

الحمد لله
البرحمين



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی هوافضا (طراحی سازه‌های هوافضایی)

تحلیل عددی تنش‌های مکانیکی و حرارتی در استوانه جدار نازک

تحت انفجار گازی داخلی

نگارنده:

احسان شیبانی

استاد راهنما:

دکتر مجید میرزایی

زمستان ۱۳۹۰



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای احسان شیبانی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان تحلیل عددی تنش های مکانیکی و حرارتی در استوانه جدار نازک تحت انفجار گازی داخلی در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱ 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 میرزائی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کیومرث مظاهری	استاد	
استاد ناظر	دکتر فتح اله امی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمود موسوی مشهدی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر فتح اله امی	دانشیار	

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

مقدمه: با عنایت به سیاستهای پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامهها / رسالههای مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامهها و دستورالعملهای مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و اسناد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

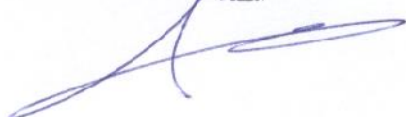
ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: احسان شیبانی

امضاء



آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی 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 پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته _____ است که در _____ سال _____ در دانشکده _____ دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _____ از آن

دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند 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 رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

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

ماده ۶: اینجانب احسان شیبانی دانشجوی رشته مهندسی هوافضا مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: احسان شیبانی

تاریخ و امضا: ۰۱/۱۱/۱۳۹۰



تقدیم به پدر و مادر عزیز و خانواده سرشار از مهرم.

تشکر و قدردانی

اینک که برگ دیگری به دفتر زندگانی‌ام افزوده می‌گردد خدای خود را سپاس گفته و بر خود لازم می‌بینم از تمام کسانی که در این راه، مرا همیاری نمودند به ویژه استاد محترم علم، اخلاق و رفتار مهندسی، جناب آقای دکتر میرزایی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم و امید دارم فرصتی دوباره پیش آید تا از محضر ایشان استفاده نمایم.

چکیده

یکی از انواع بارگذاری متحرک و متغیر با زمان، موج شاک فشاری ناشی از انفجار گازی^۱ است. موج انفجار گازی شامل یک موج شاک در جلو و یک منطقه واکنش در پشت آن می‌باشد که به شدت با هم کوپل شده‌اند. در حوزه الاستیک خطی ایجاد ارتعاشات ناشی از انفجار گازی در استوانه‌ها، باعث افزایش کرنش نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی با فشار داخلی یکسان می‌شود و وجود سرعت‌های بحرانی و امکان تشدید ارتعاشات در این سرعت امری مهم است که در طراحی باید مد نظر قرار داد. علاوه بر وجود بار فشاری متحرک داخلی ناشی از انفجار گازی، بار حرارتی^۲ متحرک و متغیر با زمان نیز همزمان با موج فشاری در استوانه به وجود می‌آید. از آنجا که دمای گاز در انفجار گازی به بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد وجود انفجارهای گازی متوالی می‌تواند سبب ایجاد تنش‌های حرارتی قابل توجه شود که در نهایت واماندگی^۳ زودرس را به دنبال دارد. لذا هدف این تحقیق محاسبه تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجارهای گازی در استوانه جدار نازک قرار گرفته است.

در این راستا پایان نامه حاضر در سه بخش تدوین شده است. در بخش اول پاسخ گذرای الاستودینامیک استوانه به بارگذاری متحرک داخلی بررسی می‌شود. بدین منظور، بارگذاری متحرک داخلی توسط الگوریتمی کاملاً متفاوت از کارهای انجام شده، با استفاده از روش المان محدود شبیه سازی شده و در آن اثرات نوع تکیه‌گاه در ارتعاشات دیواره استوانه و پاسخ آن به انفجارهای گازی پی در پی بررسی می‌شود. در بخش دوم روشی پیشنهادی برای شبیه سازی شاک حرارتی ناشی از انفجار ارائه شده و سپس با مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج کارهای انجام شده، از صحت نتایج شبیه سازی عددی اطمینان حاصل می‌شود. در بخش سوم، بار مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار گازی که در بخش‌های پیشین به صورت جداگانه به آنها پرداخته شد به صورت همزمان درون لوله شبیه سازی شده و پاسخ لوله به مجموع بار مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار گازی بررسی می‌شود.

¹ detonation

² Thermal load

³ Failure

کلید واژه: لوله موتور تراک ضربه‌ای- ارتعاش- تنش مکانیکی- تنش حرارتی- شبیه سازی عددی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱ فصل اول.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۵	۲ فصل دوم.....
۶	۱-۲ مقدمه.....
۷	۲-۲ پاسخ سازه‌ای استوانه‌ها به بارگذاری فشاری متحرک با سرعت بالا.....
۸	۲-۲-۱ بار فشاری با جبهه موج کم فشار.....
۸	۲-۲-۲ بار فشاری با جبهه موج فشار متوسط.....
۹	۲-۲-۳ بار فشاری با جبهه موج فشار بالا.....
۱۰	۳-۲ موج انفجار گازی و تغییرات فشار درون آن.....
۱۲	۴-۲ ضریب تقویت.....
۱۳	۵-۲ سرعت های بحرانی.....
۱۵	۲-۶ پیشینه پاسخ دینامیکی لوله به بارگذاری موج فشاری متحرک داخلی.....
۱۶	۲-۷ موج شاک حرارتی ناشی از انفجار و انتقال حرارت درون استوانه.....
۱۸	۸-۲ دمای گاز در موج انفجار گازی.....
۱۹	۲-۹ شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی.....
۲۰	۱۰-۲ معادله انرژی در یک فرایند.....
۲۰	۱۱-۲ موتور تراک ضربه‌ای.....
۲۲	۱۲-۲ پیشینه پاسخ لوله‌ی موتور تراک ضربه‌ای به موج شاک حرارتی ناشی از انفجار گازی.....
۲۴	فصل سوم.....
۲۵	۱-۳ مقدمه.....
۲۵	۳-۲ آزمایش تجربی و نتایج آن.....

۳-۳ مدل خمشی پوسته جدار نازک با طول بی‌نهایت و با در نظر گرفتن اثر برش عرضی و اینرسی دورانی (مدل Tang).....	۲۸
۴-۳ مدل گذرای لوله با طول محدود و بدون در نظر گرفتن اثر برش عرضی و اینرسی دورانی (I) (مدل Beltman & Shepherd).....	۲۹
۵-۳ مدل گذرای لوله با طول محدود و با در نظر گرفتن اثر برش عرضی و اینرسی دورانی (II).....	۳۰
۳-۶ حل عددی پاسخ استوانه جدار نازک به موج انفجار گازی.....	۳۲
۱-۶-۳ روش عددی تحقیقات پیشین و روش عددی تحقیق حاضر.....	۳۲
۳-۶-۲ شبیه سازی عددی بار فشاری متحرک داخلی ناشی از انفجار در لوله موتور تراک ضربه‌ای.....	۳۵
۳-۶-۳ شبیه سازی بارگذاری انفجار گازی.....	۳۶
۳-۶-۴ شبیه سازی شرایط تکیه‌گاهی.....	۳۷
۳-۶-۵ المان بندی لوله.....	۳۹
۳-۶-۶ نتایج شبیه سازی عددی.....	۴۰
۳-۷ مقایسه بین نتایج شبیه سازی عددی، آزمایش تجربی، مدل تحلیلی (I) و مدل تحلیلی (II).....	۴۵
۳-۸ بررسی اثر تکیه‌گاه در ارتعاشات ایجاد شده در دیواره.....	۵۰
۳-۹ شبیه سازی پاسخ دینامیکی لوله به انفجارهای گازی داخلی پی در پی.....	۵۲
۴ فصل چهارم.....	۵۵
۱-۴ مقدمه.....	۵۶
۲-۴ خواص ترمودینامیکی گاز درون انفجار و درجه حرارت گاز در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه ای.....	۵۶
۳-۴ محاسبه گرمای آزاد شده در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای.....	۶۰
۴-۴ ارائه روش پیشنهادی جهت شبیه سازی بار حرارتی در لوله موتور تراک ضربه‌ای.....	۶۲
۴-۵ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و تحقیقات انجام شده.....	۶۴
۴-۵-۱ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با مطالعات قندیکوتا و کالدینی.....	۶۴
۴-۵-۲ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج جیاکسی زو.....	۶۷
۴-۵-۳ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش تجربی جیرو کاساهارا.....	۷۴

۴-۶	شبییه سازی تنش‌های حرارتی طبق روش پیشنهادی برای لوله مورد بررسی در این تحقیق.....	۷۸
۴-۷	نتایج شبیه سازی تنش‌های حرارتی در لوله موتور تراک ضربه‌ای.....	۸۱
۵	فصل پنجم.....	۸۴
۱-۵	مقدمه.....	۸۵
۵-۲	شبییه سازی عددی تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار.....	۸۵
۵-۳	نتایج شبیه سازی عددی تنش‌های مکانیکی و حرارتی به صورت همزمان.....	۸۶
۶	نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۹۲
۶-۱	نتیجه گیری.....	۹۳
۶-۲	پیشنهادات.....	۹۵
۷	مراجع.....	۹۵
	پیوست (الف) پاسخ حرارتی گذرای سیلندره‌های خالی اورتوتروپیک با طول محدود با استفاده از تئوری پوسته‌ها.....	۹۹
	پیوست (ب) جزئیات روش تجربی.....	۱۰۰

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ مباحث مرتبط با پاسخ استوانه‌های تحت بارگذاری محرک داخلی.....	۷
شکل ۲-۲ شماتیک فشار متحرک داخلی (a) انفجار گازی (b) موج شاک.....	۷
شکل ۳-۲ گسیختگی لوله آلومینیومی در اثر انفجار گازی داخلی.....	۹
شکل ۴-۲ گسیختگی در اثر حرکت بار فشاری با جبهه موج فشار بالا.....	۹
شکل ۵-۲ (a) پروفیل واقعی فشار (b) پروفیل ایده‌آل فشار در انفجار گازی.....	۱۰
شکل ۶-۲ وجود سه منطقه مجزا در لوله موتور تراک ضربه‌ای.....	۱۱
شکل ۷-۲ سطح مقطع لوله.....	۱۲
شکل ۸-۲ شکل گیری امواج خمشی در لوله.....	۱۴
شکل ۹-۲ شماتیک لوله موتور تراک ضربه‌ای.....	۲۱
شکل ۱۰-۲ نحوه کارکرد موتور تراک ضربه‌ای.....	۲۱
شکل ۱-۳ لوله موتور تراک ضربه‌ای مورد استفاده در آزمایشگاه.....	۲۶
شکل ۲-۳ کرنش محیطی اندازه گیری شده در آزمایش تجربی. سمت راست در محل گیج ۱۰ و سمت چپ در محل گیج ۵ - ردیف اول مربوط به رژیم سرعتی زیر بحرانی، ردیف دوم حالت بحرانی و ردیف سوم حالت فرا بحرانی.....	۲۷
شکل ۳-۳ مولفه‌های جابجایی در لوله.....	۲۹
شکل ۴-۳ کرنش محیطی بر حسب زمان در محل گیج ۵، ستون سمت چپ نتایج حل عددی، ستون وسط نتایج آزمایش تجربی و ستون سمت راست نتایج مدل تحلیلی (II) (a) حالت زیر بحرانی (b) حالت بحرانی (c) حالت فرا بحرانی.....	۳۱
شکل ۵-۳ کرنش محیطی بر حسب زمان در محل گیج ۱۰، ستون سمت چپ نتایج حل عددی، ستون وسط نتایج آزمایش تجربی و ستون سمت راست نتایج مدل تحلیلی (II) (a) حالت زیر بحرانی (b) حالت بحرانی (c) حالت فرا بحرانی.....	۳۲
شکل ۶-۳ تغییر فاز بارگذاری جهت شبیه سازی بار فشاری متحرک.....	۳۳
شکل ۷-۳ الگوریتم مراحل شبیه سازی در نرم افزار Ansys-Ls Dyna.....	۳۴

- شکل ۳-۸ پروفیل بار فشاری کد نویسی شده در قالب زیر برنامه ۳۷
- شکل ۳-۱۰ لوله با تکیه‌گاه ساده و گیردار ۳۹
- شکل ۳-۱۱ نحوه المان بندی لوله ۴۰
- شکل ۳-۱۲ کرنش محیطی بر حسب زمان برای لوله با تکیه‌گاه ساده و در حالت ($P_3=0$) سمت راست مربوط به گیج ۵ و سمت چپ مربوط به گیج ۱۰ - ردیف اول مربوط به رژیم سرعتی زیر بحرانی، ردیف دوم حالت بحرانی و ردیف سوم مربوط به رژیم سرعتی فرا بحرانی ۴۲
- شکل ۳-۱۳ کرنش محیطی بر حسب زمان برای لوله با تکیه‌گاه گیردار و در حالت ($P_3=0$) سمت راست مربوط به گیج ۵ و سمت چپ مربوط به گیج ۱۰ - ردیف اول مربوط به رژیم سرعتی زیر بحرانی، ردیف دوم حالت بحرانی و ردیف سوم مربوط به رژیم سرعتی فرا بحرانی ۴۳
- شکل ۳-۱۴ کرنش محیطی بر حسب زمان برای لوله با تکیه‌گاه ساده و در حالت ($P_3=+0.4 P_{cj}$) سمت راست مربوط به گیج ۵ و سمت چپ مربوط به گیج ۱۰ - ردیف اول مربوط به رژیم سرعتی زیر بحرانی، ردیف دوم حالت بحرانی و ردیف سوم مربوط به رژیم سرعتی فرا بحرانی ۴۴
- شکل ۳-۱۵ کرنش محیطی بر حسب زمان برای لوله با تکیه‌گاه گیردار و در حالت ($P_3=+0.4 P_{cj}$) سمت راست مربوط به گیج ۵ و سمت چپ مربوط به گیج ۱۰ - ردیف اول مربوط به رژیم سرعتی زیر بحرانی، ردیف دوم حالت بحرانی و ردیف سوم مربوط به رژیم سرعتی فرا بحرانی ۴۵
- شکل ۳-۱۶ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۵ و در حالت زیر بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II) ۴۷
- شکل ۳-۱۷ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۵ و در حالت بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II) ۴۷
- شکل ۳-۱۸ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۵ و در حالت فرا بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II) ۴۸
- شکل ۳-۱۹ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۱۰ و در حالت زیر بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II) ۴۸
- شکل ۳-۲۰ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۱۰ و در حالت بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II) ۴۹

- شکل ۳-۲۱ مقایسه بین کرنش هوپ نوسانی در محل گیج ۱۰ و در حالت فرا بحرانی - (a) آزمایش تجربی (b) شبیه سازی عددی (c) مدل تحلیلی (I) (d) مدل تحلیلی (II)..... ۴۹
- شکل ۳-۲۲ نمودار کرنش نوسانی بر اساس زمان در محل گیج ۱۰، (a) تکیه‌گاه ساده (b) تکیه‌گاه گیردار ۵۱
- شکل ۳-۲۳ نمودار کرنش نوسانی بر اساس زمان در فاصله‌ی ۵ سانتیمتری از تکیه‌گاه، (a) تکیه‌گاه ساده (b) تکیه‌گاه گیردار ۵۱
- شکل ۳-۲۴ کرنش محیطی بر اساس زمان در محل گیج ۵ برای ۵ انفجار گازی متوالی با فرکانس ۱۰۰ Hz (a) حل تحلیلی (b) شبیه سازی عددی ۵۳
- شکل ۳-۲۵ کرنش محیطی بر اساس زمان در محل گیج ۱۰ برای ۵ انفجار گازی متوالی با فرکانس ۱۰۰ Hz (a) حل تحلیلی (b) شبیه سازی عددی ۵۴
- شکل ۴-۱ نمودار تغییرات فشار درون موج تیلور بر حسب فاصله از ابتدای لوله ۵۹
- شکل ۴-۲ نمودار تغییرات دما درون موج تیلور بر حسب فاصله از ابتدای لوله ۵۹
- شکل ۴-۳ حجم کنترل در نظر گرفته شده برای محاسبه گرمای ایجاد شده در فرایند دتونیشن ۶۱
- شکل ۴-۴ شماتیک مدلی که توسط قندیکوتا و کالدینی بررسی شد ۶۵
- شکل ۴-۵ نمودار تغییرات دما بر حسب زمان (شبیه سازی شده برای شرایط مورد بررسی توسط قندیکوتا) ۶۷
- شکل ۴-۶ نمایی از لوله دتونیشن و سیستم مختصات جدید برای بررسی تنش حرارتی در لوله ۶۹
- شکل ۴-۷ تغییرات دمای دیواره لوله بر حسب زمان برای شار حرارتی ثابت به مدت ۱۴۴ ثانیه (گزارش شده توسط زو) ۷۰
- شکل ۴-۸ نمودار تغییرات دمای سطح داخلی بر حسب زمان بدست آمده از روابط ارائه شده توسط زو ۷۱
- شکل ۴-۹ نمودار (a) تغییرات جابجایی بر حسب زمان و نمودار (b) تغییرات تنش هوپ بر حسب زمان ۷۲
- شکل ۴-۱۰ نمودار (c) تغییرات محوری بر حسب زمان (d) تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان ۷۳
- شکل ۴-۱۱ موتور تراک ضربه‌ای جیرو کاساهارا ۷۵
- شکل ۴-۱۲ نمودار تغییرات دمای سطح خارجی لوله بعد از اتمام کارکرد موتور تراک ضربه ای (اندازه گیری شده توسط جیرو کاساهارا در آزمایشگاه) ۷۶

- شکل ۱۳-۴ نمودار (a) تغییرات دمای سطح داخلی لوله (b) تغییرات دمای سطح بیرونی لوله..... ۷۷
- شکل ۱۴-۴ نحوه شبیه سازی بارگذاری حرارتی و اعمال شار حرارتی سطحی درون لوله..... ۸۰
- شکل ۱۵-۴ طریقه ی مش بندی لوله برای شبیه سازی در نرم افزار..... ۸۰
- شکل ۱۶-۴ تغییرات جابجایی در محل گیج ۵ در جداره داخلی لوله..... ۸۱
- شکل ۱۷-۴ تغییرت تنش محیطی با زمان..... ۸۲
- شکل ۱۸-۴ تغییرات تنش محوری با زمان..... ۸۲
- شکل ۱۹-۴ تغییرات تنش شعاعی با زمان..... ۸۳
- شکل ۱-۵ محل گیج ۵ و ۱۰ و المان ۳۳۱۳..... ۸۶
- شکل ۲-۵ نمودار تغییرات دما در سطح داخلی..... ۸۷
- شکل ۳-۵ نمودار تغییرات کرنش بر حسب زمان (a) گیج ۵ (b) گیج ۱۰..... ۸۸
- شکل ۴-۵ نمودار تنش هوپ بر حسب زمان (a) در $Z=-0/6$ (b) در $Z=0/6$ ۸۹
- شکل ۵-۵ تغییرات دمای سطح داخلی برای ۵ سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه ای..... ۹۰
- شکل ۶-۵ تغییرات کرنش محیطی بر حسب زمان برای ۵ سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه ای (a) در محل گیج ۵ (b) گیج ۱۰..... ۹۰
- شکل ۷-۵ تغییرات تنش هوپ بر اساس زمان (a) $Z=-0/6$ (b) $Z=0/6$ ۹۱

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۶	جدول ۱-۳ مشخصات مادی و هندسی لوله موتور تراک ضربه‌ای شکل (۱-۳).....
۲۷	جدول ۲-۳ تغییرات فشار در انفجار گازی.....
۳۸	شکل ۹-۳ شماتیک جزئیات اتصال لوله و طراحی فلنج‌ها.....
۵۷	جدول ۱-۴ خصوصیات گاز در رژیم سرعتی زیر بحرانی.....
۵۸	جدول ۲-۴ خصوصیات گاز در رژیم سرعتی بحرانی.....
۵۸	جدول ۳-۴ خصوصیات گاز در رژیم سرعتی فرابحرانی.....
۶۵	جدول ۴-۴ مشخصات هندسی و خصوصیات مادی لوله مورد بررسی توسط قن‌دیکوتا و کالدینی.....
۶۵	جدول ۵-۴ خصوصیات گاز در مخلوط سوخت مورد بررسی توسط قن‌دیکوتا و کالدینی.....

فهرست علائم

واحد	توضیح	علامت
m^2	مساحت	A
$J/kg \cdot ^\circ C$	گرمای ویژه	c
m	قطر هیدرولیکی	d
N/m^2	مدول الاستیک	E
N/m^2	مدول برشی	G
$W/m^2 \cdot K$	ضریب انتقال حرارت جابجایی	h_c
kJ/kg	آنتالپی تشکیل	h_f
kJ/kg	آنتالپی محسوس	h_s
kJ/kg	آنتالپی محصولات	h_{pr}
kJ/kg	آنتالپی واکنش دهنده‌ها	h_{re}
kJ/kg	آنتالپی مولی	
$W \cdot m^2 / J$	ضریب پخش حرارت	k
m	طول لوله	L
kg	جرم	m
mol/gr	وزن مولکولی	MW
	عدد نوسلت	Nu
W/m^2	شار حرارتی سطحی	q
m	شعاع متوسط لوله	R
s	ضریب کاهش نمایی	T
m	ضخامت لوله	h

Pa	فشار اولیه درون لوله	P_1
Pa	فشار نهایی موج	P_2
Pa	فشار محیط	P_{atm}
Pa	فشار	P
j	گرما	Q
j/mol.K	ثابت ویژه گازها	R
K	دما	T
s	زمان	t
m/s	سرعت	V
m/s	اولین سرعت بحرانی	V_{C0}
m/s	دومین سرعت بحرانی	V_{C1}
m/s	سومین سرعت بحرانی	V_{C2}
m/s	چهارمین سرعت بحرانی	V_{C3}
m/s	سرعت امواج انبساطی	V_d
m/s	سرعت امواج برشی	V_s
m	جابجایی شعاعی	w
j	کار انجام شده	W
m	متغیر طولی	x
	ضریب تصحیح برشی	κ
	ضریب پواسون	ν
kg/m ³	چگالی	ρ
	نرخ گرمای ویژه گاز قبل از انفجار	γ_1

	نرخ گرمای ویژه گاز بعد از انفجار	γ_2
K	دما	Θ
W/m.K	رسانندگی حرارتی	λ