دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه:
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

بررسی رفتار مکانیکی لوله‌های جدار نازک ساندویچی با هسته فوم تحت بارگذاری محوری

استاد راهنما:
دکتر علی علوی‌نیا

پژوهشگر:
رضا رحمانی

۲ بهمن ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا و استاد راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس‌های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها الزامی می‌باشد.

مقالات خارجی

……..……, **Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.**

مقالات داخلی

.....، گروه .....، دانشکده .....، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

بررسی رفتار مکانیکی لوله‌های جدار نازک ساندویچی با هسته فوم تحت بارگذاری محوری

نام نویسنده: رضا رحمانی

نام استاد راهنما: دکتر علی علوی‌نیا

نام استاد مشاور: -

دانشکده: مهندسی	**گروه آموزشی: مهندسی مکانیک**	
رشته تحصیلی: مهندسی مکانیک	**گرایش تحصیلی: طراحی کاربردی**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب پروپوزال : ۱۳۹۰/۳/۳۰	**تاریخ دفاع:۱۳۹۱/۱۱/۰۲**	**تعداد صفحات: ۱۲۴ صفحه**

چکیده:

در بسیاری از سازه‌های مهندسی و به خصوص دستگاه‌های متحرک برای جلوگیری از خسارت ناشی از ضربه یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌کنند. به نظر می‌رسد اجماعی وجود دارد که می‌خواهد پتانسیل خطرات را در تصادف کاهش دهد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تغییر شکل و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی متشکل از دو لوله آلومینیومی متداخل که بین آن‌ها از فوم پلیمری EVA پر شده است، می‌باشد. بارگذاری محوری لوله‌ها به دو صورت شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای بوده است و رفتار مکانیکی این سازه‌ها، شامل نحوه تغییر شکل، میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی بررسی شده است. همچنین، اثر تغییرات ضخامت، طول لوله و چگالی فوم بر کمیت‌های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آزمایش-های تجربی، به منظور بررسی پارامتری، شبیه سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌های عددی و تجربی تطابق خوبی با یکدیگر داشته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که وجود فوم باعث افزایش میزان جذب انرژی در سازه‌ها می‌شود؛ این افزایش در میزان جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در چگالی‌های بالاتر فوم، نمایان‌تر است. به علاوه، مقایسه نحوه چین خوردگی در سازه‌های پرشده از فوم با سازه‌های خالی نشان می‌دهد که وجود فوم تاثیری در نحوه چین خوردگی سازه‌ها ندارد. همچنین، افزایش ضخامت لوله‌ها باعث افزایش میزان جذب انرژی و نیروی میانگین لهیدگی می‌شود. ضمناً، کارایی سازه ساندویچی پر شده با فوم نسبت به اجزای سازنده آن بیشتر است و از اصل جمع آثار پیروی نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های ساندویچی، جذب انرژی، نیروی لهیدگی، فوم، LS-DYNA

بوسه بر دستان

پر مهر

پدر و مادر فداکارم

تشکر و قدردانی

سپاس می‌گویم خداوند بلند مرتبه را که بدون لطف و عنایتش هیچ نبودیم. خدا را شکر می‌کنم که با همه سختی‌ها و مشکلات بالاخره این پایان‌نامه به سرانجام رسید. در اینجا بر خود لازم می‌دانم تا فرصت را مغتنم شمرده و از استاد عزیزم آقای دکتر علی علوی‌نیا تشکر کنم که با صبر و شکیبایی برادرانه راهنمایی این پایان‌نامه را عهده دار بودند. زحمات ایشان را ارج می‌نهم و برایشان از خداوند منان توفیق روزافزون و سلامتی و بهروزی مسئلت دارم.

در ابتدا از مهندس علی شیرازی به خاطر تمامی راهنمایی‌ها و همکاری‌های دلسوزانه‌شان در طی مراحل انجام پایان‌نامه، کمال تشکر را دارم.

همچنین، از دوستان خوبم آقایان مهندس فرزاد فراهی بلمیری، مهندس امیرحسین دهقانی، مهندس میلاد خاصیان، مهندس حامد اسماعیلی، مهندس نادر نوائی بروجنی، مهندس سعید لحمی، مهندس سعید سپاهی بروجنی، مهندس امین حیطه، مهندس محمدرضا عباسی‌فر، مهندس حسن سرکشیک زاده، مهندس علی آریان‌فر و مهندس مسعود پارساپور تشکر می‌نمایم، که در طی مراحل مختلف انجام این پایان‌نامه با کمک‌های بی دریغشان یاری‌گر من بوده‌اند.

در پایان از آقای بیات سرپرست آزمایشگاه متالوگرافی و دیگر عزیزان که نهایت همکاری را با بنده داشته‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

رضا رحمانی

دی ماه ۱۳۹۱

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل۱: مفاهیم و فرضیات پژوهش ۱
۱-۱. مقدمه ۳
۱-۲. مفاهیم جاذب‌های انرژی ۴
۱-۳. تعریف مساله ۶
۱-۴. سابقه و ضرورت انجام تحقیق ۷
۱-۵. مفروضات و اهداف تحقیق ۷
۱-۶. نحوه ارائه مطالب ۸

فصل۲: پیشینه پژوهش ۱۱
۲-۱. مقدمه ۱۳
۲-۲. جاذب‌های انرژی ۱۴
۲-۳. اشکال مختلف جاذب‌های انرژی ۱۴
۲-۳-۱. مخروط ناقص ۱۴
۲-۳-۲. ستون‌های چند گوشه ۱۶
۲-۳-۳. صفحات ساندویچی ۱۷
۲-۳-۴. سلول‌های لانه زنبوری ۱۹
۲-۳-۵. لوله‌های استوانه‌ای ۲۰
۲-۴. شیوه‌های فروریزش لوله‌ها ۲۰
۲-۴-۱. وارونگی ۲۰
۲-۴-۲. پارگی محوری ۲۱
۲-۴-۳. تورفتگی جانبی لوله تحت نیروی جانبی ۲۲
۲-۴-۴. مسطح شدن جانبی لوله ۲۳
۲-۵. فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای ۲۵
۲-۶. بارگذاری دینامیکی برای فروریزش محوری لوله‌های استوانه‌ای ۲۷
۲-۶-۱. آزمایش ضربه ۲۷
۲-۶-۲. تأثیر نرخ کرنش و کرنش سختی ۲۸
۲-۶-۳. تأثیر اینرسی ۲۹
۲-۷. جاذب‌های انرژی پرشده با فوم ۳۰
۲-۸. جمع بندی ۳۱

فصل۳: خواص مکانیکی فوم‌ها ۳۳
۳-۱. مقدمه‌ای بر فوم‌ها ۳۵
۳-۲. دسته‌بندی فوم‌ها ۳۶
۳-۲-۱. فوم‌های پلیمری ۳۶

۳-۲-۲. فوم‌های سرامیکی ۳۷
۳-۲-۳. فوم‌های فلزی ۳۸
۳-۳. بررسی فوم‌های پلیمری ۳۹
۳-۳-۱. انواع فوم‌های پلیمری ۳۹
۳-۳-۲. نحوه ساخت فوم‌ها ۴۰
۳-۳-۳. خواص مکانیکی فوم‌های پلیمری ۴۱
۳-۳-۴. خصوصیات نمونه فوم‌های پرکاربرد ۴۶
۳-۴. فوم **EVA** ۴۷
۳-۴-۲. استانداردهای آزمایش فوم ۴۸

فصل۴: آزمایش‌های تجربی ۵۳
۴-۱. مقدمه ۵۵
۴-۲. آماده سازی سازه‌های جاذب انرژی ۵۶
۴-۳. شرح کدگذاری ۵۸
۴-۴. تعیین خواص مکانیکی فوم **EVA** ۵۹
۴-۵. خواص مکانیکی لوله‌های آلومینیومی ۶۰
۴-۶. انجام آزمایش‌ها ۶۳
۴-۶-۱. آماده سازی نمونه‌ها ۶۳
۴-۶-۲. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های استوانه‌ای تو خالی ۶۶
۴-۶-۳. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های استوانه‌ای پرشده با فوم ۶۷
۴-۶-۴. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های استوانه‌ای پرشده با مواد سبک دیگر ۷۰
۴-۶-۵. بارگذاری دینامیکی سازه‌های جاذب انرژی ۷۱
۴-۷. خلاصه نتایج آزمون‌های تجربی ۷۴

فصل۵: شبیه سازی عددی ۷۷
۵-۱. مقدمه ۷۹
۵-۲. معرفی نرم افزار **LS-DYNA** ۷۹
۵-۳. مدل‌سازی مسأله ۸۱
۵-۳-۱. تفکیک اجزای مسأله و المان‌بندی آن‌ها ۸۱
۵-۳-۲. تعریف مدل ماده برای هر جزء از مجموعه لوله‌ها، فوم و صفحات صلب ۸۳
۵-۳-۳. مشخص کردن خاصیت اجزای مسأله ۸۴
۵-۳-۴. تعریف تماس میان اجزا ۸۵
۵-۳-۵. اعمال شرایط مرزی ۸۶
۵-۳-۶. حرکت صفحه بالایی به عنوان یک جسم صلب ۸۶
۵-۳-۷. تنظیمات حل مسأله ۸۷
۵-۳-۸. شبیه‌سازی بارگذاری ضربه‌ای ۸۸
۵-۳-۹. مش بندی و اعتبار سنجی مش‌ها ۸۹

۵-۴. نتایج بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه‌ای ۹۰
۵-۴-۱. خلاصه نتایج ۹۰
۵-۴-۲. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های خالی با قطر لوله بیرونی **۴۰ mm** ۹۱
۵-۴-۳. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های خالی با قطر لوله بیرونی **۵۰ mm** ۹۱
۵-۴-۴. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های پر شده با فوم با قطر لوله بیرونی **۴۰mm** ... ۹۲
۵-۴-۵. بارگذاری شبه استاتیکی سازه‌های پر شده با فوم با قطر لوله بیرونی **۵۰mm** ... ۹۳
۵-۴-۶. بارگذاری ضربه‌ای سازه‌های خالی با قطر لوله بیرونی **۴۰mm** ۹۴
۵-۴-۷. بارگذاری ضربه‌ای سازه‌های خالی با قطر لوله بیرونی **۵۰mm** ۹۴
۵-۴-۸. بارگذاری ضربه‌ای سازه‌های پر شده با فوم با قطر لوله بیرونی **۴۰mm** ۹۵
۵-۴-۹. بارگذاری ضربه‌ای سازه‌های پر شده با فوم با قطر لوله بیرونی **۵۰mm** ۹۵
۵-۵. مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری‌های عددی و تجربی ۹۶

فصل۶: بحث و بررسی نتایج ۱۰۱
۶-۱. مقدمه ۱۰۳
۶-۲. تحلیل نمودار نیرو – جابجایی برای یک لوله خالی ۱۰۳
۶-۳. اثر ضخامت لوله بیرونی بر نیروی لهیدگی و جذب انرژی سازه‌ها ۱۰۴
۶-۴. اثر ضریب اصطکاک بین سطوح بر لهیدگی سازه‌ها ۱۰۶
۶-۵. مقایسه جذب انرژی و نیروی لهیدگی در سازه‌های خالی با سازه‌های پرشده با فوم ۱۰۷
۶-۶. بررسی تأثیر چگالی فوم بر لهیدگی سازه‌ها ۱۰۹
۶-۷. مقایسه کارایی سازه‌های ساندویچی نسبت به اجزای سازنده آن ۱۱۰

فصل۷: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۱۳
۷-۱. خلاصه ۱۱۵
۷-۲. نتیجه گیری ۱۱۶
۷-۳. پیشنهادها ۱۱۶

مراجع ۱۱۷

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل۲-۱. وارونگی مستقیم مخروط ناقص ۱۵
شکل۲-۲. لوله‌های مربعی له شده. ۱۶
شکل۲-۳. وارونگی به سمت خارج لوله‌ها تحت بار محوری الف) آزمایش تجربی. ب) تحلیل تئوری ۲۱
شکل۲-۴. پارگی لوله‌ها تحت بار محوری الف) آزمایش تجربی. ب) نمودار نیروی-جابجایی. ۲۲
شکل۲-۵. تورفتگی جانبی لوله الف) آزمایش تجربی ب) تحلیل تئوری. ۲۳
شکل۲-۶. مسطح شدن لوله بین دو صفحه موازی. ۲۴
شکل۲-۷. کمانش محوری پیش‌رونده در جاذب انرژی فلزی ۲۵
شکل۳-۱. نمونه‌ای از فوم‌های سرامیکی ۳۷
شکل۳-۲. فوم آلومینیومی سلول باز ۳۹
شکل۳-۳. ساختار فوم سلول باز مسی. ۳۹
شکل۳-۴. ساختار مولکولی فوم‌های پلیمری ۴۰
شکل۳-۵. الف) طرح واره مدل و فک‌های دستگاه کشش. ب)نمودار نیرو- جابجایی آزمون کشش.
ج)نمودار تنش-کرنش آزمون کشش ۴۲
شکل۳-۶. دسته بندی پلیمرها بر اساس نمودار تنش-کرنش. ۴۳
شکل۳-۷. الف) نحوه آزمایش ضربه آیزد و چارپی ب) نمونه آزمون چارپی پ) نمونه آزمون آیزود... ۴۵
شکل۳-۸. اثر دما و تیزی شکاف بر استحکام ضربه ۴۶
شکل۳-۹. ساختار شیمیایی اتیلن وی نیل استات ۴۷
شکل۳-۱۰. نمای بسته از سلول باز EVA ۴۸
شکل۳-۱۱. ابعاد قطعه آزمونه. ۵۱
شکل۴-۱. نمایی از دستگاه برش. ۵۶
شکل۴-۲. نمایی از سازه‌های تهیه شده. ۵۷
شکل۴-۳. نمایی از لوله و قطعه نگه دارنده. ۵۸
شکل۴-۴. آزمون فشار برای فوم EVA. ۵۹
شکل۴-۵. مقایسه نمودار تنش-کرنش حقیقی و مهندسی فوم EVA ۶۰
شکل۴-۶. ابعاد نمونه دمبلی شکل برای آزمون کشش ۶۰
شکل۴-۷. نحوه انجام آزمون کشش. ۶۱
شکل۴-۸. (الف) نمونه‌ها قبل از آزمون کشش که به ترتیب دو به دو از سمت راست متعلق به لوله-
های به قطر بیرونی ۲۲، ۴۰ و ۵۰ میلیمتر می‌باشند (ب) نمونه‌ها بعد از آزمون کشش..... ۶۱
شکل۴-۹. نمودار تنش-کرنش حقیقی نمونه‌ها. ۶۲
شکل۴-۱۰. (الف) دستگاه SANTAM. (ب) دستگاه سقوط وزنه. ۶۳

شکل۴-۱۱. وزن کردن سازه‌ها قبل از بارگذاری. ۶۴
شکل۴-۱۲. نحوه چین خوردگی لوله $O_1IF_0L_0V_00$ الف) نمای روبرو. ب) نمای بالا. ۶۶
شکل۴-۱۳. نحوه چین خوردگی لوله $O_2IF_0L_0V_00$ الف) نمای روبرو. ب) نمای بالا. ج)لوله قبل و بعد از لهیدگی. ۶۷
شکل۴-۱۴. نمودار نیرو - جابجایی برای سازه‌های تو خالی با قطرهای خارجی ۴۰ و ۵۰ میلیمتر.... ۶۷
شکل۴-۱۵. نحوه چین خوردگی سازه $O_1IF_1L_0V_00$ الف) نمای روبرو. ب) نمای بالا. ۶۸
شکل۴-۱۶. نحوه چین خوردگی سازه $O_2IF_1L_0V_00$ الف) نمای بالا. ب) نمای روبرو. ۶۸
شکل۴-۱۷. (A) چین خوردگی سازه با ارتفاع ۵۱ میلیمتر. (B) چین خوردگی سازه با ارتفاع ۱۱۰ میلیمتر ۶۸
شکل۴-۱۸. نمودار نیرو - جابجایی برای سازه پر شده با فوم با قطر لوله خارجی۴۰ و۵۰ میلیمتر... ۶۹
شکل۴-۱۹. نحوه چین خوردگی سازه $O_2IF_{1.5}L_0V_00$ الف) نمای روبرو. ب) نمای بالا ۶۹
شکل۴-۲۰. نمودار نیرو - جابجایی برای سازه تو پر $O_2IF_{1.5}L_0V_00$ ۷۰
شکل۴-۲۱. نحوه چین خوردگی سازه $O_1IF_2L_0V_00$ و $O_2IF_2L_0V_00$ الف) نمای روبرو بعد از چین‌خوردگی. ب) نمای بالا قبل از چین‌خوردگی. ۷۰
شکل۴-۲۲. نمودار نیرو - جابجایی برای سازه تو پر $O_1IF_2L_0V_00$ و $O_2IF_2L_0V_00$ ۷۱
شکل۴-۲۳. نمایی از دستگاه سقوط وزنه الف) نمای کلی دستگاه. ب) نمای قطعه ضربه زننده. ج) نحوه قرارگیری نمونه بر روی صفحه نگه‌دارنده دستگاه ۷۲
شکل۴-۲۴. بارگذاری دینامیکی سازه پر شده با فوم با قطر لوله بیرونی ۴۰ میلیمتر الف) سازه قبل از برخورد وزنه. ب) سازه پس از برخورد وزنه از ارتفاع ۱۰۰ سانتیمتری. ج) سازه پس از برخورد وزنه از ارتفاع ۲۱۰ سانتیمتری. د) سازه پس از برخورد وزنه از ارتفاع ۳۳۱ سانتیمتری. ۷۲
شکل۴-۲۵. نحوه چین خوردگی سازه‌های جاذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی الف) سازه $O_1IF_0L_2V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. ب) سازه $O_1IF_1L_2V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. ج) سازه $O_1IF_1L_0V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. د) سازه $O_2IF_0L_0V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. ه) سازه $O_2IF_1L_0V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. و) سازه $O_2IF_1L_1V_00$ قبل و بعد از برخورد وزنه. ۷۳
شکل۵-۱. (الف) لوله داخلی که با ۴۲۰۰ المان پوسته مدل شده است، (ب) فوم که با ۷۲۰۰ المان توپر مدل شده است ۸۲
شکل۵-۲. مدل اجزاء محدود لوله ساندویچی ۸۲
شکل۵-۳. کارت تعریف مدل PIECEWISE LINER PLASTICITY برای لوله داخلی ۸۳
شکل۵-۴. کارت تعریف مدل LOW DENSITY FOAM برای فوم ۸۴
شکل۵-۵. کارت تعریف مدل RIGID ۸۴
شکل۵-۶. یکی از کارت‌هایی که برای تعریف خاصیت المان‌ها باید پر شوند. ۸۵
شکل۵-۷. کارتی که باید به کمک آن حرکت صفحه صلب بالایی را به نرم‌افزار شناساند. ۸۷
شکل۵-۸. نمودار اعتبار سنجی مش‌ها برای مدل $O_1IF_0L_0V_00$. ۹۰

شکل۵-۹. نحوه چین خوردگی مدل $O_1IF_0L_0V_00$، الف) مدل اجزاء محدود سازه قبل از لهیدگی. ب) چین خوردگی کامل سازه. پ) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی کامل. ۹۱
شکل۵-۱۰. نحوه چین خوردگی مدل $O_2IF_0L_0V_00$، الف) مدل اجزاء محدود سازه قبل از لهیدگی. ب) چین خوردگی کامل سازه. پ) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی کامل ۹۲
شکل۵-۱۱. نحوه چین خوردگی مدل $O_1IF_1L_0V_00$، الف) مدل اجزاء محدود سازه قبل از لهیدگی. ب) چین خوردگی سازه. پ) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی ۹۳
شکل۵-۱۲. نحوه چین خوردگی مدل $O_2IF_1L_0V_00$، الف) مدل اجزاء محدود سازه قبل از لهیدگی. ب) چین خوردگی سازه. پ) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی. ۹۳
شکل۵-۱۳. نحوه چین خوردگی مدل $O_1IF_0L_0V_01$، الف) برش ۱/۲ سازه بعد چین خوردگی ب)مدل خطی چین خوردگی سازه. ۹۴
شکل۵-۱۴. نحوه چین خوردگی مدل $O_2IF_0L_0V_01$، الف) برش ۱/۲ سازه بعد چین خوردگی ب)مدل خطی چین خوردگی سازه. ۹۴
شکل۵-۱۵. نحوه چین خوردگی مدل $O_1IF_1L_0V_01$، الف) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی ب)مدل خطی چین خوردگی سازه ۹۵
شکل۵-۱۶. نحوه چین خوردگی مدل $O_2IF_1L_0V_01$، الف) برش ۱/۲ سازه بعد از چین خوردگی ب)مدل خطی چین خوردگی سازه ۹۵
شکل۵-۱۷. نمودار مقایسه میزان جذب انرژی در روش عددی و تجربی بارگذاری شبه استاتیکی.... ۹۷
شکل۵-۱۸. نمودار مقایسه نیروی متوسط لهیدگی در روش عددی و تجربی در بارگذاری شبه استاتیکی ۹۸
شکل۵-۱۹. مقایسه نحوه چین خوردگی برای دو مدل $O_2IF_0L_0V_00$ و $O_2IF_1L_0V_00$ در روش تجربی و شبیه سازی در بارگذاری شبه استاتیکی ۹۸
شکل۵-۲۰. مقایسه نحوه چین خوردگی برای دو مدل $O_2IF_0L_0V_01$ و $O_2IF_1L_0V_01$ در روش تجربی و شبیه سازی در بارگذاری ضربه‌ای ۹۹
شکل۶-۱. (الف) مراحل تغییر شکل یک لوله توخالی تحت بارگذاری شبه استاتیکی. (ب) نمودار نیرو- جابجایی برای لوله خالی ۱۰۴
شکل۶-۲. تأثیر ضخامت لوله بیرونی بر نمودار نیرو- جابجایی (الف) مدل $O_1IF_0L_0V_00$. (ب) مدل $O_2IF_1L_0V_00$ ۱۰۵
شکل۶-۳. تأثیر ضخامت لوله بیرونی بر نمودار انرژی جذب شده بر حسب طول لهیدگی (الف) مدل $O_1IF_0L_0V_00$. (ب) مدل $O_2IF_1L_0V_00$ ۱۰۵
شکل۶-۴. تأثیر ضریب اصطکاک بر نمودار نیرو- جابجایی برای مدل $O_1IF_0L_0V_00$ ۱۰۶
شکل۶-۵. تأثیر وجود فوم بر نمودار نیروی جابجایی (الف) مدل $O_1IF_0L_0V_00$ و $O_1IF_1L_0V_00$. (ب) مدل $O_2IF_0L_0V_00$ و $O_2IF_1L_0V_00$ ۱۰۷

شکل۶-۶. نمودار جذب انرژی مخصوص برای سازه‌های مختلف تحت بارگذاری شبه استاتیکی(آزمایش تجربی) ۱۰۸
شکل۶-۷. نمودار جذب انرژی مخصوص برای سازه‌های مختلف تحت بارگذاری ضربه‌ای(آزمایش تجربی) ۱۰۸
شکل۶-۸. اختلاف بین نیروی میانگین و بیشینه نیروی لهیدگی در بارگذاری شبه استاتیکی (آزمایش تجربی) ۱۰۹
شکل۶-۹. نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب چگالی فوم برای دو مدل $O_1IF_1L_0V_00$ و $O_2IF_1L_0V_00$ (شبیه سازی) ۱۱۰
شکل۶-۱۰. مقایسه نمودار نیرو- جابجایی سازه ($O_1IF_1L_0V_00$) با اجزای سازنده آن ۱۱۱
شکل۶-۱۱. مقایسه نمودار نیرو- جابجایی سازه ($O_2IF_1L_0V_00$) با اجزای سازنده آن ۱۱۱