

الحمد لله
البرحمين
البرحمين



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای رضا اکبری پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی عددی اثرات شرایط تکیه گاهی بر ارتعاشات پوسته استوانه ای جدار نازک تحت دتویشن های متوالی در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - هوافضا پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مجید میرزایی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر غلامحسین رحیمی شعرباف مقدس	استاد	
استاد ناظر	دکتر سعید کریمیان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر امین فرخ آبادی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر سعید کریمیان	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسان‌ها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم‌افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

آیین نامه چاپ پایان‌نامه‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی- پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه‌ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته **مهندسی هوافضا** است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده

فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر **مجید میرزائی** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.


ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶: اینجانب **رضا اکبری** دانشجوی رشته **مهندسی هوافضا** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: **رضا اکبری**

تاریخ و امضا:





دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی هوافضا (طراحی سازه‌های هوافضایی)

شبیه‌سازی عددی اثرات تکیه‌گاهی بر ارتعاشات پوسته استوانه‌ای جدار نازک تحت دتوئیشن-

های متوالی

رضا اکبری

استاد راهنما:

دکتر مجید میرزایی

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیزم و همسر فداکار و مهربانم و
فرزند نازنینم

تشکر و قدردانی

با تشکر فراوان از اساتید محترم دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس که در راه تعلیم و تربیت دانشجویان این دانشکده، نهایت سعی و تلاش خود را دارند. خصوصا لازم می‌بینم که از زحمات استاد گرانقدر آقای دکتر میرزایی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. امید است که بتوانم رهنمودهای ایشان را در همه مراحل زندگی‌ام به کار برم.

چکیده

پوسته‌های تحت فشار در صنایع کاربردهای گوناگونی دارند: خطلوله‌های گازی، لوله‌های تحت فشار در هواپیما، مخازن سوخت و موتورهای تراک ضربه‌ای همه نمونه‌هایی از پوسته‌های تحت فشار هستند. موتورهای تراک ضربه‌ای که در پایان‌نامه حاضر مورد بحث قرار گرفته‌اند، نسل جدید موتورها هستند و خصوصیات قابل توجهی دارند که می‌توانند به عنوان گزینه‌ای بسیار مناسب برای جایگزینی موتورهای در حال استفاده به منظور ایجاد نیروی پیشران در صنعت هوانوردی، در نظر گرفته شوند. همچنین از این موتورها برای تولید نیروی برق در نیروگاه‌ها هم استفاده می‌گردد. در موتور تراک ضربه‌ای بارگذاری فشاری ناشی از انفجار گازی (دتونیشن) بوده و به صورت متوالی صورت می‌پذیرد. در تحقیقات قبلی تعداد بارگذاری‌های پایین و شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده در مدل اعمال شده است. این شرایط برای بررسی ارتعاشات در موتور تراک ضربه‌ای کافی نیست. برای اعمال بارگذاری باید تعداد دتونیشن‌های متوالی زیاد بوده و شرایط مرزی به صورت یک سردرگیر یا یک سردرگیر و یک سر دیگر تکیه‌گاه ساده در مدل اعمال شود. بنابراین اساس اصلی تحقیق حاضر بر بررسی رفتار لوله دتونیشن تحت بارگذاری‌های متوالی با تعداد بالا و همچنین اثر شرایط مرزی بر ارتعاشات درون لوله، بنانهاده شده است.

در این راستا، در تحقیق حاضر، ابتدا به بسط مدل تحلیلی برای دتونیشن‌های متوالی پرداخته شده است تا بتوان تعداد زیاد بارگذاری را در مدل اعمال نمود. برای حل روابط تحلیلی از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. پس از بررسی رفتار ارتعاشی لوله در تعداد زیاد دتونیشن، اثر شرایط مرزی در مدل عددی بررسی می‌گردد. مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار آباکوس صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه برای این نوع بارگذاری تجهیزات آزمایشگاهی وجود ندارد، برای تایید نتایج عددی از مدل تحلیلی استفاده می‌گردد. همچنین در این پایان‌نامه، اثر فرکانس بارگذاری بر پاسخ سازه‌ای لوله دتونیشن نشان داده می‌شود.

کلید واژه: لوله دتونیشن، موتور تراک ضربه‌ای، امواج الاستیک، بارگذاری متحرک، پوسته استوانه جدار نازک

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علائم	ک
فهرست جدول‌ها	ل
فهرست شکل‌ها	م
فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- پیشگفتار	۱
۲-۱- تاریخچه	۴
۳-۱- ضرورت تحقیق حاضر	۶
فصل ۲- پاسخ سازه ای پوسته استوانه ای به بارگذاری متحرک داخلی	۸
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- بارگذاری فشاری	۸
۱-۲-۲- شاک	۹
۲-۲-۲- انفجار گازی	۹
۳-۲- پاسخ سازه ای و پیشروی امواج الاستیک	۱۲
۱-۳-۲- پاسخ سازه‌ای	۱۲
۲-۳-۲- ضریب تقویت	۱۳
۳-۳-۲- امواج سازه‌ای	۱۴
۴-۲- استخراج معادلات حرکت پوسته استوانه ای	۱۵
۱-۴-۲- پوسته	۱۵
۲-۴-۲- تعریف و مفاهیم پایه	۱۶
۳-۴-۲- تئوری های پوسته	۱۷
۴-۴-۲- منته‌های تنش	۲۲
۵-۴-۲- روابط تنش- کرنش	۲۲
۶-۴-۲- تغییر مکان شعاعی لوله	۲۳
۷-۴-۲- معادلات حرکت پوسته استوانه‌ای تحت فشار متحرک داخلی	۲۴
۵-۲- روش های حل تحلیلی	۲۵
۱-۵-۲- پوسته جدار نازک بدون در نظر گرفتن اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی	۲۵
۲-۵-۲- پوسته جدار نازک با طول بینهایت با در نظر گرفتن اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی	۲۶
۳-۵-۲- مدل گذرای لوله با طول محدود بدون در نظر گرفتن اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی	۲۸
۴-۵-۲- مدل گذرای لوله با طول محدود با در نظر گرفتن اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی	۲۹
۵-۵-۲- مدل لوله دتوئیشن تحت دتوئیشن‌های متوالی	۳۰
۶-۲- مدلسازی عددی	۳۱

۳۱	مدل المان محدود ۱	۱-۶-۲
۳۲	مدل المان محدود ۲	۲-۶-۲
۳۳	تجهیزات آزمایشگاهی	۷-۲
۳۴	جنس و خصوصیات هندسی	۱-۷-۲
۳۵	اندازه‌گیری کرنش	۲-۷-۲
۳۵	اندازه‌گیری فشار	۳-۷-۲
۳۷	رفتار ارتعاشی لوله دتونیشن تحت اثر دتونیشنهای متوالی	فصل ۳-۳۷
۳۷	مقدمه	۱-۳
۳۸	مقدمه‌ای بر حل تحلیلی	۲-۳
۴۰	اصلاح پروفیل بارگذاری	۳-۳
۴۱	محاسبه پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن	۴-۳
۴۱	پاسخ دینامیکی گذرا به یک دتونیشن	۱-۴-۳
۴۲	پاسخ دینامیکی گذرا به دتونیشنهای متوالی	۲-۴-۳
۴۳	محاسبه پاسخ در نرم‌افزار متلب با استفاده از روابط تعمیم یافته	۵-۳
۴۵	بررسی اثر شرایط مرزی در مدل عددی	فصل ۴-۴۵
۴۵	مقدمه	۱-۴
۴۵	شرایط مرزی	۲-۴
۴۷	مدلسازی عددی	۳-۴
۴۸	هندسه و خصوصیات ماده	۱-۳-۴
۴۹	مش بندی و انتخاب نوع المان	۲-۳-۴
۵۱	تحلیل دینامیکی صریح	۳-۳-۴
۵۳	اعمال بارگذاری به صورت متوالی	۴-۳-۴
۵۴	اعمال شرایط مرزی مختلف	۵-۳-۴
۵۶	نتایج	فصل ۵-۵۶
۵۷	بررسی نتایج مدل تحلیلی اصلاح شده برای یک دتونیشن	۱-۵
۵۹	بررسی رفتار لوله در تعداد دتونیشن بالا	۲-۵
۶۴	تایید نتایج مدل عددی	۳-۵
۶۸	بررسی اثر شرایط مرزی بر پاسخ سازه‌ای	۴-۵
۶۸	اثر شرایط مرزی در یک دتونیشن	۱-۴-۵
۷۱	اثر شرایط مرزی در دتونیشنهای متوالی	۲-۴-۵
۸۱	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	فصل ۶-۸۱
۸۱	نتیجه‌گیری	۱-۶
۸۳	پیشنهادات	۲-۶
۸۵	فهرست مراجع	فصل ۷-۸۵

فهرست علائم

واحد	توضیح	علامت
N/m^2	مدول‌های یانگ	E
N/m^2	مدول برشی	G
	تابع پله	H
m	طول لوله	L
m	شعاع متوسط لوله	R
s	ضریب کاهش نمایی	T
m/s	سرعت بار	V
m/s	سرعت چپمن - ژوگت	V_{cj}
m/s	سرعت امواج انبساطی	V_d
m/s	سرعت امواج برشی	V_s
m	ضخامت لوله	h
	اندیس دتونیشن	m
	اندیس مود	n
Pa	فشار اولیه	P_1
Pa	ماکزیمم فشار دتونیشن	P_2
Pa	فشار نهایی	P_3
Pa	فشار محیط بیرونی	P_{ext}
Pa	فشار چپمن-ژوگت	P_{cj}
s	زمان	t
s	متغیر عمومی زمان	\tilde{t}
m	خیز (جابجایی) شعاعی	w
m	خیز شعاعی ناشی از خمش	w_b
m	خیز شعاعی ناشی از برش	w_s
m	مختصات محوری	x
	پارامتر بی بعد ضخامت لوله	β
N/m^2	تنش برشی	τ
	ضریب تصحیح برش	κ
	ضریب پواسون	ν
kg/m^3	چگالی	ρ
	پارامتر بی بعد تحریک ($j=1,2,3$)	Λ_j
	چرخش	ψ
	ضریب تقویت دینامیکی	Φ

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵.....	جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از روشهای حل سازه‌های تحت فشار متحرک [۱].....
۳۴.....	جدول ۱-۲- جنس و خصوصیات هندسی لوله شاک [۱].....
۳۴.....	جدول ۲-۲- جنس و خصوصیات هندسی لوله دتونیشن [۱].....
۵۶.....	جدول ۱-۵- بررسی پارامتریک نتایج ارایه شده.....

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از سازه‌های تحت بارگذاری متحرک [۱]..... ۱
- شکل ۲-۱- موتور تراک ضربه‌ای [۲]..... ۲
- شکل ۳-۱- هواپیمای Long-EZ مجهز به موتور تراک ضربه‌ای [۳]..... ۳
- شکل ۱-۲- نحوه تغییرات فشار نسبت به زمان در بارگذاری شاک [۱]..... ۹
- شکل ۲-۲- مقایسه فرآیند دفلگريشن و دتونيشن [۲]..... ۱۰
- شکل ۳-۲- نحوه پیشروی موج دتونيشن در لوله [۲۹]..... ۱۱
- شکل ۴-۲- تغییرات فشار بر حسب زمان برای بارگذاری دتونيشن [۱]..... ۱۱
- شکل ۵-۲- موتور تراک ضربه‌ای نمونه‌ای از پوسته استوانه‌ای تحت فشار پایین [۳۰]..... ۱۲
- شکل ۶-۲- ترک خوردن لوله آلومینیومی در اثر بارگذاری فشاری متوسط [۳۱]..... ۱۲
- شکل ۷-۲- از هم‌گسیختگی یک لوله تحت بارگذاری انفجار گازی با فشار بالا [۳۱]..... ۱۳
- شکل ۸-۲- نمونه‌ای از تغییرات کرنش هوپ بر حسب زمان [۲۰]..... ۱۴
- شکل ۹-۲- نمونه‌هایی از کاربرد پوسته‌ها [۳۲]..... ۱۶
- شکل ۱۰-۲- یک المان از پوسته و خصوصیات هندسی آن [۳۲]..... ۱۶
- شکل ۱۱-۲- هندسه تغییر شکل یافته و اولیه یک المان تحت فرضیه کیرششف [۳۵]..... ۱۸
- شکل ۱۲-۲- هندسه تغییر شکل یافته و اولیه یک المان طبق تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول [۳۵]..... ۲۰
- شکل ۱۳-۲- شکل یک المان پوسته و نتیجه‌های تنش وارد بر آن [۳۲]..... ۲۲
- شکل ۱۴-۲- نمایش مؤلفه‌های تغییر مکان شعاعی مسئله [۲۳]..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲- توزیع تنش برشی در راستای ضخامت پوسته [۳۷]..... ۲۴
- شکل ۱۶-۲- مدل پوسته جدارنازک بدون در نظر گرفتن اینرسی دورانی و برش عرضی [۱]..... ۲۵
- شکل ۱۷-۲- مدل پوسته جدار نازک با طول بینهایت [۱]..... ۲۶
- شکل ۱۸-۲- تعریف پارامتر بی‌بعد η [۲۰]..... ۲۷
- شکل ۱۹-۲- پوسته با طول محدود [۱۹]..... ۲۹
- شکل ۲۰-۲- نحوه اعمال بارگذاری در نرم‌افزار LS-DYNA [۳۸]..... ۳۱
- شکل ۲۱-۲- الگوریتم مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار Ansys-LS-Dyna [۳۹]..... ۳۲
- شکل ۲۲-۲- لوله شاک آزمایشی [۲]..... ۳۳
- شکل ۲۳-۲- لوله دتونيشن آزمایشی [۲]..... ۳۴
- شکل ۲۴-۲- نحوه قرارگیری کرنش‌سنجها در لوله دتونيشن [۱]..... ۳۵
- شکل ۲۵-۲- نحوه قرارگیری گیج‌های فشار در لوله دتونيشن [۲۹]..... ۳۶
- شکل ۱-۳- موتور تراک ضربه‌ای با پنج لوله دتونيشن [۲۳]..... ۳۷
- شکل ۲-۳- سیکل موتور تراک ضربه‌ای، آغاز دتونيشن از ابتدای لوله به همراه پیشروی موج تیلور با سرعت V_{ej} [۲۳]..... ۳۸

شکل ۳-۳- تغییرات فشار بر حسب زمان برای بارگذاری به صورت دتونیشن‌های متوالی [۲۳]..... ۳۹

شکل ۴-۳- بازه‌های زمانی در دتونیشن‌های پیاپی..... ۴۰

شکل ۱-۴- تغییر شکل مودها با تغییر شرایط مرزی، (a) دو سر گیردار، (b) یک سر گیردار، (c) دو سر تکیه‌گاه ساده ۴۶

شکل ۲-۴- جزئیات اتصالات بین بخش‌های لوله در لوله تجربی [۳۸]..... ۴۷

شکل ۳-۴- مدلسازی متقارن محوری در نرم‌افزار آباکوس..... ۴۸

شکل ۴-۴- انواع خانواده‌های مان‌ها در نرم‌افزار آباکوس [۴۰]..... ۴۹

شکل ۵-۴- المان متقارن محوری CAX4..... ۵۱

شکل ۶-۴- مقایسه شرایط مرزی موتور تراک ضربه‌ای واقعی با لوله دتونیشن آزمایشگاهی..... ۵۴

شکل ۱-۵- پاسخ سازه‌های لوله به یک دتونیشن در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=500\text{m/s}$ (a1-a3)، $(b1-b3)V=1400\text{m/s}$ ، $(c1-c3)V=1699.7\text{m/s}$ ، ستون چپ: مدل تحلیلی اصلاح شده، ستون وسط: مدل المان محدود، ستون راست: مدل تحلیلی قبلی..... ۵۷

شکل ۲-۵- پاسخ سازه‌های لوله به یک دتونیشن در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=500\text{m/s}$ (a1-a3)، $(b1-b3)V=1400\text{m/s}$ ، $(c1-c3)V=1699.7\text{m/s}$ ، ستون چپ: مدل تحلیلی اصلاح شده، ستون وسط: مدل المان محدود، ستون راست: مدل تحلیلی قبلی..... ۵۸

شکل ۳-۵- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن به ۵۰ دتونیشن متوالی با $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ (a)، $\Delta=8.074\text{ms}$ (b)، $\Delta=8.171\text{ms}$ (c)، $\Delta=10.135\text{ms}$ ۶۰

شکل ۴-۵- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن به ۳۰۰ دتونیشن متوالی با $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ (a)، $\Delta=8.074\text{ms}$ (b)، $\Delta=8.171\text{ms}$ (c)، $\Delta=10.135\text{ms}$ ۶۲

شکل ۵-۵- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن به ۳۰۰ دتونیشن متوالی با $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ (a)، $\Delta=8.074\text{ms}$ (b)، $\Delta_{2i-1}=8.074\text{ms}$ و $\Delta_{2i}=8.171\text{ms}$ (c)، $\Delta_{2i-1}=8.074\text{ms}$ و $\Delta_{2i}=10.135\text{ms}$ ($i=1,2,\dots$)..... ۶۳

شکل ۶-۵- پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن به ۷ دتونیشن متوالی در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7$ و $T=0.434\text{ms}$ (a1,b1)، مدل عددی (a1,b1)، مدل تحلیلی (a2,b2)، $\Delta=10.135\text{ms}$ (a)، $\Delta=8.171\text{ms}$ (b)..... ۶۵

شکل ۷-۵- پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن به ۷ دتونیشن متوالی در گنج ۱۰، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7$ و $T=0.434\text{ms}$ (a1,b1)، مدل عددی (a1,b1)، مدل تحلیلی (a2,b2)، $\Delta=10.135\text{ms}$ (a)، $\Delta=8.171\text{ms}$ (b)..... ۶۶

شکل ۸-۵- پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن به ۵۰ دتونیشن متوالی در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7$ و $T=0.434\text{ms}$ (a1)، مدل عددی (a1)، $\Delta=10.144\text{ms}$ (a2)، مدل تحلیلی (a2)، $\Delta=10.135\text{ms}$ (b1)، مدل عددی (b1)، $\Delta=8.178\text{ms}$ (b2)، مدل تحلیلی (b2)، $\Delta=8.171\text{ms}$ ۶۷

شکل ۹-۵- پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن به یک دتونیشن در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردرگیر، (c) یک سر درگیر - یک سر تکیه‌گاه ساده..... ۶۹

شکل ۱۰-۵- پاسخ سازه‌های لوله دتونیشن به یک دتونیشن در گنج ۵، $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردرگیر، (c) یک سر درگیر - یک سر تکیه‌گاه ساده..... ۷۰

شکل ۱۱-۵- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گنج ۵ به ۵۰ دتونیشن با $P_1=P_3=0$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $V=1699.7\text{m/s}$ و $T=0.434\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردرگیر، (c) یک سردرگیر - یکسر تکیه‌گاه ساده..... ۷۲

شکل ۵-۱۲- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۱۰ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ و $\Delta=10.144\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۳

شکل ۵-۱۳- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۵ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ و $\Delta=8.178\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۵

شکل ۵-۱۴- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۱۰ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ و $\Delta=8.178\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۶

شکل ۵-۱۵- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۵ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ و $\Delta=8.074\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۷

شکل ۵-۱۶- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۱۰ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ و $\Delta=8.074\text{ms}$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۸

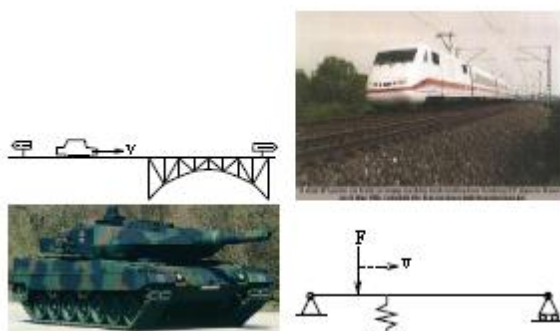
شکل ۵-۱۷- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۵ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ ، $\Delta_{2i-1}=8.074\text{ms}$ و $\Delta_{2i}=8.171$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۷۹

شکل ۵-۱۸- پاسخ ارتعاشی لوله دتونیشن در گیج ۵ به ۵۰ دتونیشن با $V=1699.7\text{m/s}$ ، $P_2=1.7\text{MPa}$ ، $P_1=P_3=0$ ، $T=0.434\text{ms}$ ، $\Delta_{2i-1}=8.074\text{ms}$ و $\Delta_{2i}=8.171$ در شرایط مرزی (a) تکیه‌گاه ساده، (b) یک سردگیر، (c) یک سردگیر-یک سر تکیه‌گاه ساده ۸۰

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ - پیشگفتار

سازه‌های تحت بارگذاری متحرک مورد توجه بسیاری از طراحان و مهندسين قرار دارند چراکه اکثر بارگذاری‌های عملی بر سازه‌ها به صورت دینامیکی اعمال می‌گردد. این موضوع حوزه کاربردی این موارد را گسترش می‌دهد. مثلاً می‌توان به پلی که همواره در اثر عبور خودرو و وسایل نقلیه تحت بار متحرک قرار می‌گیرد، یا لوله توپ جنگی که در اثر انفجار درون آن مرتعش می‌شود، اشاره کرد. در این حوزه، پوسته‌های استوانه‌ای جایگاه خاصی دارند. خط‌لوله‌های گازی در صنایع نفت و گاز، لوله‌های تحت فشار در هواپیما و موتورهای تراک ضربه‌ای همگی نمونه‌هایی از موارد کاربرد این پوسته‌ها هستند. در اکثر پوسته‌های استوانه‌ای بارگذاری از نوع فشار متحرک داخلی است. حرکت موج فشاری در داخل پوسته باعث تحریک امواج سازه‌ای در داخل آن می‌گردد. بنابراین پاسخ سازه‌ای پوسته به فشار متحرک چندین برابر فشار استاتیکی معادل آن خواهد شد.



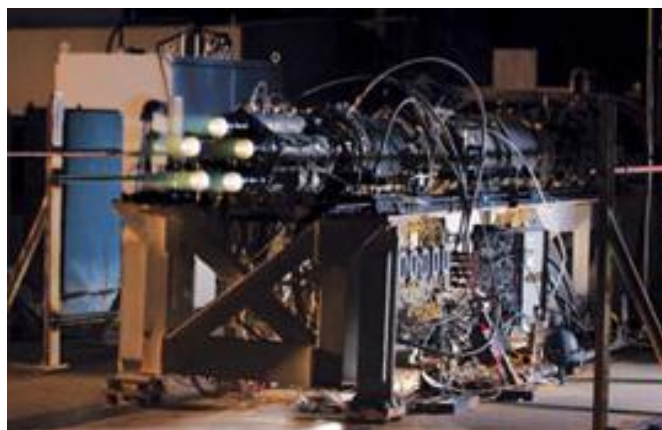
شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از سازه‌های تحت بارگذاری متحرک [۱]

یکی از انواع بارگذاری‌های فشاری که در پوسته‌ها و لوله‌های استوانه‌ای اتفاق می‌افتد، بارگذاری ناشی از انفجار گازی یا دتونیشن^۱ است. انفجار گازی درون استوانه سبب ایجاد موج شاک فشاری-حرارتی متحرک و متغیر با زمان می‌شود و به این ترتیب بار مکانیکی و حرارتی در اثر انفجار گازی به صورت همزمان در لوله به وجود می‌آید. انفجار گازی، باعث ایجاد نوسانات شدید در کرنش‌ها و تنش‌های استوانه شده و سبب برانگیختن امواج الاستیک می‌گردد که انتشار این امواج الاستیک در محیط لوله و همچنین انعکاس آن‌ها از انتهای لوله تعیین کننده بخشی از رفتار و پاسخ لوله می‌باشد. از طرفی دیگر از آنجا که دمای گاز در انفجار گازی به بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد وجود

¹ Detonation

انفجارهای گازی متوالی می‌تواند سبب ایجاد تنش‌های حرارتی قابل توجه شود که در نهایت منجر به واماندگی^۱ لوله شود. بنابراین در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی ناشی از انفجار علاوه بر تنش‌های مکانیکی، در چنین سازه‌هایی جهت طراحی مطمئن مهم می‌باشد. پدیده دتونیشن براساس تغییرشکلی که در پوسته استوانه‌ای ایجاد می‌کند، می‌تواند پدیده‌ای مخرب باشد یا اینکه به عنوان اساس عملکرد سیستم قرار گیرد. مورد آخر در موتورهای تراک ضربه‌ای^۲ کاربرد دارد. موتورهای تراک ضربه‌ای ساختاری مانند یک لوله استوانه‌ای دارند و به عنوان کاندیدایی مناسب برای موتورهایی که در سرعت مافوق صوت حرکت می‌کنند، به شمار می‌آیند. بررسی رفتار ارتعاشی این موتورها از اهداف پروژه حاضر می‌باشد.

در موتورهای تراک ضربه‌ای از موج دتونیشن به صورت پالسی برای تولید نیروی پیشران استفاده می‌شود. در صورتی که موتور بتواند ۵۰ تا ۲۰۰ مرتبه این چرخه را در یک ثانیه تکرار کند، می‌توان نیروی پیشران شبه پایایی قابل توجهی تولید نمود. هدف اساسی در مطالعه و پژوهش روی موتور تراک ضربه‌ای، طراحی و تولید یک موتور کارآمد به خصوص برای رنج سرعت‌های بالا (در حدود ماخ پنج) و همچنین ارتفاع پروازی بالا است. در اثر ایجاد انفجار گازی در لوله، موج شاک فشاری-حرارتی به وجود می‌آید که بار فشاری متحرک، سبب ارتعاش هر نقطه از استوانه شده و سبب می‌شود که تنش‌های هوپ استوانه کاملاً نوسانی باشد و همچنین موج شاک حرارتی سبب القای تنش‌های حرارتی در استوانه می‌شود.



شکل ۱-۲- موتور تراک ضربه‌ای [۲]

¹ Failure

² Pulse detonation engine

اولین پرواز یک موتور تراک ضربه‌ای در ۳۱م ژانویه ۲۰۰۸ در مرکز مهندسی تست هوافضا واقع در صحرای موهاوی کالیفرنیا صورت گرفت. این تست پروازی توسط یک هواپیمای کامپوزیتی سبک به نام Long-EZ انجام گرفت. موتور این هواپیما که Borealis نام دارد از چهار لوله موازی تشکیل شده است و دتونیشن‌های پالسی را در فرکانس ۸۰ هرتز ایجاد می‌کند که تراستی معادل با ۲۰۰ پوند تولید می‌نماید. یک سیستم موشک کوچک برای بالابردن هواپیمای Long-EZ به کار رفت، اما موتور تراک ضربه‌ای تحت توان خود برای ۱۰ ثانیه در ارتفاع ۱۰۰ فوت عمل کرد. به دلیل مشکلات سازه‌ای ناشی از انفجارهای گازی متوالی، در حال حاضر این موتورها در مرحله توسعه قرار دارند.



شکل ۳-۱- هواپیمای Long-EZ مجهز به موتور تراک ضربه‌ای [۳]

به طور کلی مشکلات سازه‌ای که این موتورها با آن روبرو هستند را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. یک بخش مربوط به ارتعاشات این موتورها می‌باشد. در واقع حرکت موج فشاری باعث تحریک پاسخ سازه‌ای می‌گردد و این باعث ایجاد دامنه‌های بسیار بالا در پاسخ لوله می‌گردد. این مسئله لرزش‌های شدیدی را در موتور ایجاد می‌کند. همچنین با توجه به ایجاد کرنش‌های بالا و فرکانس زیاد دتونیشن، احتمال ترک خوردگی لوله تحت مکانیزم خستگی سیکل بالا وجود دارد. از طرف دیگر، همراه با ایجاد موج فشاری متحرک، یک شار حرارتی در لوله ایجاد می‌شود. گرادیان‌های دمایی شدید در اثر این شار حرارتی باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در لوله می‌گردد. همچنین حرارت زیاد باعث ایجاد تغییر شکل پوسته می‌گردد. در تحقیق حاضر تا حدودی به بررسی ارتعاشات موتور تراک ضربه‌ای پرداخته شده است.

۱-۲- تاریخچه

وجود سرعت بحرانی و امکان تشدید اولین بار در بررسی بار متحرک ناشی از عبور قطار و یا عبور کامیون‌های سنگین با سرعت از روی پل‌ها مشاهده گردید. برای مدل فیزیکی این مسئله، از یک تیر که بر روی پایه الاستیک قرار گرفته است استفاده می‌شود [۴، ۵]. این مدل به عنوان یک مدل ساده در بررسی پوسته استوانه‌ای در بارگذاری داخلی شاک و یا انفجار گازی نیز استفاده می‌شود. تحقیقات متعددی در رابطه با پاسخ سازه‌ای لوله‌ها به بارگذاری شاک یا دتونیشن صورت گرفته است. اولین مدل مفهومی در رابطه با پاسخ الاستیک پوسته استوانه‌ای به بار در حال حرکت توسط تانگ^۱ [۶] و ریسمن^۲ [۷] ارائه شد. تانگ مدلی ارائه کرد که پاسخ پوسته را به بارگذاری شاک داخلی پیش بینی می‌کرد. این مدل شامل اثرات اینرسی دورانی^۳ و برش عرضی^۴ بود. ریسمن مدلی ارائه داد که شامل اثرات پیش تنش در پاسخ سازه‌ای بود و تشریح مفصلی از کوپل امواج خمشی با بار در حال حرکت ارائه کرد. سیمکینز^۵ [۸-۱۰] تحلیل را به دیواره‌های جدار ضخیم تعمیم داد و اولین بار از ایده این مدل برای توجیه کرنش‌های بزرگ در لوله‌های تفنگ استفاده کرد. ساده‌ترین مدل، مدل مقطع عرضی است که تنها حرکت شعاعی (تنفسی) مقطع عرضی لوله را در نظر گرفته است. دی مالهرب^۶ و همکاران [۱۱] نتایج این مدل را با مقادیر تجربی تحت بارگذاری دتونیشن مقایسه کرده‌اند. شفرد^۷ [۱۲] از نتایج مدل مقطع عرضی برای پیش‌بینی پاسخ لوله به بارگذاری دتونیشن داخلی استفاده کرد. ون دی ون^۸ و همکاران [۱۳] پاسخ لوله را به بارگذاری ناشی از دتونیشن ذرات با یک پروفیل فشاری متقارن غیرچرخشی تحلیل کردند. اسپربر و همکاران [۱۴] کرنش‌های ایجاد شده در اثر دتونیشن ناشی از تجزیه استیلن را در دیواره لوله جدارضخیم اندازه گرفتند. بلتمن^۹ و همکاران [۱۵] اثرات مشابهی را در تحقیق تجربی و تحلیلی برای پاسخ پوسته نازک به بارگذاری شاک داخلی، مشاهده کردند. چائو^{۱۰} و شفرد [۱۶] رفتار لوله آلومینیومی در نزدیکی دومین سرعت بحرانی را از طریق آزمایش تجربی، مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی بررسی

¹ Tang

² Rissman

³ rotary inertia

⁴ transverse shear

⁵ Simkins

⁶ De Malherbe

⁷ Shepherd

⁸ Van De Van

⁹ Beltmn

¹⁰ Chao

نمودند. نتایج حل تحلیلی و شبیه سازی عددی آن‌ها در این تحقیق با نتایج تجربی اختلاف زیادی داشت. این مدل پاسخ گذرای یک لوله محدود به بارگذاری شاک یا دتونیشن را ارایه می کرد. ژائو و همکاران در سال ۲۰۰۹ پاسخ الاستیک یک لوله ساندویچی منشوری فلزی تحت بارگذاری فشاری داخلی متحرک را بررسی نمودند. روش حل به کارگرفته توسط آنها بر اساس حل‌های گذشته است و نوآوری خاصی در روش حل ندارد [۱۷]. میرزایی و همکاران [۱۸-۲۱] مدل بلتمن را ارتقا دادند. آنها در این مدل اثرات اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی را در نظر گرفتند و نتایج خود را با نتایج تجربی و مدل بلتمن مورد مقایسه قرار دادند. بیگلری و جعفری کرنش برشی یک لوله دتونیشن را در نزدیکی سرعت بحرانی دوم و با استفاده از تئوری مرتبه اول پوسته‌ها بررسی نمودند. در این بررسی مدل سازی روابط به صورت پایا انجام گرفته است [۲۲]. در ادامه، میرزایی [۲۳] در یک مدل جدید پاسخ پوسته جدار نازک را به بارگذاری دتونیشن های متوالی بدست آورد. این مدل جدیدترین مدل تحلیلی ارایه شده برای پوسته های تحت فشار داخلی متحرک می باشد و گامی مهم در راستای پیش‌بینی پاسخ ارتعاشی موتورهای تراک ضربه‌ای می‌باشد.

در جدول ۱-۱ شرح مختصری از روش‌های حل سازه‌های تحت بارگذاری متحرک ارایه شده است.

جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از روش‌های حل سازه‌های تحت فشار متحرک [۱]

مؤلفین	سال تالیف	سازه			بارگذاری			روش حل				
		تیر	پوسته	ورق	طول محدود	شاک	دتونیشن	حالت پایا	تحلیلی	گذرا	فوریه	المان محدود
تانگ	۱۹۶۵	X					X			X	X	
ریسمن	۱۹۶۵		X			X	X					
دی‌مالهرب	۱۹۶۶		X			X		X		X		
سیمکینز	۱۹۸۷		X			X		X				
شفرد	۱۹۹۲		X		X			X		X		
پن، آتلوری [۲۴]	۱۹۹۴			X						X		X
لی، جونز [۲۵]	۱۹۹۴		X				X				X	