

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه سمنان
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره‌ی دکترای مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله‌های مخروط ناقص شیاردار

تحت نیروی محوری فشاری

دانشجو:

محمد جواد رضوانی

استاد راهنما:

محمد دامغانی نوری

فروردین ۱۳۹۲

تقدیم بہ:

ہمہ کسانی کہ محظہ ای بعد انسانی و وجدانی خود را فراموش نمی کنند و بر آستان کران سنگ انسانیت سر

فرود می آورند و انسان را با ہمہ تفاوت ہایش ارج می نہند

تشکر و قدردانی

خداوندا! کمک کن تا چنان باشم که رضایت تو در آن باشد.

از خداوند رحمان و رحیم که نعمت علم آموزی را به اینجانب عطا فرمود سپاسگزارم و از او می‌خواهم همچنان یاریم کند تا آنچه را که آموخته‌ام در طرق صحیح بکار گیرم و در راه خدمت به بندگان بکار بندم.

آری در سرزمین اندیشه‌زای تحصیل، دانش آموختگان آنچه آموخته‌اند باید که بی‌دریغ تقدیم کنند، باشد که راهی برای آیندگان بگشایند تا آنچه را آغاز کرده‌اند دیگران به انجام برسانند.

برای ادای حقی که برگردن داریم وظیفه‌مان حکم می‌کند که پیشروان راستین خویش را بشناسیم و از اینکه دانش خویش را چراغ راهنما کرده‌اند سپاس بگذاریم. بدین منظور برخویش لازم می‌دانم از کلیه اساتید محترم دانشکده مکانیک دانشگاه سمنان، بویژه استاد گرانقدر، جناب آقای محمد دامغانی‌نوری استاد محترم راهنما، که در طول اجرای پایان‌نامه دکتری، همواره یاور و راهنمای من بودند قدردانی نموده و صمیمانه تشکر نمایم. همچنین از پارک علم و فناوری دانشگاه سمنان که طی قراردادی رساله‌ای بنده را مورد حمایت مالی قرار دادند کمال تشکر را دارم.

با احترام

محمد جواد رضوانی

چکیده

در این پایان‌نامه، یک مدل هندسی جدید و کارآمد به منظور تسهیل در شکل فروریزش متقارن لوله‌های مخروط ناقص جدار نازک ارائه شده است. در این طراحی، مشخصات ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط ناقص شیاردار داخلی و خارجی و لوله‌های شیاردار خارجی بررسی می‌شود. بدین منظور در مدل اول شیارهای محیطی با فاصله‌های مساوی به صورت داخلی و خارجی در مخروط ایجاد می‌شوند. بنابراین وقتی این سازه تحت فشار محوری قرار می‌گیرد، نیروی تغییرشکل پلاستیک در محل شیارها رخ داده و چین‌ها در فاصله‌های تعیین شده از قبل بوجود می‌آیند. در مدل دوم فقط شیارهای خارجی با فاصله‌های مساوی در سطح خارجی مخروط ایجاد می‌شوند. وقتی سازه تحت فشار محوری قرار می‌گیرد، لولاهای پلاستیک در فاصله بین شیارهای خارجی ایجاد شده که منجر به فروریزی پایدار می‌گردد. اگر چه در زمینه لوله‌های جدار نازک از جمله لوله‌های مخروط ناقص مطالعات زیادی انجام شده است، اما تاکنون هیچ مدلی که بتواند باعث پایداری و کنترل جذب انرژی این سازه مخروطی بشود ارائه نشده است. در این پایان‌نامه، چندین شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس بر روی لوله‌های مخروط جدار نازک شیاردار انجام می‌گیرد. برای تایید نتایج شبیه‌سازی عددی، تعدادی آزمایش تجربی انجام شده و میزان جذب انرژی، نیروی متوسط لهیدگی، ماکزیمم نیروی لهیدگی و مکانیزم تغییر شکل لوله‌های مخروط شیاردار داخلی و خارجی و لوله‌های مخروط با شیارهای فقط خارجی با هم مقایسه می‌شوند. به منظور بررسی عملکرد این ضربه‌گیر جدید، تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله تعداد شیارها، عمق شیارها، زاویه مخروط و وجود فوم پلی‌اورتان در مشخصات ضربه‌پذیری و شکل فروریزش این سازه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. علاوه بر این، دو مدل تحلیلی با در نظر گرفتن اثر کار سختی و صرفنظر کردن آن، برای پیش‌بینی جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی در لوله‌های مخروط ناقص شیاردار داخلی و خارجی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شکل فروریزش، انرژی جذب شده و منحنی نیرو-جابجایی با ایجاد شیارها و وجود فوم پلی‌اورتان کنترل می‌شود. بنابراین، این مدل طراحی می‌تواند یک کاندیدای خوبی برای سیستم‌های جذب انرژی قابل کنترل در لوله‌های مخروطی به شمار آید.

کلید واژه: لوله مخروط جدار نازک شیاردار- فوم پلی‌اورتان- شبیه‌سازی عددی- مدل ریاضی- جذب انرژی- نیروی متوسط لهیدگی- ماکزیمم نیروی لهیدگی- راندمان نیروی لهیدگی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست علایم و نشانه‌ها.....
و.....	فهرست جدول‌ها.....
ز.....	فهرست شکل‌ها.....
۱.....	فصل ۱- مقدمه
۱.....	۱-۱- پیشگفتار.....
۳.....	۲-۱- اهداف پایان نامه.....
۴.....	۳-۱- خلاصه پایان نامه.....
۵.....	فصل ۲- مروری بر تحقیقات انجام شده
۵.....	۱-۲- مقدمه.....
۵.....	۲-۲- ضربه و ضربه پذیری سازه.....
۷.....	۱-۲-۲- بارگذاری شبه استاتیک و دینامیک.....
۹.....	۲-۲-۲- حساسیت به نرخ کرنش.....
۹.....	۳-۲-۲- اثرات اینرسی.....
۱۱.....	۳-۲- جاذب‌های انرژی.....
۱۱.....	۴-۲- انواع لوله‌های جدار نازک.....
۱۲.....	۱-۴-۲- لوله‌های استوانه‌ای.....
۱۳.....	۲-۴-۲- لوله‌های مربع-مستطیل شکل.....
۱۴.....	۳-۴-۲- لوله‌های مستطیل باریک شونده.....
۱۵.....	۴-۴-۲- لوله‌های مخروطی.....
۱۷.....	۵-۲- سیستم‌های مختلف فروریزش.....
۱۷.....	۱-۵-۲- فروریزش متقارن.....
۱۸.....	۲-۵-۲- فروریزش نامتقارن.....
۱۸.....	۳-۵-۲- فروریزش ترکیبی.....
۱۸.....	۴-۵-۲- کمانش اولری.....
۱۹.....	۵-۵-۲- فروریزش بشکه‌ای.....
۱۹.....	۶-۵-۲- مدل وارونه شدن.....
۲۰.....	۷-۵-۲- مدل شکافته شدن.....
۲۱.....	۶-۲- جذب انرژی بوسیله فروریزش سازه.....
۲۱.....	۱-۶-۲- ویژگیهای جاذب‌های انرژی.....
۲۲.....	۲-۶-۲- جذب انرژی ویژه.....

- ۲۲.....نیروی متوسط لهیدگی.....۳-۶-۲
- ۲۳.....راندمان نیروی لهیدگی.....۴-۶-۲
- ۲۳.....فوم ها۷-۲
- ۲۴.....جنس جامدات سلولی.....۱-۷-۲
- ۲۴.....فوم های فلزی۱-۱-۷-۲
- ۲۵.....فوم های پلیمری (غیر فلزی).....۲-۱-۷-۲
- ۲۵.....انواع مدل های تغییر شکل و خواص فیزیکی.....۲-۷-۲
- ۲۵.....خواص مکانیکی۱-۲-۷-۲
- ۲۵.....نمودار تنش- کرنش در مواد متخلخل.....۲-۲-۷-۲
- ۲۷.....لوله های پر شده از فوم و تاثیر آن در جذب انرژی.....۸-۲
- ۳۰.....اثر تماسی فوم.....۹-۲

فصل ۳- شبیه سازی عددی لوله های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی و پر شده از

- ۳۲.....فوم پلی اورتان.....۳۲
- ۳۲.....مقدمه۱-۳
- ۳۲.....مدل سازی شبه استاتیک.....۲-۳
- ۳۷.....تست تجربی برای اعتبارسنجی شبیه سازی عددی تحت بارگذاری شبه استاتیک.....۳-۳
- ۳۷.....روش انجام تست تجربی برای لوله های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی.....۴-۳
- ۳۵.....صحت نتایج شبیه سازی عددی برای لوله های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی با زاویه نیم راس ۶ درجه تحت بارگذاری شبه استاتیک محوری.....۵-۳
- ۳۹.....مطالعه پارامتری لوله های مخروط شیاردار داخلی و خارجی.....۶-۳
- ۴۵.....بررسی تاثیر زاویه نیم راس مخروط در ضربه پذیری لوله های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی۱-۶-۳
- ۴۵.....بررسی تاثیر عمق شیار (d) در ضربه پذیری لوله های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی۲-۶-۳
- ۴۷.....بررسی تاثیر فوم پلی اورتان در ضربه پذیری لوله های مخروط شیاردار داخلی و خارجی۳-۶-۳
- ۵۱.....ساخت فوم پلی اورتان.....۱-۳-۶-۳
- ۵۲.....مشخصات فیزیکی و مکانیکی فوم پلی اورتان.....۲-۳-۶-۳
- ۵۴.....شبیه سازی عددی لوله های مخروط شیاردار داخلی و خارجی پر شده از فوم پلی اورتان.....۳-۳-۶-۳
- ۵۴.....بررسی صحت نتایج شبیه سازی عددی لوله های مخروط شیاردار داخلی و خارجی پر شده از فوم پلی اورتان.....۴-۳-۶-۳
- ۵۷.....مقایسه ضربه پذیری لوله های مخروط ناقص شیاردار با لوله های استوانه ای شیاردار۷-۳
- ۶۳.....بررسی اثر شیارهای خارجی در ضربه پذیری لوله های مخروط ناقص.....۸-۳
- ۶۴.....روش انجام تست.....۹-۳
- ۶۷.....مدل سازی شبه استاتیک لوله های مخروط شیار خارجی :۱۰-۳
- ۶۹.....مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی عددی لوله های مخروط شیار خارجی:.....۱۱-۳

فصل ۴ - بررسی مدل‌های تحلیلی رفتار ضربه‌گیرهای مخروطی جدار نازک شیاردار داخلی و

خارجی تحت نیروی محوری فشاری..... ۷۴

۱-۴- مقدمه ۷۴

۲-۴- مدل تحلیلی مچالگی مخروط جدار نازک شیاردار داخلی و خارجی بدون اعمال کار سختی ۷۴

۱-۲-۴- محاسبه انرژی خمشی ۷۵

۲-۲-۴- محاسبه انرژی غشایی ۷۶

۳-۲-۴- انرژی بر واحد طول ۷۸

۴-۲-۴- نیروی متوسط لهیدگی ۷۸

۳-۴- مچالگی محوری لوله‌های استوانه‌ای شیاردار ۷۹

۴-۴- مدل تحلیلی مچالگی مخروط جدار نازک شیاردار داخلی و خارجی با اعمال کار سختی ۷۹

۱-۱-۴-۴- محاسبه انرژی غشایی ۸۰

۲-۱-۴-۴- انرژی بر واحد طول لوله ۸۳

۳-۱-۴-۴- نیروی متوسط لهیدگی ۸۳

۵-۴- بررسی صحت نتایج مدل‌های تحلیلی برای لوله‌های مخروط شیاردار ۸۳

۶-۴- محاسبه جذب انرژی در فوم پلی اورتان با استفاده از مدل تحلیلی گیسون ۸۶

۱-۶-۴- مدل گیسون ۸۷

۲-۶-۴- اثر تقابل فوم با دیواره لوله مخروط شیاردار ۸۹

فصل ۵ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۹۳

۱-۵- نتیجه‌گیری ۹۳

۱-۱-۵- بخش‌های اساسی پایان‌نامه ۹۳

۲-۱-۵- نوآوری‌های این پایان‌نامه ۹۵

۲-۵- پیشنهادات برای انجام کارهای آینده ۹۵

فهرست مراجع ۹۷

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
طول لوله	L
زاویه نیم راس مخروط	α
قطرهای متوسط مخروط	D_1, D_2
عرض شیار و رینگ	w
عمق شیار و رینگ	d
فاصله بین دو شیار	h
فاصله بین رینگها	λ
ضخامت دیواره لوله	t_0
ضخامت در عمق شیار	$t'_0 = t_0 - d = ct_0$
نسبت ضخامت در عمق شیار به ضخامت دیواره لوله	$c = t'_0 / t_0$
تعداد شیارها	N
تعداد چین‌ها	K
طول لهیدگی کل	Δ
نیروی متوسط لهیدگی	P_m
ماکزیمم نیروی لهیدگی	P_{max}
انرژی جذب شده	E_a
راندمان نیروی لهیدگی	CFE
تنش واقعی	σ_t
تنش تسلیم	σ_y
تنش نهایی	σ_u
تنش جاری	σ_0
ممان خمش پلاستیک بر واحد طول	M_p
انرژی تلف شده در خمش لولاهای پلاستیک در تشکیل چین i ام	W_{bi}
انرژی تلف شده در کشیدگی محیطی چین i ام	W_{ci}
انرژی کل حاصل از لهیدگی	W_{total}
انرژی تلف شده چین خارجی از چین i ام	$W_{i,Ext}$
انرژی تلف شده چین داخلی از چین i ام	$W_{i,Int}$

ε_p	کرنش پلاستیک
ε_h, σ_h	تنش و کرنش محیطی
$\bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$	تنش و کرنش موثر
ε_t, σ_t	تنش و کرنش در راستای ضخامت
ε_l, σ_l	تنش و کرنش طولی
θ	زاویه خمش
dA	مساحت المان حلقوی
ε	کرنش در المان حلقوی
ε_D	قفل شدگی کرنش
m, D	خصوصیات میکرومکانیکی سلول های فوم

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰۰۰.....	۳۶
جدول ۲-۳: نقاط تنش واقعی- کرنش پلاستیک استفاده شده برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 در نرم افزار آباکوس.....	۳۶
جدول ۳-۳: ابعاد نمونه‌های مخروطی شیاردار داخلی و خارجی جهت تست فشار محوری.....	۳۸
جدول ۴-۳: نتایج تجربی و شبیه سازی عددی لوله های مخروط با زاویه نیم راس ۶ درجه بعد از لهیدگی محوری.....	۴۵
جدول ۵-۳: مقایسه نتایج تجربی لوله های مخروط شیاردار با زاویه نیم راس ۲ درجه و ۶ درجه بعد از لهیدگی محوری.....	۴۷
جدول ۶-۳: خصوصیات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6063-T6 از تست تجربی.....	۴۸
جدول ۷-۳: مقایسه نتایج تجربی لوله‌های مخروط شیاردار با عمق شیارهای ۱mm و ۰/۶ mm.....	۵۱
جدول ۸-۳: خصوصیات فوم قابل فروریزش با کار سختی ایزوتروپیک.....	۵۵
جدول ۹-۳: مشخصات هندسی لوله‌های استوانه‌ای و مخروط شیاردار.....	۶۱
جدول ۱۰-۳: ابعاد هندسی نمونه‌های مخروط شیار خارجی.....	۶۵
جدول ۲-۵: نقاط تنش واقعی- کرنش پلاستیک استفاده شده برای آلیاژ آلومینیوم 6063-T6 در نرم افزار آباکوس.....	۶۹
جدول ۱۲-۳: نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی لوله‌های مخروط شیار خارجی بعد از لهیدگی محوری.....	۷۳
جدول ۱-۴: مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی برای جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی.....	۸۶
جدول ۲-۴: ضرایب وابسته به تراکم با توجه به مدل گیبسون و مقادیر پیشنهاد شده توسط گیبسون [۹۷].....	۸۸
جدول ۳-۴: ضرایب مستقل از تراکم با توجه به مدل گیبسون [۹۷].....	۸۸
جدول ۴-۴: مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی جذب انرژی لوله های مخروط شیاردار پر شده از فوم پلی اورتان.....	۹۱

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: شدت و نوع تصادف جاده در سال ۲۰۰۱ در کوئینزلند [۱].....	۱
شکل ۲-۱: انواع مختلف خودرو شرکت کننده در تصادفات مرگبار کوئینزلند در سال ۲۰۰۱ [۱].....	۲
شکل ۳-۱: مدل شبیه سازی شده برخورد خودرو به ریل گارد جاده [۱].....	۲
شکل ۴-۱: درصد جهت تاثیر ضربه بر محیط خودرو در میزان خرابی بدنه [۱].....	۳
شکل ۱-۲: چگونگی جذب انرژی و حفاظت از سرنشینان در: الف) خودرو ، ب) هواپیما [۴].....	۶
شکل ۲-۲: مشخصات لهیدگی سازه های مقاوم در برابر ضربه [۴].....	۶
شکل ۳-۲: سیستم جاذب انرژی جلوی شاسی خودرو [۶].....	۷
شکل ۴-۲: اجزاء ضربه پذیر کف هلیکوپتر [۴].....	۷
شکل ۵-۲: مقایسه کماتش پیش رونده شبه استاتیک برای لوله مدور در حالت شبیه سازی عددی و تجربی [۱].....	۸
شکل ۶-۲: مقایسه کماتش پیش رونده دینامیکی برای لوله مدور در حالت عددی و تجربی [۱].....	۸
شکل ۷-۲: چگونگی تغییر منحنی نیرو-جابجایی در دو نوع سازه متناسب با نحوه اعمال بار [۱].....	۱۰
شکل ۸-۲: ضربه گیرهای استوانه‌ای [۱۱].....	۱۲
شکل ۹-۲: حالت فروریزش در لوله آلومینیومی مربع شکل [۱۱].....	۱۳
شکل ۱۰-۲: فروریزش لوله‌های مربعی و استوانه‌ای تحت بار مایل [۱۱].....	۱۴
شکل ۱۱-۲: هندسه لوله های مستطیل باریک شونده [۱۱].....	۱۵
شکل ۱۲-۲: مراحل فروریزش لوله مخروطی با زاویه نیم راس ۵ درجه [۹۰].....	۱۶
شکل ۱۳-۲: فرو ریزش متقارن [۱۱].....	۱۷
شکل ۱۴-۲: فروریزش نامتقارن [۱۱].....	۱۸
شکل ۱۵-۲: فروریزش ترکیبی [۱۱].....	۱۸
شکل ۱۶-۲: کماتش اولری [۱۱].....	۱۹
شکل ۱۷-۲: تغییر شکل خمره ای [۱۱].....	۱۹
شکل ۱۸-۲: هندسه قالب [۱۱].....	۲۰
شکل ۱۹-۲: وارونه شدن به سمت داخل و خارج [۱۱].....	۲۰
شکل ۲۰-۲: شکافته شدن [۱۱].....	۲۰
شکل ۲۱-۲: ویژگی های یک جاذب انرژی ایده آل تحت بارگذاری محوری.....	۲۱
شکل ۲۲-۲: پاسخ نیرو-جابجایی لوله استوانه ای پر شده از فوم تحت نیروی محوری.....	۲۳
شکل ۲۳-۲: ساختمان سلول فوم (a): سلول باز، (b) سلول بسته [۷۸].....	۲۴
شکل ۲۴-۲: نمونه ساخته شده از فوم آلومینیوم [۷۸].....	۲۴
شکل ۲۵-۲: نمودار تنش-کرنش فوم پلی اورتان با چگالی کم [۷۷].....	۲۶

- شکل ۲-۲۶: نمودار تنش-کرنش فوم پلی اورتان و تعیین موقعیت قفل کرنش [۸۶]..... ۲۸
- شکل ۲-۲۷: اثر تقابل فوم با دیواره در میزان اتلاف انرژی [۸۷]..... ۲۹
- شکل ۳-۱: (الف) بارگذاری و شرایط مرزی روی لوله مخروط شیاردار داخلی و خارجی، (ب) مش بندی لوله مخروط شیاردار داخلی و خارجی..... ۳۳
- شکل ۳-۲: همگرایی نیروی پیک اولیه برحسب اندازه مش برای لوله مخروط یازده شیار..... ۳۴
- شکل ۳-۳: انرژی داخلی و جنبشی برای لوله مخروط یازده شیار تحت بارگذاری شبه استاتیک..... ۳۵
- شکل ۳-۴: مقایسه تجربی و شبیه سازی عددی منحنی های نیرو-جابجایی برای نمونه F15-6..... ۳۵
- شکل ۳-۵: تنش واقعی برحسب کرنش پلاستیک برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 از تست تجربی..... ۳۶
- شکل ۳-۶: نمونه های مخروط شیاردار و جزئیات ابعاد آن..... ۳۸
- شکل ۳-۷: دستگاه پرس هیدرولیکی DARTEC ۳۰ تنی..... ۳۹
- شکل ۳-۸: مقایسه تجربی و شبیه سازی فروریزش نهایی نمونه های مخروط خالی با زاویه نیم راس ۶ درجه..... ۴۰
- شکل ۳-۹: مراحل مختلف فروریزش نمونه ۱۵ شیار (F15-6)..... ۴۱
- شکل ۳-۱۰: مقایسه تجربی و شبیه سازی عددی منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه های مخروط خالی با زاویه نیم راس ۶ درجه: (الف) نمونه بدون شیار (F0-6) (ب) نمونه ۹ شیار (F9-6)، (پ) نمونه ۱۱ شیار (F11-6)، (ت) نمونه ۱۳ شیار (F13-6)، (ث) نمونه ۱۵ شیار (F15-6) و (ج) نمونه ۱۷ شیار (F17-6)..... ۴۳
- شکل ۳-۱۱: منحنی نیرو-جابجایی متوسط برای نمونه های مخروط خالی شیاردار..... ۴۴
- شکل ۳-۱۲: مقایسه فروریزش نهایی لوله های مخروط با زوایای نیم راس ۲ درجه و ۶ درجه برای ۱۳، ۱۵ و ۱۷ شیار..... ۴۶
- شکل ۳-۱۳: مقایسه تجربی منحنی نیرو-جابجایی با زوایای نیم راس مخروط ۲ درجه و ۶ درجه برای: ۴۷
- شکل ۳-۱۴: مقایسه شکل فروریزش لوله های مخروط با زاویه نیم راس ۴ درجه با عمق شیارهای ۱ mm و ۰/۶ mm..... ۴۸
- شکل ۳-۱۵: مقایسه مراحل فروریزش لوله مخروط ۱۵ شیار با عمق شیارهای ۱ mm و ۰/۶ mm..... ۴۹
- شکل ۳-۱۶: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی با عمق شیارهای ۱ mm و ۰/۶ mm..... ۵۰
- شکل ۳-۱۷: میزان درصد افزایش جذب انرژی در لوله های مخروط شیاردار با عمق شیار ۰/۶ mm برحسب تعداد شیارها..... ۵۱
- شکل ۳-۱۸: نمایی از فیکسچر به منظور نگهداری لوله های مخروط پر شده از فوم..... ۵۲
- شکل ۳-۱۹: ظرفیت جذب انرژی برحسب چگالی های مختلف فوم پلی اورتان [۷۷]..... ۵۳
- شکل ۳-۲۰: نمونه مکعبی فوم پلی اورتان جهت تست فشار محوری..... ۵۳
- شکل ۳-۲۱: منحنی تنش-کرنش فوم پلی اورتان با چگالی 266 kg/m^3 ۵۴
- شکل ۳-۲۲: ساختار سلول های فوم پلی اورتان با چگالی 266 kg/m^3 ۵۴
- شکل ۳-۲۳: مقایسه تجربی و شبیه سازی عددی منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه های مخروط شیاردار پر شده از فوم با زاویه نیم راس ۴ درجه: (الف) نمونه ۱۱ شیار (F11-4-0.6)، (ب) نمونه ۱۳ شیار (F13-4-0.6)، (پ) نمونه ۱۵ شیار (F15-4-0.6)..... ۵۶

شکل ۳-۲۴: مقایسه تجربی و شبیه سازی عددی فروریزش نمونه های مخروط پر شده از فوم با زاویه نیم راس ۴ درجه: ۵۸

شکل ۳-۲۵: مقایسه تجربی فروریزش نهایی نمونه های مخروط شیاردار خالی و پر شده از فوم پلی اورتان با زاویه نیم راس ۴ درجه..... ۵۹

شکل ۳-۲۶: نمای برش خورده نمونه مخروط ۱۳ شیار خالی و پر شده از فوم ۵۹

شکل ۳-۲۷: مقایسه تجربی جذب انرژی برای نمونه های مخروط خالی و پر شده از فوم پلی اورتان..... ۵۹

شکل ۳-۲۸: مقایسه تجربی راندمان نیروی لهیدگی برای نمونه های مخروط خالی و پر شده از فوم پلی اورتان ۶۰

شکل ۳-۲۹: مقایسه تجربی ماکزیمم نیروی لهیدگی برای نمونه های مخروط خالی و پر شده از فوم پلی اورتان ۶۰

شکل ۳-۳۰: فروریزش نهایی لوله های استوانه ای و مخروط شیاردار ۶۱

شکل ۳-۳۱: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی برای لوله های استوانه ای و مخروط شیاردار:..... ۶۲

شکل ۳-۳۲: مقایسه جذب انرژی، راندمان نیروی لهیدگی و ماکزیمم نیروی لهیدگی در لوله های مخروطی و استوانه ای شیاردار..... ۶۳

شکل ۳-۳۳: لوله مخروط ناقص با شیارهای خارجی و جزئیات هندسی آن ۶۴

شکل ۳-۳۴: نمونه مخروطی ۴ درجه بدون شیار ۶۵

شکل ۳-۳۵: حالت نهایی نمونه های مخروط شیار خارجی ۴ درجه بعد از لهیدگی محوری..... ۶۶

شکل ۳-۳۶: نمودار نیرو-جابجایی نمونه های مخروط شیار خارجی ۴ درجه..... ۶۷

شکل ۳-۳۷: (الف) بارگذاری و شرایط مرزی روی لوله مخروط شیار خارجی، (ب) مش بندی مخروط شیار خارجی ۶۷

شکل ۳-۳۸: شبیه سازی عددی لوله های مخروط شیار خارجی با استفاده از نرم افزار آباکوس برای: (الف) C4-R4، (ب) C4-R5، (پ) C4-R6 ۷۰

شکل ۳-۳۹: مقایسه تجربی و شبیه سازی عددی منحنی نیرو-جابجایی برای نمونه های مخروط: ۷۲

شکل ۴-۱: مدل فروریزش لوله مخروط ناقص شیاردار..... ۷۴

شکل ۴-۲: شرایط تنش و کرنش بین لوله های پلاستیک..... ۸۱

شکل ۴-۳: دیاگرام تنش-کرنش لگاریتمی با استفاده از تست تجربی برای: (الف) آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 (ب) آلیاژ آلومینیوم 6063-T6..... ۸۴

شکل ۴-۴: مقطع برش خورده نمونه های مخروط شیاردار بعد از لهیدگی محوری ۸۵

شکل ۴-۵: نمونه ای از منحنی نیرو-جابجایی فوم پلی اورتان تحت فشار محوری..... ۸۷

شکل ۴-۶: منحنی تنش-کرنش فوم صلب پلی اورتان با استفاده از روابط تحلیلی (مدل گیبسون) ۸۹

شکل ۴-۷: اثر تقابل فوم با دیواره مخروط شیاردار در میزان اتلاف انرژی..... ۹۰

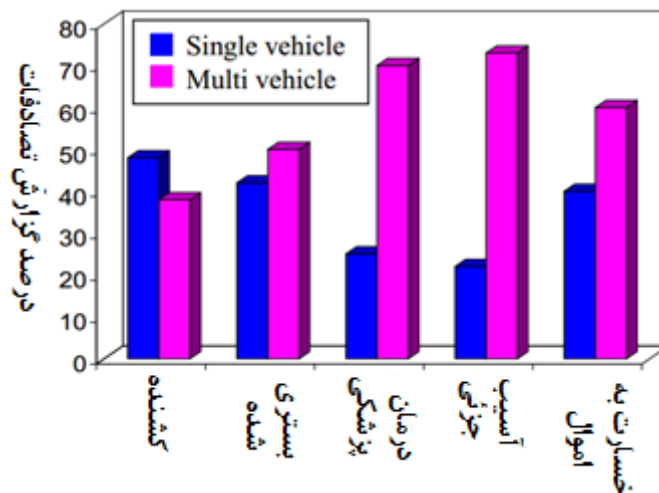
شکل ۴-۸: مقایسه نتایج تجربی و مدل های تحلیلی جذب انرژی لوله های مخروط شیاردار پر شده از فوم پلی اورتان بر حسب شیارها..... ۹۲

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ - پیشگفتار

در سال‌های اخیر، تعداد وسایل نقلیه در جاده‌ها به دلیل پیشرفت در صنعت خودرو و حمل و نقل، به سرعت افزایش یافته است. افزایش تقاضا برای وسایل نقلیه و همچنین نیاز مبرم به سیستم حمل و نقل نشان دهنده اعتماد بیشتر به صنعت خودرو می‌باشد. پس از آن، حوادث و سوانح تصادف خودرو به عنوان یک مشکل عمده سلامتی در سراسر جهان تبدیل شده است. این حوادث به ویژه در مورد وسایل نقلیه جاده‌ای از جمله اتومبیل، کامیون‌ها، اتوبوس‌ها و وسایل نقلیه سنگین به وجود آمده است.

شکل (۱-۱) چگونگی نوع تصادفات در مقایسه با شدت تصادفات را نشان می‌دهد. این اطلاعات نشان می‌دهد که تصادفات جاده‌ای (چند خودرو) باعث ایجاد ضربه اقتصادی و صدمات جانی بیشتری به جامعه می‌شود. بنابراین، تلاش مستمر برای غلبه بر این مشکل در صنایع تولید کننده خودرو وجود دارد.

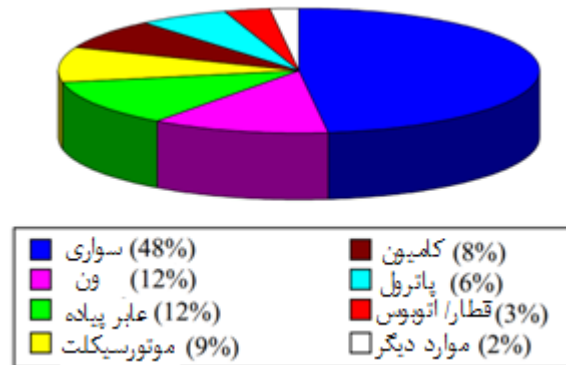


شکل ۱-۱: شدت و نوع تصادف جاده در سال ۲۰۰۱ در کوئینزلند [۱]

ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه‌های محافظ، به الزامات ایمنی سختگیرانه جهت ایجاد ایمنی بیشتر برای سرنشینان تبدیل شده است. به عنوان مثال، جهت کاهش اثرات مضر برخورد، به استفاده از جاذب انرژی به عنوان ضربه‌گیر در خودرو پرداخته می‌شود. عمدتاً این جاذب‌ها به صورتی طراحی شده‌اند که در برابر ضربه مقاومت زیادی از خود نشان نداده و در نتیجه باعث حفاظت از سازه اصلی و سرنشینان آن می‌شود.

برای دهه‌های بسیاری، انواع مختلفی از جاذب‌های انرژی در سازه خودرو، به ویژه خودروهای سبک مورد استفاده واقع شده است تا بتواند صدمات وارده به سرنشین را کاهش دهد. تعداد قابل توجهی از

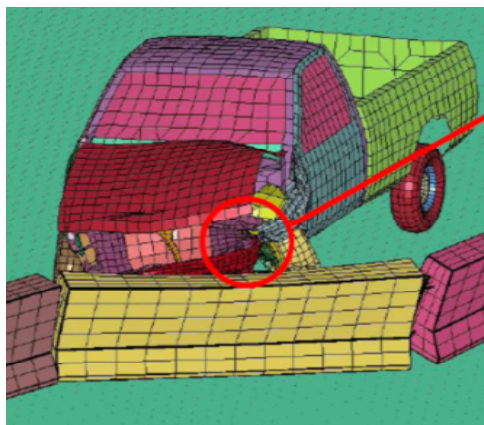
تلفات جاده‌ای، ناشی از تصادفات خودرو است. در شکل (۲-۱) انواع مختلف خودرو شرکت کننده در تصادفات آورده شده است.



شکل ۲-۱: انواع مختلف خودرو شرکت کننده در تصادفات مرگبار کوئینزلند در سال ۲۰۰۱ [۱]

به تازگی، استفاده از جاذب‌های انرژی در سایر وسایل نقلیه سنگین و سیستم‌های حمل و نقل به عنوان ذخیره ساز انرژی (در جلوی لکوموتیو، سازه‌های کف هواپیما و لبه‌های اسکله جهت نگهداری کشتی) گسترش یافته است.

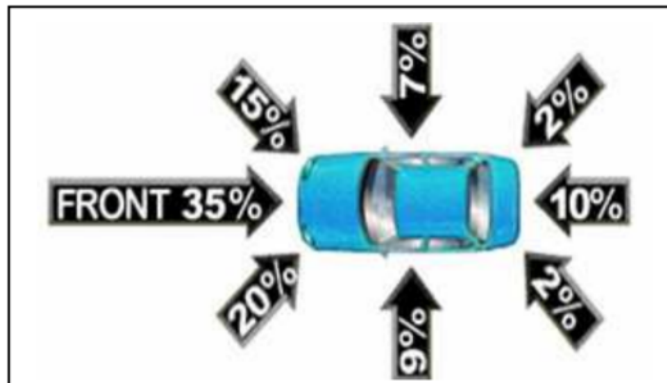
همانطور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، در جریان یک حادثه برخورد به ویژه تصادفات وسیله نقلیه، سازه به ندرت تحت بارگذاری محوری خالص یا بارگذاری خمشی خالص آزمایش می‌شود بلکه در یک رفتار مختلط تحت یک ترکیبی از بارهای محوری و غیر محوری یا مایل فروریزش می‌نماید. چنین بارگذاری سبب می‌شود که جاذب انرژی به صورت ترکیبی از حالت فروریزش محوری و خمشی تغییر شکل نماید. یک بارگذاری مایل تمایل دارد لوله به حالت فروریزش خمشی تغییر شکل یابد که معمولاً در کاهش ظرفیت جذب انرژی لوله تاثیرگذار می‌باشد.



شکل ۳-۱: مدل شبیه سازی شده برخورد خودرو به ریل گارد جاده [۱]

در مورد برخورد خودرو، جهت خط عمل نیروی وارده ممکن است در راستای سطح افقی تغییر یابد. به عنوان مثال، الزامات صنعت خودرو در نروژ بدین گونه است که سیستم سپر باید یک بار اعمال

شده در زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور طولی را تحمل کند. به طور مشابه، در مورد یک هواپیما در شرایط سقوط عمودی در حالت دوران حول محور طولی و عرضی هواپیما، باید به منظور تحمل ضربه مورب الزامات ضربه‌پذیری در نظر گرفته شود. با این حال، اکثر تحقیقات تا به امروز تنها بر روی بارگذاری محوری به جای بارگذاری مورب، در حوادث ضربه خودرو متمرکز شده است. تحقیقات انجام شده توسط (ANCAP 2006) نشان داد که مقدار ضربه مایل به خودرو در حدود ۳۹٪ از کل ضربه‌ها به خودرو مطابق شکل (۴-۱) می‌باشد. به همین دلیل اکثر تحقیقات بر روی بارگذاری محوری متمرکز شده است.



شکل ۴-۱: درصد جهت تاثیر ضربه بر محیط خودرو در میزان خرابی بدنه [۱]

۲-۱- اهداف پایان نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه، ایجاد اطلاعات و طراحی در توانایی جذب انرژی لوله‌های مخروط ناقص شیاردار به عنوان سیستم جاذب انرژی می‌باشد. بنابراین، در این پایان‌نامه با ارائه دو مدل هندسی متفاوت برای مخروط، مشخصات ضربه‌پذیری آن بررسی می‌شود.

در اولین مدل، شیارهای محیطی داخلی و خارجی در لوله مخروط ناقص ایجاد می‌گردد و اثر تعداد شیار و نیز وجود فوم پلی‌اورتان در میزان جذب انرژی و نحوه فروریزش مخروط شیاردار مقایسه می‌گردند.

در دومین مدل، فقط شیارهای خارجی با فاصله مساوی بر روی سطح خارجی مخروط ناقص ایجاد می‌شود و اثر تعداد شیارها در میزان جذب انرژی و نحوه فروریزش مقایسه می‌گردند. بنابراین، اهداف این پایان‌نامه عبارتند از:

- ❖ شبیه‌سازی عددی لوله‌های مخروط خالی شیاردار داخلی و خارجی و پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از نرم افزار آباکوس
- ❖ ارائه مدل تحلیلی برای مخروط ناقص شیاردار داخلی و خارجی خالی و پر شده از فوم به منظور محاسبه جذب انرژی
- ❖ مقایسه ضربه‌پذیری لوله‌های مخروط شیاردار با لوله‌های استوانه‌ای شیاردار به عنوان سیستم‌های جاذب انرژی

❖ بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله‌های مخروط با شیارهای فقط خارجی

۱-۳- خلاصه پایان نامه

در فصل دوم به بررسی تحقیقات انجام شده مرتبط با اهداف و گستره این پایان‌نامه معطوف می‌شود. در نتیجه به واسطه اهداف پایان‌نامه، زمینه‌هایی که در آن نیاز به تحقیقات بیشتری می‌باشد شناسایی شده‌اند. مباحث مورد بحث عبارتند از جذب‌های انرژی بویژه تمرکز روی لوله‌های جدار نازک، تجزیه و تحلیل و آزمایش جذب‌های انرژی و در نهایت مدل المان محدود جذب‌های انرژی.

در فصل سوم، شبیه‌سازی عددی لوله‌های مخروط ناقص خالی با شیارهای داخلی و خارجی و پر شده از فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری محوری است، که مراحل انجام مدل المان محدود، بعلاوه تکنیک‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی شبه استاتیک پوشش داده می‌شود. همچنین، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله تعداد شیارها، عمق شیارها و زاویه نیم‌راس مخروط در ضربه‌پذیری سازه بررسی می‌شود. در ادامه فصل، شبیه‌سازی لوله‌های مخروط ناقص با شیارهای فقط خارجی است که به منظور بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، تعدادی تست تجربی انجام شده که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

در فصل چهارم، ارائه مدل‌های تحلیلی به منظور محاسبه جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی برای لوله‌های مخروط ناقص با شیارهای داخلی و خارجی خالی و پر شده از فوم می‌باشد. در این مدل‌ها با در نظر گرفتن اثر کار سختی و صرف‌نظر از آن، روابط جذب انرژی و نیروی متوسط لهیدگی محاسبه شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد.

در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار می‌باشد.

فصل ۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی تحقیقات انجام شده مرتبط با پایان نامه پرداخته می‌شود. همه مطالعات و تئوری‌های بیان شده به منظور افزایش درک از پایان نامه شناسایی شده‌اند. موضوع پایان نامه مرتبط با چندین حوزه تحقیق خواهد بود که به شرح زیر بیان می‌شود:

۱- ضربه‌پذیری سازه

۲- جذب انرژی بوسیله فروریزش سازه

۳- سازه‌های جاذب انرژی

۴- آنالیز جاذب‌های انرژی

۵- انواع جاذب‌های انرژی

۶- جامدات سلولی

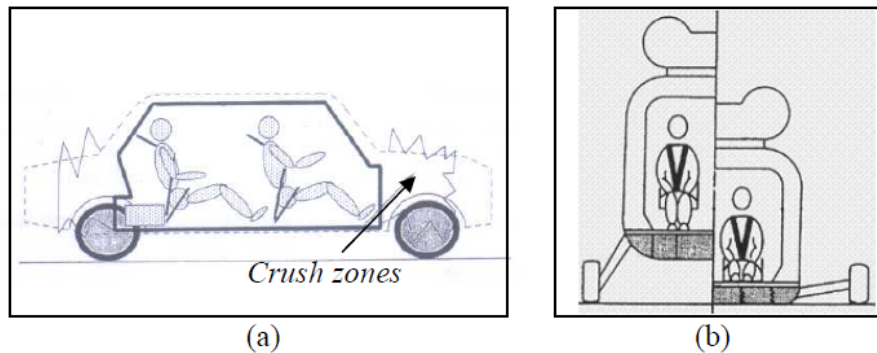
۲-۲- ضربه و ضربه‌پذیری سازه

مهمترین حوزه‌ها در آنالیز برخورد، ضربه‌پذیری سازه و مکانیک ضربه می‌باشند. بنابراین مفاهیم اصلی ضربه‌پذیری سازه و مکانیک ضربه پیش از گسترش سیستم‌های جاذب انرژی، نیاز به تشریح گسترده آنها است. به طور کلی، یک سیستم جاذب انرژی غالباً به صنعت خودرو مرتبط شده، که نه تنها برای ساخت خودرو بلکه برای وسایل نقلیه سنگین، راه آهن، هوافضا و ساخت کشتی است. به طور مثال لوله‌های جدار نازک به طور گسترده به عنوان اجزاء جاذب انرژی اصلی در صنعت اتومبیل برای تحمل و جذب انرژی ضربه استفاده می‌شوند.

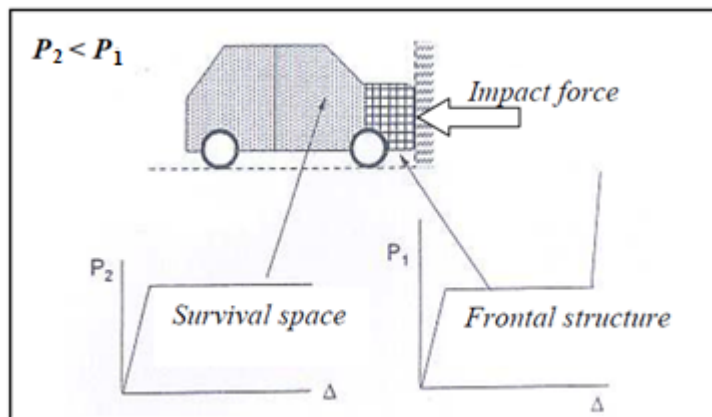
به طور کلی، ضربه‌پذیری به عنوان توانایی یک سازه خودرو برای تحمل بار ضربه به منظور حفاظت از بقای آن بدون هیچگونه خسارت جدی یا مرگ سرنشینانش تعریف شده است. به طور مثال، زمینه تحقیق ضربه‌پذیری سازه می‌تواند به عنوان یک بررسی در تاثیر عملکرد ضربه یک سازه وقتی که با سازه دیگر برخورد می‌کند، تشریح شود. [۲-۳]. در دهه‌های بسیار، به طور مداوم تاکید زیادی بر روی ضربه‌پذیری یک سازه جهت حمل سرنشینان وسیله نقلیه شده است. شکل (۲-۱) مفاهیم اصلی ضربه‌پذیری، به منظور حفاظت از فضای سرنشینان خودرو را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، با توجه به تئوری اصلی ضربه‌پذیری، بار ضربه منتقل شده به بدنه خودرو باید از باری که باعث تغییر شکل دائمی فضای سرنشینان خودرو می‌شود

کمتر باشد. اگر این نیاز به ضربه پذیری، در خودرو حاصل شود، سازه‌های مقاوم در برابر بار ضربه می‌توانند به عنوان جاذب‌های انرژی رفتار کنند.



شکل ۱-۲: چگونگی جذب انرژی و حفاظت از سرنشینان در: الف) خودرو، ب) هواپیما [۴]



شکل ۲-۲: مشخصات لهیدگی سازه‌های مقاوم در برابر ضربه [۴]

در کاربردهای واقعی، یک سیستم جاذب انرژی شامل سازه‌های جدار نازک مانند جعبه‌های ضربه در خودروها برای تحقق ضربه‌پذیری و در نتیجه حفاظت سرنشینان خودرو استفاده شده است [۵]. شکل (۳-۲) جلوی شاسی که به جعبه ضربه متصل شده است را نشان می‌دهد. از مثال‌های متداول دیگر سیستم‌های جاذب انرژی، تیرهای ساخته شده از لوله که در کف هلیکوپترها (شکل ۲-۴)، سپرها، ریل‌گاردها و آسانسورها استفاده می‌شوند، می‌توان نام برد.