‌ها از صفحات خم‌شده دوتکه ساخته شده بود، جهت جذب انرژی دینامیکی ضربه استفاده نمودند. صفحات خم‌شده دوتکه توسط جوش و با ترکیب متفاوت به یکدیگر متصل شده‌اند. ایجاد اتصالات جوش در تشکیل سطح مقطع، تأثیر بسزایی در کاهش نیروی بیشینه و میانگین به نمایش گذاشته است. مظفری و همکاران [۲۲] جهت جذب حداکثر انرژی، لوله‌ای با ساختار موج‌دار دوطرفه پیشنهاد کردند، که نسبت به مدل موجدار یک‌طرفه ۳۲ درصد جذب انرژی را بهبود بخشید. لو ژین و همکاران [۲۳] در یک مطالعه عددی به بررسی قانون جذب لوله‌های جدار نازک با جنس‌های مختلف پرداخته و جهت افزایش انرژی ویژه، نسبت ارتفاع به قطر با دیواره ضخم را تعیین نمودند. ژانگ و همکاران [۲۴] به بررسی لوله‌های چند سلولی که با لوله‌های استوانه‌ای در مرکز هر سلول قرار گرفته، پرداختند. در این مقاله لوله شش سلولی با جداره هشت ضلعی بیشترین عملکرد را در جذب انرژی ناشی از ضربه داشته است. سان و همکاران [۲۵] به بررسی سازه‌های جاذب انرژی با دیواره نازک از جنس آلومینیوم و کامپوزیت، که به صورت زاویه‌دار بر روی فیکسرها خاص قرار گرفته بودند، پرداخته و زاویه مناسب جهت بارگذاری استاتیکی بدست آمده است. وانگ‌ژو و همکاران [۲۶] به بررسی عددی و تجربی

نوآوری در این مقاله است که در تحقیقات قبلی مورد بررسی محققان قرار نگرفته است.

مطالعه تجربی

در این بخش از مقاله به بررسی آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی نمونه‌ها مورد مطالعه پرداخته می‌شود. نمونه‌های مورد نظر لوله‌هایی استوانه‌ای شکل هستند که دارای به‌منظور کمک به عملکرد بهتر جذب انرژی در انتقال یکنواخت ضربه و توزیع یکنواخت نیروی وارد بر آن، دارای یک انتهای بسته و یک انتهای رینگ دار هستند. وزن هر لوله جدار نازک در حدود ۸۳ گرم و دارای قطر ۹۹ میلی‌متر، طول ۱۲۲ میلی‌متر و با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر می‌باشند. لوله در نزدیکی دو انتها دارای موج هستند و سبب استحکام جانبی آن‌ها می‌گردد.

فرآیند سوراخ‌کاری لوله‌ها به معنای شبکه‌دار شدن جداره آنها توسط سوراخ‌هایی با قطر و آرایش دلخواه می‌باشد. قطر سوراخ‌ها، زاویه قرارگیری سوراخ‌ها در هر مقطع و تعداد مقاطع سوراخ‌کاری شده و همچنین فاصله آنها از یکدیگر می‌تواند به عنوان متغیرهایی برای بررسی عملکرد این نوع از جاذب‌ها شناخته شود. شکل ۲ لوله سوراخ‌کاری شده به‌وسیله مته ۶/۵ را نشان می‌دهد. سوراخ‌کاری توسط دریل دستی به‌گونه‌ای انجام شده است که هیچ‌گونه تغییر شکل و تقعر در بدنه لوله ایجاد نشود. به‌موجب سوراخ‌کاری انجام‌گرفته، وزن لوله خیلی نامحسوس کاهش می‌یابد.



شکل ۲ - چیدمان‌های مختلف سوراخ‌کاری

لوله‌های جدار نازک با مقطع ستاره‌ای شکل با جنس آلومینیوم تحت ضربه محوری پرداخته و با پیشنهاد سطح مقطع جدید تا ۴۰ درصد جذب انرژی ویژه افزایش یافته است. عیوضیان و همکاران [۲۷] به بررسی تاثیر موج‌ها بر رفتار فرونشست و جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی با مقطع دایره‌ای پرداختند. در این بررسی پنج نمونه لوله ساده و موج‌دار مورد بارگذاری محوری شبه‌استاتیک قرار گرفتند، مشخص شد که در لوله‌های موج‌دار حالت فرونشست قابل پیش‌بینی و کنترل شونده‌تر بوده و با بهبود قابلیت جذب انرژی همراه است. مرادپور و همکاران [۲۸] به راهکار جدید و کارآمد جهت افزایش ظرفیت جذب انرژی محوری شبه‌استاتیک، توسط لوله‌های جدار نازک آلومینیومی پرداختند. در این راهکار با سوراخ کردن چند ردیفه، که در هر ردیف تعداد سوراخ و قطر سوراخ قابل تغییر می‌باشد، انرژی جذب شده به وزن لوله متقارن بهبود یافته و آزمایش‌ها نشان داد که در صورتی که لوله‌ها در پنج ردیف و در هر ردیف سوراخ‌ها ۱۲ عدد و قطر سوراخ ۶ میلی‌متر باشد، عملکرد جذب انرژی بهبود مطلوبی یافته است. این ساختار برای لوله‌های فولادی نرم نیز اعمال گردیده است. آکار و همکاران [۲۹] با استفاده از لوله‌های جدار نازک چند سلولی آلومینیومی، به بهینه‌سازی جذب انرژی ویژه از طریق نرم‌افزار LS-DYNA پرداختند. منصور و همکاران [۳۰] به بررسی پیکره‌بندی لوله‌های فلزی تقویت شده با لایه فایبر گلاس در شرایط بارگذاری دینامیکی با سرعت پایین پرداختند. مطالعات پارامتریک نشان داده است که افزایش ضخامت دیواره آلومینیومی باعث جذب انرژی ویژه بالاتر شده و افزایش لایه‌ها قابلیت جذب انرژی در تصادف را بالا برده است. ها و لو [۳۱] با بررسی لوله‌های موج‌دار نشان دادند که سازه‌های جدار نازک موج‌دار در جذب انرژی کارآمدتر و موثرتر عمل کرده و در آینده در سازه‌های مهندسی پیشرفته، بیشتر بکار برده خواهند می‌شوند.

با بررسی تحقیقات انجام‌شده، این نتیجه حاصل شد که جذب انرژی ضربه محوری توسط لوله‌های موج‌دار موضوعی کاربردی در صنعت است. مهم‌ترین نوآوری این موضوع به‌کارگیری لوله‌های موج‌دار و دارای سوراخ است. لوله‌ها در یک یا چند ردیف دارای سوراخ هستند و در هر ردیف نیز تعداد سوراخ‌ها متفاوت است. علاوه بر این بررسی دو آلیاژ پرکاربرد فولاد و آلومینیوم و تنوع هندسه‌های لوله‌ها جنبه‌های دیگری از

کاهش می‌یابد. در ارتفاع ۱ متری میزان فرورفتگی به مقداری است که اثرات سوراخ‌کاری در تست‌ها قابل‌مشاهده و ارزیابی دقیق‌تری می‌شود. در شکل ۴ از راست به چپ به ترتیب لوله‌های موجدار بدون سوراخ قبل از ضربه و سپس بعد از ضربه با سقوط وزنه از ارتفاع‌های ۱ متر، ۲ متر و ۳ متر ارائه شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که فرورفتگی در لوله‌های جاذب انرژی بیشتر به صورت طولی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین کاملاً طبیعی است که با افزایش انرژی مکانیکی ضربه زننده طول تغییر شکل لوله نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴ - قوطی خام، پس از تست سقوط یک متر، دو متر و سه متر

در شکل ۵ نیز چهار تست برای لوله‌هایی انجام شده است که در ارتفاع یک متر تحت ضربه وزنه ۶/۸ کیلو گرمی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که از کدگذاری نمونه‌ها مشاهده می‌شود، در این نمونه‌ها قطر سوراخ‌ها مشابه هستند و زوایای سوراخ‌کاری و فاصله ردیف‌های سوراخ‌ها باهم متفاوت است.



شکل ۵ - آزمایش لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار در ارتفاع یک متر

نمونه‌های مورد مطالعه در تست‌های تجربی که شامل ۳ نمونه سوراخ‌دار و ۳ نمونه بدون سوراخ است، به صورت جدول ۱ گروه‌بندی و کدگذاری شده‌اند. همه نمونه‌ها تحت اثر ضربه وزنه‌ای به جرم ۶/۸ کیلوگرم است. نمونه‌های سوراخ‌دار از ارتفاع ۱ متری تحت اثر ضربه وزنه ضربه‌زن قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که داده‌برداری در تست‌های تجربی به صورت برخط نمی‌باشد و میزان فرورفتگی لوله‌ها بعد از سقوط آزاد وزنه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به ثابت بودن جرم وزنه سقوط (۶/۸ کیلوگرم) و همچنین ارتفاع سقوط (۱ متر)، میزان

جهت گروه‌بندی، سهولت در شناسایی و تفکیک نمونه‌های تست‌شده از یکدیگر، از یک کدگذاری دو خطی بر روی نمونه‌ها استفاده شده است. در خط اول، عدد کنار W جرم وزنه سقوط کننده و عدد کنار H ارتفاع سقوط وزنه و Q زاویه سوراخ‌کاری در یک مقطع را نشان می‌دهد. زاویه سوراخ‌کاری بیان دیگری از تعداد سوراخ‌ها در هر ردیف است. در خط دوم n تعداد ردیف سوراخ‌ها و h فاصله ردیف‌ها از یکدیگر و d قطر سوراخ را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در نمونه‌ای که در خط اول کدگذاری آن عبارت W6.8H1.0Q45 و در خط دوم کدگذاری آن عبارت n2d8h16 درج شده است، دارای جرم وزنه سقوط کننده ۶/۸ کیلوگرم در ارتفاع سقوط ۱ متری است که دارای ۲ ردیف سوراخ با زوایای ۴۵ درجه است که قطر سوراخ‌ها و فاصله ردیف سوراخ‌ها از هم به ترتیب ۸ و ۱۶ میلی‌متر است.

نحوه انجام تست‌های تجربی

برای انجام تست‌های تجربی از دستگاه سقوط وزنه در آزمایشگاه ضربه دانشگاه مطابق شکل ۳ استفاده شده است.



شکل ۳ - دستگاه سقوط آزاد

جهت دستیابی به ارتفاع مناسب تست‌ها، نمونه‌هایی در سه ارتفاع مختلف ۱ و ۲ و ۳ متری با سقوط آزاد وزنه ۶/۸ کیلوگرمی مورد آزمایش قرار گرفته است. مشاهدات نشان می‌دهند که در دو ارتفاع ۲ و ۳ متر، فرورفتگی قوطی بسیار زیاد می‌باشد و امکان مشاهده اثرات سوراخ‌کاری در تست‌ها



شکل ۶ - شبیه‌سازی یک‌به‌یک در نرم‌افزار سه بعدی

در جدول ۲ نوع المان، نوع برخورد و نوع کنترل برای لوله جاذب انرژی و وزنه ضربه زن (چکش) در برنامه شبیه‌سازی ارائه شده است. مقرر نشیمن‌گاه لوله از همان جنس المان چکش در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ - نوع المان برای لوله و چکش

نام قطعه	نوع المان	نوع برخورد	نوع کنترل
لوله	SHELL	AUTOMATIC-	IMPLICIT_buckle
وزنه ضربه زن	SOLID	GENERAL	IMPLICIT_inertia_Relief

در جدول ۳ خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده وزنه، مقرر قرارگیری و لوله جاذب انرژی ارائه و در بخش تعریف خواص مواد برنامه تعریف شده است. این جدول بر اساس دیمانسیون در نظر گرفته شده برای نرم‌افزار LS-Dyna است. جنس لوله‌های مورد مطالعه فولاد نورد شده St12 است و جنس جسم ضربه‌زننده از ماده تغییر شکل ناپذیر فولاد در نظر گرفته شده است.

در این جدول C و P پارامترهای معرفی شده در رابطه معروف و شناخته شده تنش تسلیم دینامیکی کوپر-سیموندز است.

جدول ۳ - خواص مکانیکی برای لوله و چکش [۳۲]

لوله		چکش و مقر
جنس	فولاد نورد شده	فولاد (جسم صلب)
رفتار ماده	St12 PIECEWISE_LINE AR_PLASTICITY* [mild iron]	RIGID* [Steel]
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۷۱۲۰	۷۸۰۰
ضریب پواسن	۰/۲۶	۰/۳
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۱۲۰	۲۰۰
تنش تسلیم	۳۰۰	-

جذب انرژی نیز ثابت خواهد بود و هرچقدر میزان فرورفتگی نمونه در اثر ضربه بیشتر باشد به معنای آن است که زمان اعمال نیرو افزایش یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فرورفتگی در شرایط یکسان با کاهش میزان ضربه همراه است. جهت دریافت نتایج حاصل از تست تجربی، تغییر طول ایجاد شده بر اثر برخورد وزنه، توسط کولیس اندازه‌گیری می‌شود.

جدول ۱ - گروه‌بندی نمونه‌ها در مطالعه تجربی

نمونه	ارتفاع	زوایه	ردیف	کد تست
بدون سوراخ	۱	-	-	W6.8H1.0Q0 n0d0h0
بدون سوراخ	۲	-	-	W6.8H2.0Q0 n0d0h0
بدون سوراخ	۳	-	-	W6.8H3.0Q0 n0d0h0
سوراخ‌دار	۱	۹۰	۵	W6.8H1.0Q90 n5d6.5h20
سوراخ‌دار	۱	۹۰	۴	W6.8H1.0Q90 n4d6.5h25
سوراخ‌دار	۱	۴۵	۴	W6.8H1.0Q45 n4d6.5h25

شبیه‌سازی عددی

در این مقاله علاوه بر روش تجربی از شبیه‌سازی و روش عددی هم برای ارزیابی پارامترهای مختلف جذب انرژی لوله‌های استوانه‌ای استفاده شده است. از برنامه اجزاء محدود LS_Dyna جهت مطالعات پارامتری و شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه و صحت سنجی شده‌اند. پس از صحت سنجی و اطمینان از صحت نتایج نمونه‌های شبیه‌سازی، مطالعه پارامتری نمونه‌های بیشتری به روش عددی انجام شده است. مراحل انجام شبیه‌سازی با مدل‌سازی و پیکره‌بندی لوله استوانه‌ای جاذب انرژی و وزنه ضربه زن، مش بندی، اعمال شرایط مرزی به همراه تعریف جنس، ضریب اصطکاک بین بخش‌های مختلف جاذب انرژی و شرایط اولیه اجزاء شده است.

در شکل ۶ مدل یک‌به‌یک اجزاء محدود یک نمونه لوله استوانه‌ای بدون سوراخ نشان داده شده است.

راستای حرکت چکش در راستای محور طولی سقوط چکش می‌باشد. با انجام محاسبات ریاضی سرعت اولیه برخورد برای ارتفاع سقوط یک متر ۴ متر بر ثانیه، برای ارتفاع سقوط آزاد دو متر ۵/۵ متر بر ثانیه و برای سقوط آزاد چکش از ارتفاع سه متر ۶/۸ متر بر ثانیه با احتساب ۹٪ کاهش سرعت در اثر اصطکاک ریل‌ها در نظر گرفته شده است. این عدد به صورت تجربی برای دستگاه مورد استفاده به دست آمده است. نتایج حاصل از برخورد چکش در اثر سقوط آزاد برای ارتفاع ۱ و ۲ و ۳ متر در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ - نمونه‌های شبیه‌سازی شده پس از برخورد چکش با ارتفاع (۱) یک و (۲) دو و (۳) سه متر

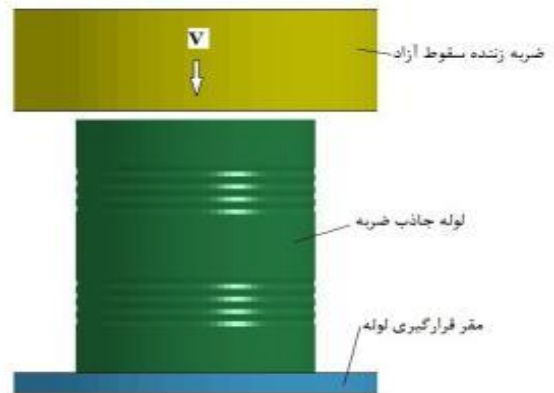
در شکل ۹ نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد وزنه ضربه‌زن با لوله‌های سوراخ‌دار از ارتفاع سقوط یک متری و با زوایای سوراخ‌کاری ۴۵ و ۹۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۹ - شبیه‌سازی پس از برخورد چکش به ارتفاع یک متر با اهداف سوراخ‌دار.

(مگا پاسکال)	
C ضریب کوپر-سیمونز (کرنش دینامیکی)	۴۰
q ضریب کوپر-سیمونز (کرنش دینامیکی)	۵

در شکل ۷ نحوه جانمایی لوله بر روی مقر و قرارگیری چکش در لحظه قبل از برخورد با لوله نمایش داده شده است. ضربه زن با سقوط از ارتفاع دارای سرعت حرکتی و انرژی جنبشی می‌شود که از صفر در لحظه رهاش شروع به افزایش می‌کند و در لحظه برخورد با نمونه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مقدار انرژی ضربه‌ای وارد بر نمونه، مقدار انرژی جنبشی ضربه زن در لحظه برخورد است. انرژی جنبشی پس از برخورد با تغییر شکل و کمانش پلاستیک لوله و کوتاه شدگی آن، جذب و تلف می‌گردد.



شکل ۷ - نحوه قرارگیری لوله هنگام تست عددی

یکی از نکات مهم برای شبیه‌سازی درست مسائل اجزاء محدود استقلال نتایج از شبکه است. تعداد و اندازه شبکه‌بندی باید به گونه‌ای انتخاب شود تا علاوه بر صحت و همگرایی نتایج، زمان اجرای برنامه را هم در فرایند تحلیل را هم مدیریت نماید. افزایش بی فایده زمان اجرای برنامه هزینه‌ای است که با بررسی و مطالعه استقلال نتایج از شبکه توأم با اطمینان از صحت نتایج حاصل می‌شود. جهت اطمینان از مش بندی حل عددی، شبیه‌سازی‌های متعددی با تعداد المان‌های مختلف انجام شد که در نهایت بیشترین مقدار اندازه شبکه برای لوله ۱،۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی در شبیه‌سازی مشابه حالت تجربی در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که مقر قرارگیری لوله ثابت بوده و

صحت‌سنجی نتایج عددی و مقایسه با نتایج تجربی

در این مقاله به روش‌های تجربی و عددی عملکرد جذب انرژی لوله‌های جدار نازک سوراخ‌دار و بدون سوراخ تحت بار ضربه ناشی از سقوط وزنه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت‌های مختلف برای انجام تعداد زیاد تست‌های تجربی، تعداد محدودی تست مطابق گروه‌بندی جدول ۱ انجام شده است که از نتایج این تست‌ها برای صحت‌سنجی نتایج عددی نیز استفاده خواهد شد. پس از صحت‌سنجی و اطمینان از صحت نتایج روش‌های انجام تحلیل عددی، تعداد بیشتری شبیه‌سازی برای مطالعه پارامتری موضوع مقاله انجام می‌شود.

در جدول ۴ جذب انرژی به وسیله لوله‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ به روش‌های تجربی و عددی ارائه شده است. از مقایسه نتایج ملاحظه می‌شود که الگوی له‌شدگی لوله‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ انطباق خیلی خوبی باهم دارند و با الگوی تغییرشکل مشابهی تغییرشکل داده‌اند. همچنین ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست در لوله‌های بدون سوراخ انطباق بسیار خوبی باهم دارند و میانگین خطا برابر کمتر از ۵ درصد می‌باشد. فاصله نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست در لوله‌های سوراخ‌دار حدود ۱۵ درصد بیشتر است و دلیل اصلی آن به سوراخ‌کاری دستی لوله برمی‌گردد. در سوراخ‌کاری به روش دستی بروز نواقص اولیه حاصل از فرآیند سوراخ‌کاری خیلی زیاد است و لبه‌های تیزی در محیط سوراخ‌ها به وجود می‌آید که منجر به کاهش استحکام و فروریزش زودهنگام می‌شود. علاوه بر این فشار ناشی از اعمال ابزار سوراخ‌کاری باعث فرورفتگی کم و ناخواسته‌ای در نواحی پیرامونی محل سوراخ‌کاری می‌شود که این نیز از دلایل افزایش طول له‌شدگی و به تبع آن افزایش خطا می‌شود.

فاصله نتایج عددی و تجربی نمونه‌های سوراخ‌دار را با استدلال خطاهای احتمالی آزمایش توجیه نمود. به این ترتیب نتایج شبیه‌سازی به روش عددی با نتایج تجربی صحت‌سنجی می‌شود.

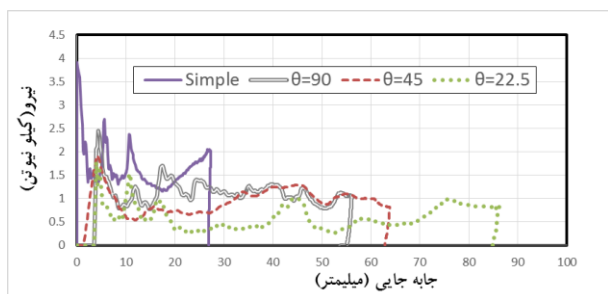
در بخش‌های بعدی پس از صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی و اطمینان از صحت نتایج، مطالعه پارامتری نمونه‌های بیشتری به روش عددی و شبیه‌سازی برای نمونه‌های با جنس‌های فولادی St12 و آلومینیومی AL6061-T6 ارائه می‌شود. پس از آن در بخش جداگانه‌ای نیز تأثیر تغییر

پارامترهای هندسی نمونه‌های فولادی شامل طول و ضخامت بر نتایج بررسی می‌شود.

تأثیر جنس نمونه‌ها بر نتایج شبیه‌سازی عددی

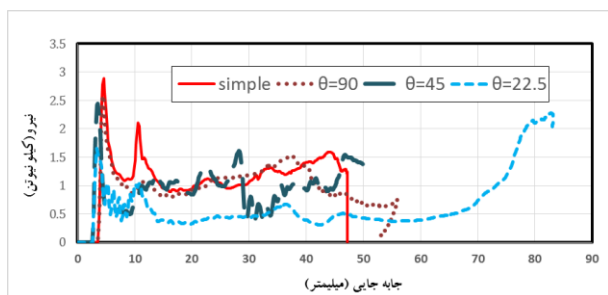
جهت بررسی تأثیر تغییر جنس لوله جدار نازک از فولاد نورد شده به آلومینیوم ۶۰۶۱، مراحل شبیه‌سازی عددی برای حالت سوراخ‌دار و بدون سوراخ تکرار گردیده است. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی یا طول له‌شدگی یک نمونه فولادی بدون سوراخ و ۳ نمونه سوراخ‌دار فولادی ارائه و باهم مقایسه شده‌اند.

در همه نمونه‌ها جرم وزنه ۶/۸ کیلوگرم و ارتفاع سقوط وزنه ۱ متر است. همه نمونه‌های سوراخ‌دار در این نمودار دارای ۴ ردیف سوراخ با فاصله ردیف‌های ۲۵ میلی‌متر هستند و زوایای سوراخ‌ها ۲۲/۵، ۴۵ و ۹۰ درجه هستند.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های فولادی در ۴ حالت سوراخ‌دار و بدون سوراخ

همچنین نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های آلومینیومی مشابه حالت فولادی در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های آلومینیومی در ۴ حالت سوراخ‌دار و بدون سوراخ

جدول ۴ - صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی

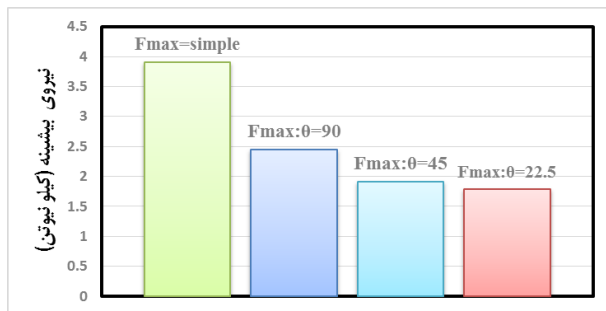
سوراخ‌دار / بدون سوراخ	درصد خطا نسبی	ارتفاع (متر)	تغییر شکل عددی (میلی‌متر)	تغییر شکل تجربی (میلی‌متر)
بدون سوراخ	۸٪	۱	۲۷	۲۵
بدون سوراخ	۳٪/۱۹	۲	۵۳	۵۱
بدون سوراخ	۲٪/۱۶	۳	۷۴	۷۶
سوراخ‌دار	۱۰٪	۱	۵۱	۵۷
سوراخ‌دار	۱۴٪	۱	۵۳	۶۲
سوراخ‌دار	۲۲٪	۱	۶۲	۸۰

سوراخ‌کاری نبوده، بلکه نشان دهنده آن است که میزان سوراخ-کاری بدنه باید متناسب با جنس و ضربه وارده باشد.

این نتایج نشان از عملکرد خوب سوراخ‌دار کردن برای کنترل و کاهش نیرو با افزایش طول له‌شدگی دارد. با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد که میزان له‌شدگی یا جابجایی در نمونه‌های آلومینیومی نسبت به نمونه‌های فولادی افزایش پیدا کرده است.

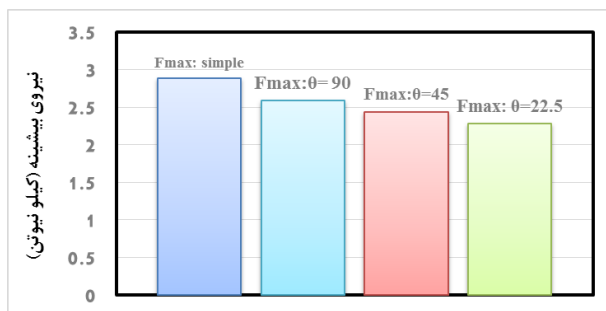
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای نمونه‌های فولادی و آلومینیومی، نمودار میله‌ای تغییرات نیروی بیشینه برای یک نمونه بدون سوراخ و ۳ نمونه سوراخ‌دار ارائه و با هم مقایسه شده‌اند. همه نمونه‌های سوراخ‌دار در این نمودار دارای ۴ ردیف سوراخ با فاصله ردیف‌های ۲۵ میلی‌متر هستند و زوایای سوراخ‌ها ۲۲/۵، ۴۵ و ۹۰ درجه هستند.

در شکل ۱۲ تغییر شکل به همراه تنش ایجاد شده در اثر سقوط آزاد وزنه نشان داده شده است.

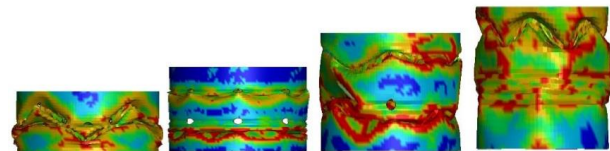


شکل ۱۳ - نمودار مقایسه نیروی بیشینه لوله موج‌دار سوراخ‌دار و بدون سوراخ نمونه‌های فولادی

کم شدن نرخ کاهش نیروی بیشینه با کاهش زوایای سوراخ‌کاری در هر ردیف نسبت مستقیم دارد. افزایش تعداد سوراخ‌ها باعث تغییر شکل بیشتر و کاهش بیشتر نیرو می‌شود.



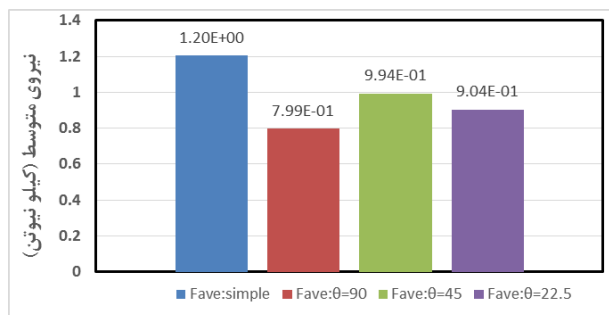
شکل ۱۴ - نمودار مقایسه نیروی بیشینه لوله موج‌دار سوراخ‌دار و بدون سوراخ نمونه‌های آلومینیومی



شکل ۱۲ - تغییر شکل لوله آلومینیومی به ترتیب از راست، بدون سوراخ، سوراخ‌دار ۹۰، ۴۵ و ۲۲.۵ درجه

در نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد که نمونه بدون سوراخ، دارای کمترین میزان له‌شدگی یا جابجایی و دارای بیشترین نیرو انتقال‌دهنده ضربه، در فرآیند له‌شدگی نسبت به نمونه‌های سوراخ‌دار است. کاهش زاویه سوراخ‌کاری به معنی افزایش تعداد سوراخ‌ها در هر ردیف می‌باشد. از این‌رو مشاهده می‌شود که در این شکل‌ها با کاهش زاویه سوراخ‌کاری از ۹۰ به ۲۲/۵ درجه یا به عبارتی با افزایش تعداد سوراخ‌ها از ۴ به ۱۶ سوراخ در هر ردیف، میزان له‌شدگی افزایش می‌یابد و نیروی وارد بر نمونه‌ها در فرآیند جذب انرژی کاهش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن میزان انرژی، کاملاً منطقی است که با افزایش میزان له‌شدگی، نیروی وارد بر نمونه در فرآیند له‌شدگی کاهش یابد. البته از جابجایی ۶۰ میلی‌متر به بعد در لوله آلومینیومی با زاویه سوراخ‌کاری ۲۲/۵ درجه، بدلیل ضعف ساختاری، نیروی وارد بر شاسی افزایشی بوده و نیروی ضربه زننده مستقیم به لوله وارد می‌گردد. این امر دلیلی بر ضعف

در شکل ۱۵ فاصله مقدار نیروی متوسط برای زوایای سوراخ کاری ۹۰ و ۴۵ درجه مقدار کمی است. دلیل آن این است که اختلاف تعداد سوراخ‌ها در این دو زاویه ۴ سوراخ است. همین فاصله برای زوایای سوراخ کاری ۴۵ و ۲۲/۵ درجه مقدار بیشتری است. دلیل اختلاف بیشتر تعداد سوراخ‌ها در این دو زاویه و برابر ۸ سوراخ و کاهش بیشتر صلبیت و سختی است.



شکل ۱۶ - نمودار مقایسه نیروی متوسط لوله آلومینیومی

با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ملاحظه می‌گردد که مقدار نیروی متوسط در نمونه‌های آلومینیومی نسبت به نمونه فولادی بدون سوراخ ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده است.

تأثیر تغییرات هندسی نمونه‌ها

در این بخش تأثیر افزایش طول، قطر و ضخامت نمونه‌ها بر پارامترهای جذب انرژی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۷ لوله‌های فلزی سوراخ کاری شده با تغییرات ضخامت، قطر و طول لوله و عرض و شعاع موج، همچنین حذف جداره محافظ موج مورد ارزیابی قرار گرفته است.



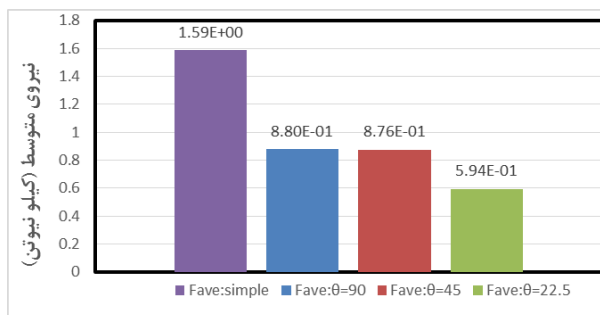
شکل ۱۷ - انواع تغییر فیزیکی ایجاد شده بر نمونه‌ها

در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که نیروی بیشینه که در لحظه اولیه برخورد که توسط شبیه‌سازی عددی اندازه‌گیری شده است، در نمونه بدون سوراخ با فاصله نسبی بیشتر از نیروی بیشینه در نمونه‌های سوراخ‌دار با زاویه ۲۲/۵ درجه است. از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با سوراخ کاری نمونه‌های ساده فولادی با قطر سوراخ ثابت ۶/۵ میلی‌متر و فواصل ردیف‌های ثابت و برابر ۲۵ میلی‌متر و با ۴ ردیف سوراخ با زاویه سوراخ کاری متفاوت ۹۰ درجه، ۴۵ درجه و ۲۲/۵ درجه، به ترتیب مقدار نیروی بیشینه ۳۷ درصد، ۵۱ درصد و ۵۴ درصد کاهش می‌یابد.

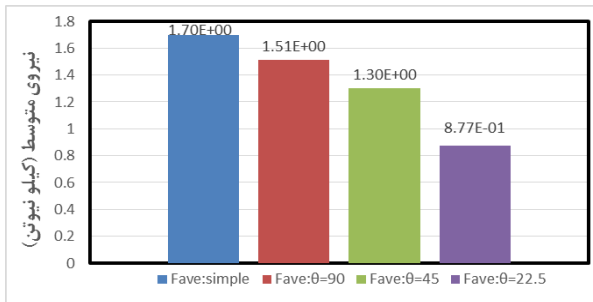
با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می‌گردد که مقدار نیروی بیشینه در نمونه‌های آلومینیومی نسبت به نمونه‌های فولادی بدون سوراخ ۳۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودار نیروی میانگین برای نمونه‌های فولادی و آلومینیومی ارائه داده شده است. مشاهده می‌شود این نیرو که در فرآیند له شدن توسط شبیه‌سازی عددی اندازه‌گیری شده است، با فاصله قابل توجه، در نمونه بدون سوراخ بیشتر از نمونه‌های سوراخ‌دار است. با تبدیل نمونه ساده فولادی به نمونه‌های فولادی سوراخ‌دار با قطر سوراخ ثابت و با زاویه سوراخ کاری متفاوت، به ترتیب مقدار نیروی میانگین ۴۴ درصد، ۴۶ درصد و ۶۲ درصد کاهش می‌یابد.

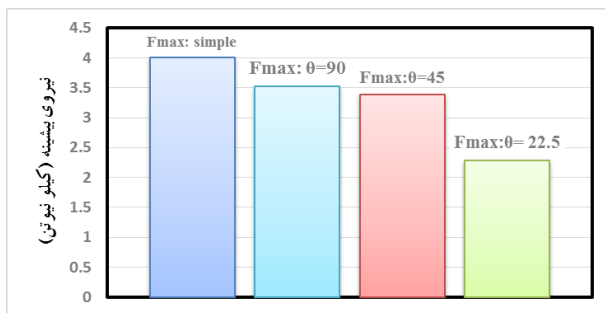
همچنین با تبدیل نمونه ساده آلومینیومی به نمونه‌های آلومینیومی سوراخ‌دار با قطر سوراخ ثابت و با زاویه سوراخ کاری متفاوت، مقدار نیروی میانگین کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵ - نمودار مقایسه نیروی متوسط لوله موج‌دار بدون سوراخ و سوراخ‌دار نمونه‌های فولادی



شکل ۲۰ - نمودار مقایسه نیروی متوسط لوله موج دار بدون سوراخ و سوراخ دار نمونه های افزایش طول یافته



شکل ۲۱ - نمودار تغییرات نیروی بیشینه نمونه های فولادی با افزایش طول ۶۳ درصد

با مقایسه نمودارهای نتایج شکل ۱۸ ملاحظه می گردد که با افزایش ۶۳ درصدی طول نمونه های فولادی بدون سوراخ از ۱۲۲ میلی متر به ۲۰۰ میلی متر، طول له شدگی در مقایسه با شکل ۱۰، افزایش قابل ملاحظه ای نداشته است.

در شکل ۲۰ و ۲۱ نمودار تغییرات نیروی بیشینه و میانگین نمونه های فولادی، با افزایش ۶۳ درصدی طول نسبت به نمونه های اولیه ارائه شده است.

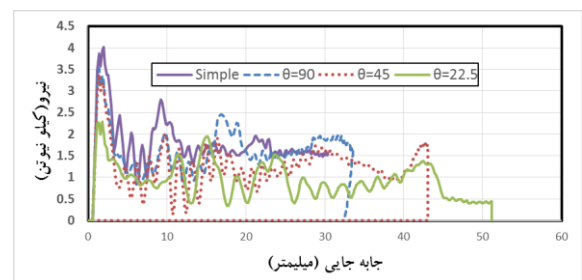
با مقایسه نمودارهای نتایج شکل ۲۱، ملاحظه می گردد که با افزایش ۶۳ درصدی طول نمونه های فولادی، نیروی های بیشینه نسبت به شکل ۱۳، تغییر چندانی نداشته است.

شبیه سازی عددی تغییر افزایش ضخامت بر نمونه ها

در ادامه تأثیر افزایش ضخامت نمونه ها بر پارامترهای جذب انرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲۲ نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی یا طول له شدگی نمونه های با ضخامت های ۰/۴ میلی متر ارائه شده است.

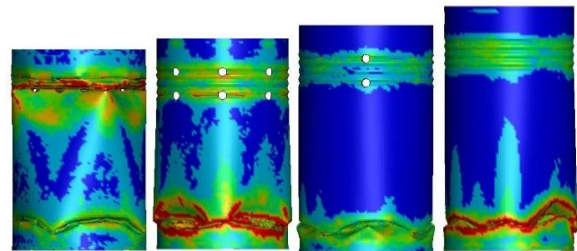
شبیه سازی عددی تغییر افزایش طول نمونه ها

نمونه های اولیه دارای طول ۱۲۲ میلی متر می باشند. جهت مشاهده تأثیر افزایش طول قوطی بر نیروی بیشینه، نمونه جدید را با طول ۲۰۰ میلی متر با شرایط اولیه مشابه قبل، شبیه سازی عددی شده است. در شکل ۱۸ نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی یا طول له شدگی نمونه های بدون سوراخ و سوراخ دار با افزایش طول ۶۳ درصدی ارائه شده است.



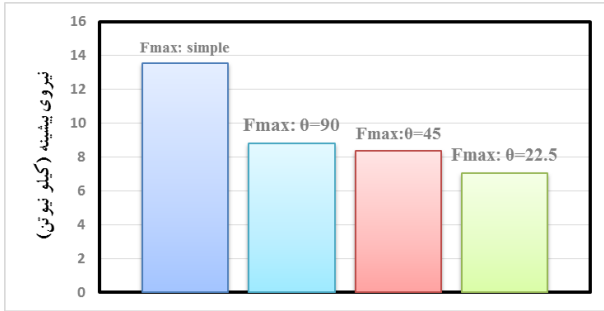
شکل ۱۸ - نمودار نیرو - جابه جایی نمونه های فولادی ساده و سوراخ دار با افزایش طول ۶۳ درصد

در شکل ۱۹ شبیه سازی عددی برای لوله های فلزی ساده و سوراخ دار با طول ۲۰۰ میلی متر در زمان ۲۰ میلی ثانیه با کانتور تنش وون-مایرز نشان داده شده است.



شکل ۱۹ - تغییر شکل لوله فولادی با طول ۲۰۰ میلی متر به ترتیب از راست: بدون سوراخ، با سوراخ ۹۰، ۴۵ و ۲۲٫۵ درجه

مشاهده می شود که فقط افزایش تعداد سوراخ در نمونه ها بدون تغییر انرژی ضربه، جنس و سایر پارامترهای هندسی منجر به افزایش میزان له شدگی، در فرآیند جذب انرژی می شود.

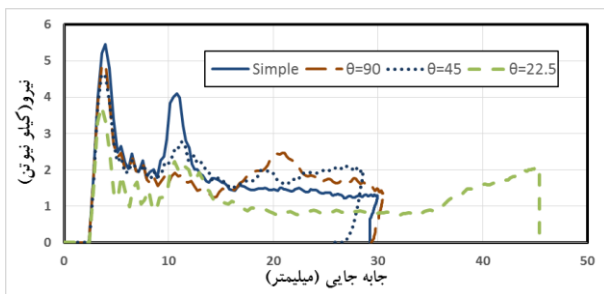


شکل ۲۵- نمودار تغییرات نیروی بیشینه نمونه‌های فولادی با افزایش ضخامت ۱۰۰ درصد

در شکل ۲۵ نمودار تغییرات نیروی بیشینه نمونه‌های فولادی، با افزایش ۱۰۰ درصدی ضخامت نسبت به نمونه‌های اولیه ارائه شده است. با مقایسه نمودارهای نتایج شکل ۲۵ نسبت به شکل ۱۳، نیز ملاحظه می‌گردد که با افزایش ۱۰۰ درصدی ضخامت نمونه‌های فولادی، فقط نیروی بیشینه لوله ساده، افزایش ۲۳۰ درصدی داشته است.

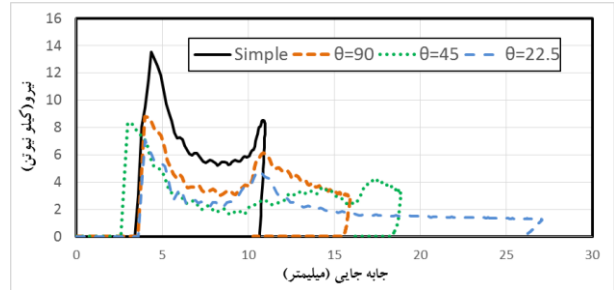
شبیه‌سازی عددی تغییر افزایش قطر نمونه‌ها

جهت بررسی اثر افزایش قطر لوله جدار نازک، نمونه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲۶ نمودار تغییرات نیروی برحسب جابجایی یا طول له‌شدگی نمونه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ ارائه شده است. نمونه‌های اولیه فولادی دارای قطر ۹۹ میلی‌متر می‌باشند.



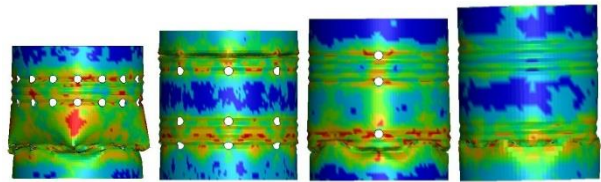
شکل ۲۶- نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌های فولادی با افزایش قطر ۵۱ درصد

مشاهده می‌شود که فقط افزایش ۵۱ درصدی قطر نمونه‌ها بدون تغییر بار ضربه، جنس و سایر پارامترهای هندسی منجر به افزایش جزئی میزان له‌شدگی در لوله ساده و کاهش قابل‌ملاحظه فرورفتگی در لوله‌های سوراخ‌دار شده، ولی باعث افزایش عمومی نیروی بیشینه وارد بر نمونه‌ها، نسبت به



شکل ۲۲- نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌های فولادی با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر

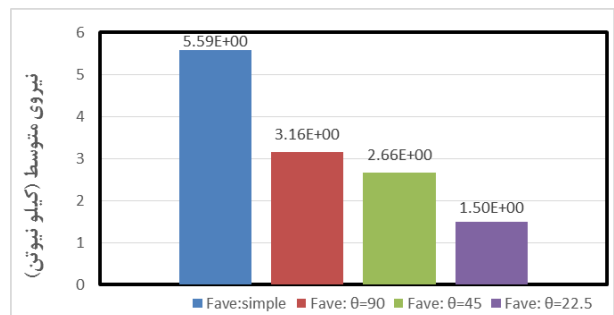
در شکل ۲۳ تغییر اندازه لوله به همراه کانتور تنش وون- میزز نشان داده شده است.



شکل ۲۳- تغییر شکل لوله فولادی به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر به ترتیب از راست، بدون سوراخ، با سوراخ ۹۰، ۴۵ و ۲۲٫۵ درجه

مشاهده می‌شود که فقط افزایش ضخامت نمونه‌ها بدون تغییر انرژی ضربه، جنس و سایر پارامترهای هندسی منجر به کاهش چشم‌گیر میزان له‌شدگی و افزایش نیروی بیشینه وارد بر نمونه‌ها در فرآیند جذب انرژی می‌شود. با افزایش ضخامت از ۰/۲ به ۰/۴، طول له‌شدگی ۶۰ درصد کاهش یافته است.

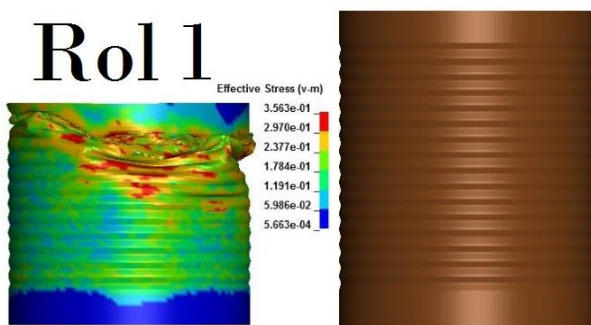
در شکل ۲۴ نمودار نیروی متوسط وارد بر نمونه‌های ضخامت ۰/۴ میلی‌متر نشان داده شده است. در این نمودار همچون نمودار افزایش طول، با کاهش میزان نیروی متوسط در اثر افزایش تعداد سوراخ لوله مواجه هستیم.



شکل ۲۴- نمودار مقایسه نیروی متوسط نمونه‌های موج‌دار با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر

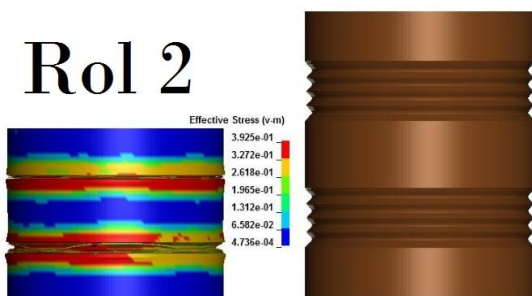
می‌یابد. همچنین با مقایسه نمونه‌های سوراخ‌دار نیز ملاحظه می‌گردد که با افزایش قطر به ۱۵۰ میلی‌متر، نیروی بیشینه ۱۰۰ درصد افزایش یافته است.

شبیه‌سازی عددی تغییر شعاع و تعداد موج بر روی نمونه جهت مشاهده تاثیر افزایش تعداد موج‌ها بر روی جذب نیرو، با افزایش عرضی تعداد موج‌ها بر روی نمونه فولادی، میزان فرورفتگی نمونه قبل و بعد از بارگذاری در شکل ۳۰ نشان داده شده است.



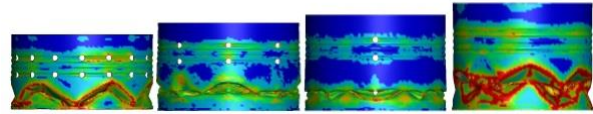
شکل ۳۰- تأثیر افزایش تعداد موج قبل و بعد از بارگذاری

از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که تغییر شکل در قسمت فوقانی رخ می‌دهد و وجود موج‌های متوالی باعث فروریزش نامتقارن می‌شود. در صورتی که موج‌ها در یک پهنا محدود شده باشند، فروریزش موج‌ها در همان محدوده قابل پیش‌بینی خواهد بود. در شکل ۳۱ فروریزش لوله با افزایش شعاع خم موج، قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است. در شبیه‌سازی سقوط آزاد با وزنه مشابه، با افزایش شعاع خم موج، ایجاد فروریزش موج، راحت‌تر انجام می‌گردد و به جذب ضربه کمک شایانی می‌کند. این به دلیل کاهش موثر گشتاور خمشی پلاستیک است.



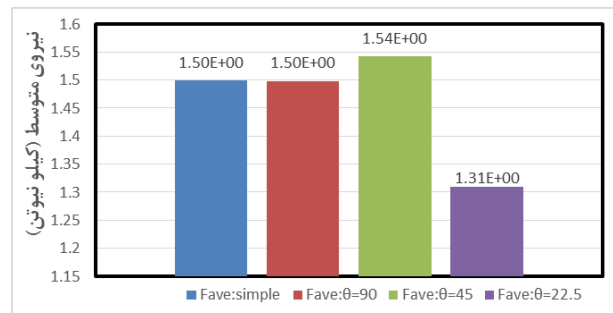
شکل ۳۱- تأثیر افزایش شعاع موج قبل و بعد از بارگذاری

شکل ۱۳، در فرآیند جذب انرژی شده است. در شکل ۲۷ تغییر شکل لوله به همراه کانتور تنش نشان داده شده است.

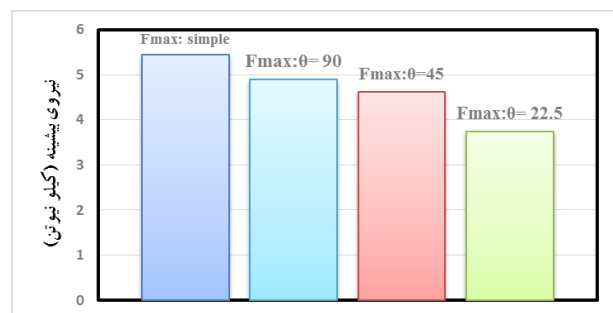


شکل ۲۷ - تغییر شکل لوله فولادی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر به ترتیب از راست، بدون سوراخ، با سوراخ ۹۰، ۴۵ و ۲۲٫۵ درجه

با مقایسه نمودارهای شکل ۲۶ و شکل ۱۰، ملاحظه می‌گردد که با افزایش ۵۱ درصدی قطر نمونه‌های فولادی از ۹۹ میلی‌متر به ۱۵۰ میلی‌متر، طول له‌شدگی نمونه ساده تغییر چندانی نداشته است ولی در نمونه‌های سوراخ‌دار باعث کاهش ۹۰ درصدی له‌شدگی نمونه‌های سوراخ‌دار شده است. در شکل ۲۸ نمودار تغییرات نیروی متوسط نمونه‌های بدون سوراخ و با سوراخ با افزایش قطر ۵۱ درصدی، ارائه شده است.

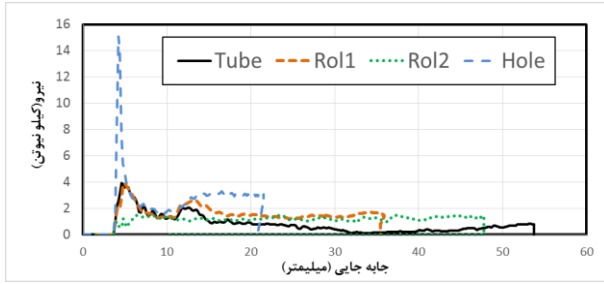


شکل ۲۸ - نمودار مقایسه نیروی متوسط لوله با طول ۱۵۰ میلی‌متر



شکل ۲۹- نمودار تغییرات نیروی بیشینه با افزایش قطر ۵۱ درصد

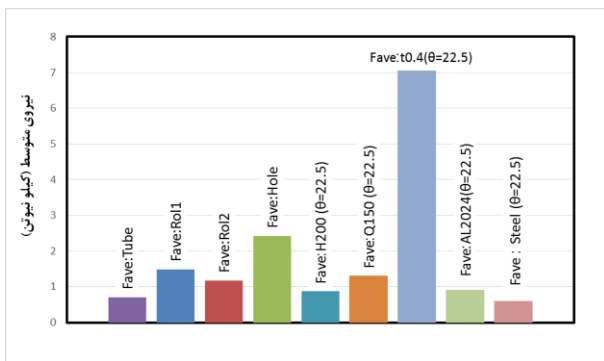
با مقایسه نمودار نیروی بیشینه نمونه ساده در شکل ۲۹، نسبت به شکل ۱۳، ملاحظه می‌گردد که با افزایش ۵۱ درصدی قطر نمونه‌های فولادی، نیروی بیشینه ۳۸ درصد افزایش



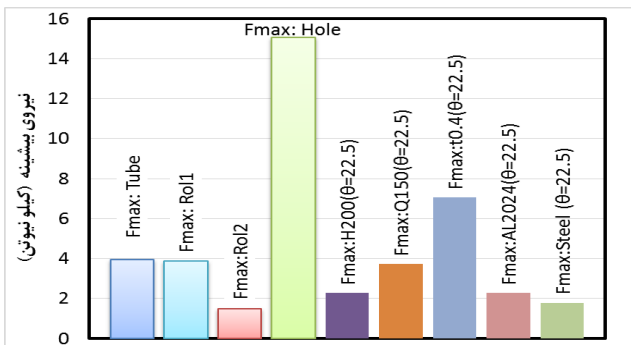
شکل ۳۴- نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌های جدید

مقایسه نمودارهای نیروی بر اثر تغییرات فیزیکی

جهت مقایسه آسان تأثیر پارامترهای هندسی بر نیروی متوسط نمونه‌ها، نمودار شکل ۳۵ ارائه شده است. همچنین در نمودار شکل ۳۶ نیروهای بیشینه نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳۵ مشاهده می‌شود، ارتفاع ستون نیروی متوسط لوله‌ای با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر، به دلیل افزایش سطح مقطع موثر ضربه که با ضخامت لوله رابطه مستقیم دارد، افزایش بسیاری داشته است. همچنین در شکل ۳۶ مشاهده می‌شود، با مایل شدن سوراخ کاری و در نبود موج بر روی جداره لوله (با نام Hole)، کاهش سطح مقطع موثر متعامد با بردار نیرو، سبب افزایش سهمگین نیروی بیشینه شده است.



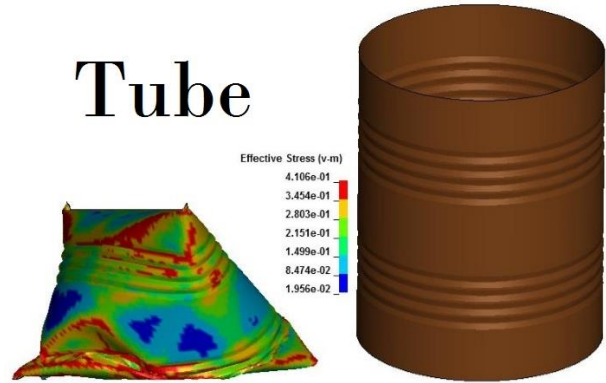
شکل ۳۵- نمودار مقایسه نیروی متوسط نمونه‌ها



شکل ۳۶- نمودار مقایسه نیروی بیشینه نمونه‌ها

تأثیر حذف رینگ محافظ و سوراخ کاری مایل در لوله جهت مشاهده تأثیر عملکرد تثبیت‌کننده دهانه لوله در شکل ۳۲ تغییر شکل نمونه فولادی، قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است. رینگ‌های محافظ مشابه عملکرد ریب‌ها در سازه‌های هوایی عمل کرده و علاوه بر حفظ شکل دایروی لوله، موجب انتقال پایدار نیرو در راستای طولی لوله می‌گردد.

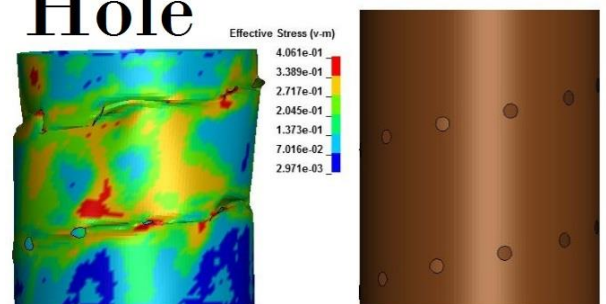
Tube



شکل ۳۲- تأثیر حذف رینگ محافظ قبل و بعد از بارگذاری

در صورتی که لوله بدون موج بوده و سوراخ کاری مایل نسبت به افق انجام گیرد، با توجه به اینکه تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌ها می‌باشد، خط فروریزش از خط واصل بین سوراخ‌ها عبور نموده و موجب تغییر شکل لوله می‌گردد. هرچه فاصله سوراخ‌ها نزدیک‌تر باشد، کماتر راحت‌تر ایجاد می‌شود. شکل ۳۳ تغییر شکل نمونه قبل و بعد از بارگذاری را نشان می‌دهد.

Hole



شکل ۳۳- تأثیر سوراخ‌های مایل قبل و بعد از بارگذاری

در شکل ۳۴ نمودار نیرو-جاب‌جایی برای چهار نمونه جدید نمایش داده شده است. نام‌گذاری هر نمونه در شکل‌های بارگذاری شده نمایش داده شده است.

نتیجه گیری

در این مقاله به روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی پارامترهای جذب مقدار معین و ثابتی از انرژی ناشی از سقوط یک وزنه ضربه‌زن بر لوله‌های جدارنازک و موجدار سوراخ‌دار و بدون سوراخ بررسی شده است. از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی این نتیجه حاصل شده است که با سوراخ‌کاری متقارن و کنترل شده لوله و افزایش تعداد سوراخ‌های ایجاد شده در جداره آن، نیروی بیشینه و نیروی میانگین وارد بر نمونه به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد و طول له‌شدگی یا تغییرشکل پلاستیک لوله نیز افزایش می‌یابد. این بدان معناست که ضربه وارد شده در زمان بیشتری به لوله وارد شده و سبب کاهش نیروی اعمالی شده است. کاهش نیروی بیشینه در طراحی جاذب‌های بیومکانیکی و ایمنی برای انسان بر اساس معیارهای جهانی مرگ‌آوری در ضربه مغزی و ضربه به قفسه سینه csI و hic^2 از اهمیت بالایی برخوردار است. در جذب انرژی با استفاده از لوله‌های سوراخ‌دار، افزایش تعداد سوراخ، کنترل نیروی بیشینه و کنترل نیروی میانگین به منظور کاهش آسیب و صدمات انجام می‌شود. افزایش طول لوله تغییر چندانی در طول له‌شدگی لوله و کاهش نیروی بیشینه نداشته است، ولی افزایش قطر لوله سبب کاهش له‌شدگی لوله و افزایش نیروی بیشینه در فرآیند جذب انرژی شده است. افزایش ضخامت لوله‌ها نیز باعث کاهش طول له‌شدگی و افزایش چشم‌گیر نیروی بیشینه در فرآیند جذب انرژی شده است. همچنین با تغییر جنس لوله‌ها از آهن نورد شده به آلومینیوم ۶۰۶۱ طول له‌شدگی افزایش می‌یابد، ولی نیروی بیشینه و نیروی میانگین به دلیل فرورفتگی بیش‌از اندازه و انتقال یافتن نیروی ضربه چکش به زمین، نسبت به حالت فولادی با افزایش نسبی همراه است. بهترین تغییر فیزیکی برای بهبود عملکرد افزایش شعاع موج لوله می‌باشد، که از لحاظ نیروی بیشینه، نیروی کمتری را از خود عبور داده است. همچنین لوله بدون حفاظ نگه‌دارنده با لوله موج‌دار فولادی، با سوراخ‌های $\theta=22/5$ ، از نظر نیروی میانگین برابر است که این پدیده نوعی رفتار کمانشی اوپلری یا خمش غیرمحوری را نشان می‌دهد که از نظر سبک جذب انرژی در تقسیم‌بندی جاذب‌های خمشی قرار می‌گیرد.

ضعیف‌ترین عملکرد جهت اعمال تغییرات فیزیکی بعد از افزایش ضخامت جداره لوله، ایجاد سوراخ‌های مایل نسبت به افق در لوله ساده بدون موج می‌باشد، که با افزایش چشم‌گیر نیروی بیشینه همراه می‌باشد.

منابع و مراجع

- [1]. J. M. ALEXANDER, "AN APPROXIMATE ANALYSIS OF THE COLLAPSE OF THIN CYLINDRICAL SHELLS UNDER AXIAL LOADING," Q. J. Mech. Appl. Math., vol. 13, no. 1, pp. 10–15, Jan. 1960,
- [2]. A. PUGSLEY, "THE LARGE-SCALE CRUMPLING OF THIN CYLINDRICAL COLUMNS," Q. J. Mech. Appl. Math., vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 1960,
- [3]. W. Johnson, P. D. Soden, and S. T. S. Al-Hassani, "Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression," J. Strain Anal. Eng. Des., vol. 12, no. 4, pp. 317–330, Oct. 1977,
- [4]. M. Y. Huang, Y. S. Tai, and H. T. Hu, "Dynamic crushing characteristics of high strength steel cylinders with elliptical geometric discontinuities," Theor. Appl. Fract. Mech., vol. 54, no. 1, pp. 44–53, Aug. 2010,
- [5]. J. Song, Y. Chen, and G. Lu, "Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing," Int. J. Mech. Sci., vol. 66, pp. 239–248, 2013,
- [6]. Z. Yang et al., "Experimental and numerical study of circular, stainless thin tube energy absorber under axial impact by a control rod," Thin-Walled Struct., vol. 82, pp. 24–32, Sep. 2014,
- [7]. A. Niknejad, G. H. Liaghat, H. M. Naeini, and A. H. Behraves, "Theoretical Calculation of the Instantaneous Folding Force in a Single-Cell Square Column under," pp. 21–30.
- [8]. G. Martínez, C. Graciano, and P. Teixeira, "Energy absorption of axially crushed expanded metal tubes," Thin-Walled Struct., vol. 71, pp. 134–146, Oct. 2013,
- [9]. M. D. Nouri, H. Hatami, and A. G. Jahromi, "Experimental and numerical

^۱Chest injury crash

^۲Head injury crash

- Oct. 03, 2019. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US8973957B2/en>.
- [19]. A. S. K., "a Survey Paper on Factors Controlling the Energy Absorption of Crash Box," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 05, no. 05, pp. 182–187, 2016,
- [20]. A. M. Harte, N. A. Fleck, and M. F. Ashby, "Energy absorption of foam-filled circular tubes with braided composite walls," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 19, no. 1, pp. 31–50, 2000,
- [21]. L. Peroni and M. Avale, "Experimental investigation of the energy absorption capability of bonded crash boxes," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 87, pp. 445–454, 2006,
- [22]. H. Mozafari, S. Lin, G. C. P. Tsui, and L. Gu, "Controllable energy absorption of double sided corrugated tubes under axial crushing," *Compos. Part B*, vol. 134, pp. 9–17, 2018,
- [23]. L. Xin, X. Jinyu, Z. Jingsai, G. Yuan, N. Liangxue, and L. Weimin, "Thin-Walled Structures A new method to investigate the energy absorption characteristics of thin-walled metal circular tube using finite element analysis," vol. 95, pp. 24–30, 2015,
- [24]. L. Zhang, Z. Bai, and F. Bai, "Thin-Walled Structures Crashworthiness design for bio-inspired multi-cell tubes with quadrilateral, hexagonal and octagonal sections," *Thin Walled Struct.*, vol. 122, no. October 2017, pp. 42–51, 2018,
- [25]. G. Sun, S. Li, G. Li, and Q. Li, "On crushing behaviors of aluminium / CFRP tubes subjected to axial and oblique loading: An experimental study," *Compos. Part B*, vol. 145, no. February, pp. 47–56, 2018,
- [26]. W. Liu, Z. Lin, N. Wang, and X. Deng, "Thin-Walled Structures Dynamic performances of thin-walled tubes with star-shaped cross section under axial impact," *Thin Walled Struct.*, vol. 100, pp. 25–37, 2016,
- [27]. A. Eyvazian, M. K. Habibi, A. M. Hamouda, and R. Hedayati, "Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes," 2014.
- investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 54, no. 6, pp. 1245–1266, 2015,
- [10]. J. Song, Y. Zhou, and F. Guo, "A relationship between progressive collapse and initial buckling for tubular structures under axial loading," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 75, pp. 200–211, 2013,
- [11]. A. A. Singace and H. El-Sobky, "Behaviour of axially crushed corrugated tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 39, no. 3, pp. 249–268, Mar. 1997,
- [12]. P. Bhuvaneshwari, "AXIAL AND ECCENTRIC COMPRESSION OF GFRP JACKETED $c r v i h o e f c r v i h f$," vol. 17, no. 5, pp. 625–634, 2016.
- [13]. M. N. Yob, K. A. Ismail, M. A. Rojan, M. Z. Othman, and A. M. Ahmad Zaidi, "Quasi Static Axial Compression of Thin Walled Aluminum Tubes: Analysis of Flow Stress in the Analytical Models," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 34, 2015,
- [14]. A. Alavi Nia and M. Parsapour, "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections," *Thin-Walled Struct.*, vol. 74, pp. 155–165, 2014,
- [15]. A. Alavi Nia and J. Haddad Hamedani, "Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries," *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, no. 12, pp. 946–954, Dec. 2010,
- [16]. A. B. M. Supian, S. M. Sapuan, M. Y. M. Zuhri, E. S. Zainudin, and H. H. Ya, "Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review," *Def. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 291–305, 2018,
- [17]. A. Ghamarian and H. R. Zarei, "Parametric Study of the Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes under Quasi Static and Dynamic Impact Loads," *Iran. Aerosp. Soc. Summer - Fall 2012 J*, vol. 9, no. 2, pp. 59–70, 2012,
- [18]. U. Patent, "Bumper energy absorber with sensor and configured lobes," *United States Pat.*, pp. 1–12, Apr. 2014, Accessed:

- [28]. A. Moradpour, M. Elyasi, and S. Montazeri, "Developing a New Thin-Walled Tube Structure and Analyzing its Crushing Performance for AA 60601 and Mild Steel Under Axial Loading," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 69, no. 5, pp. 1107–1117, 2016,
- [29]. E. Acar, M. Altin, and M. A. Güler, "Evaluation of various multi-cell design concepts for crashworthiness design of thin-walled aluminum tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 142, pp. 227–235, Sep. 2019,
- [30]. M. A. Mansor, Z. Ahmad, and M. R. Abdullah, "Crashworthiness capability of thin-walled fibre metal laminate tubes under axial crushing," *Eng. Struct.*, vol. 252, p. 113660, Feb. 2022,
- [31]. N. S. Ha and G. Lu, "Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics," *Thin-Walled Struct.*, vol. 157, p. 106995, Dec. 2020,
- [32]. G. R. Cowper and P. S. Symonds. (1957). Strain hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams, Brown University Division of Applied Mathematics Report No. 28, September.