



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوا فضا-سازه های هوایی

## بررسی پاسخ الاستیک گذرای لوله تحت بارگذاری تراک گازی داخلی نوسانی

حبیب الله بلور

استاد راهنما:

دکتر کیومرث مظاهری

استاد مشاور:

دکتر مجید میرزایی

زمستان ۸۷

## چکیده

تحقیق حاضر به تکمیل مدل های عددی بارگذاری تراک گازی داخلی، برای بررسی پاسخ گذرای الاستیک سازه ای، پرداخته است. در این جهت مدل بارگذاری عددی جدیدی بر پایه سرعت و فشار شاک نوسانی توسعه داده شده است. نوسانات جبهه تراک در این مدل، بصورت تابع هارمونیک کسینوسی شبیه سازی شده اند. مدل مورد استفاده علاوه بر در نظر گرفتن نوسانات جبهه تراک، توانایی شبیه سازی فاکتور کاهش نمایی متغیر با مختصات مکانی تراک را نیز دارا می باشد. به منظور بررسی سیستماتیک تاثیر خواص نوسانی جبهه تراک (نظیر دامنه یا فرکانس) روی پاسخ های سازه (که با استفاده از روش المان محدود و حلگر Ls-Dyna استخراج شده اند)، از پارامتر ضریب تقویت استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که، تغییرات فرکانس در محدوده بررسی شده، تاثیر ناچیزی بر ضریب تقویت دارد ولی تغییر دامنه نوسانات تراک منجر به تغییر ضریب تقویت می گردد. همچنین رفتار کمی و کیفی پاسخ ها بخصوص در نقاط انتهایی لوله تراک و در سرعت فرا بحرانی که در مدل های پیشین تطابق کمتری با نتایج آزمایشگاهی داشتند، تا حد زیادی بهبود یافته اند.

در تحقیق حاضر، اصلاحاتی نیز در نحوه گسسته سازی بار و پس پردازش نتایج، صورت گرفت که منجر به افزایش دقت کمی پاسخ ها و بهبود کیفی رفتار کلی کرنش ها، بخصوص در نقاط انتهایی لوله گشت. در این رابطه، گسسته سازی بار، که در مطالعات قبلی با دقت کم و بدون در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات و اثرات دنباله موج تراک صورت گرفته بود، اصلاح شد. در کار حاضر نشان داده شده است که عدم انتخاب تعداد مناسب داده های خروجی حلگر، منجر به استخراج پاسخ هایی با دقت کم می گردد. همچنین نشان داده شد که برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، لازم است پاسخ های سازه ای عددی از گره های روی پوسته خارجی لوله استخراج شوند.

**واژگان کلیدی:** بارگذاری تراک - پاسخ سازه ای گذرا - تراک نوسانی - شبیه سازی عددی -

فاکتور کاهش نمایی متغیر

## فهرست مطالب

فهرست مطالب	أ
فهرست علائم و نشانه ها	د
فهرست جداول	و
فهرست اشکال	ز
فصل ۱- پیشگفتار	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- تعریف مساله	۳
۳-۱- بررسی تحقیقات پیشین	۵
فصل ۲- مفاهیم اولیه و تعاریف	۱۳
۱-۲- موج تراک	۱۳
۲-۲- پاسخ سازه ای	۱۸
۳-۲- ضریب تقویت	۲۰
فصل ۳- روش حل عددی	۲۲
۱-۳- مدل سازی هندسی و شبکه بندی	۲۲
۲-۳- مدل سازی شرایط تکیه گاهی	۲۴
۳-۳- بارگذاری	۲۶
۱-۳-۳- اصلاح مدل عددی بارگذاری	۲۷
۱-۳-۳-۱- گسسته سازی کامل بار	۲۸
۲-۳-۳-۱- گسسته سازی دقیق بار	۲۸
۲-۳-۳-۲- مدل بارگذاری عددی با سرعت و فشار شاک نوسانی	۲۹
۳-۳-۴- حل و پس پردازش	۳۳
۱-۴-۳- تنظیم تعداد داده های خروجی نرم افزار حلگر	۳۳

۳-۴-۲- استخراج پاسخ ها از گره مناسب در ضخامت ..... ۳۴

#### فصل ۴- نتایج اصلاح مدل عددی ..... ۳۵

۴-۱- بررسی سیستماتیک اصلاح عددی در بارگذاری ..... ۳۵

۴-۱-۱- تاثیر گسسته سازی کامل بار نسبت به زمان حل روی پاسخ سازه ..... ۳۶

۴-۱-۲- تاثیر گسسته سازی دقیق بار روی پاسخ سازه ..... ۳۸

۴-۲- بررسی اصلاحات در پس پردازش ..... ۴۲

۴-۲-۱- تاثیر تعداد داده های خروجی نرم افزار حلگر روی پاسخ ها ..... ۴۳

۴-۲-۲- استخراج پاسخ سازه از گره مناسب در ضخامت ..... ۴۶

۴-۳- بررسی تاثیر شرایط تکیه گاهی ..... ۴۷

۴-۴- مقایسه پاسخ های عددی قبل و بعد از اعمال اصلاحات ..... ۵۳

۴-۵- نتیجه گیری و جمع بندی ..... ۵۹

#### فصل ۵- نتایج مدل بارگذاری نوسانی ..... ۶۰

۵-۱- بررسی سیستماتیک پارامترهای موثر در بارگذاری روی پاسخ سازه ..... ۶۱

۵-۱-۱- بررسی اثر تغییرات فرکانس نوسانات تراک روی پاسخ سازه ..... ۶۱

۵-۱-۲- بررسی اثرات تغییرات دامنه نوسانات تراک روی پاسخ سازه ..... ۶۶

۵-۱-۳- بررسی تاثیر فاکتور کاهش نمایی متغیر روی پاسخ سازه ..... ۷۹

۵-۲- مقایسه نتایج مدل نوسانی با نتایج عددی و آزمایشگاهی پیشین ..... ۸۲

۵-۳- نتیجه گیری و جمع بندی ..... ۸۵

#### فصل ۶- نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات ..... ۸۷

فهرست مراجع ..... ۹۳

واژه نامه انگلیسی ..... ۹۶

واژه نامه فارسی ..... ۱۰۱

پیوست ها ..... ۱۰۶

پیوست الف- معرفی کد بارگذاری اصلاح شده ..... ۱۰۶

پیوست ب- معرفی کُد مدل ساز بارگذاری نوسانی ..... ۱۰۸

۱۱۱ ..... **ABSTRACT**

## فهرست علائم و نشانه ها

واحد	توضیحات	علائم
	دامنه نوسانات جبهه تراک بر حسب درصد	Amp
$N/m^2$	مدول الاستیسیته (یانگ)	E
J/kg	انرژی فعال سازی در واحد جرم	$E_a$
	تابع هیوی سایید (پله)	H
m	طول لوله تراک	L
m	طول المان	$L_{element}$
Pa	فشار اولیه مخلوط قابل احتراق	$P_1$
Pa	فشار نهایی شاک	$P_2$
Pa	فشار نهایی محصولات تراک	$P_3$
Pa	فشار محیط	$P_{atm}$
Pa	فشار چاپمن-ژوگت	$P_{CJ}$
	فشار شاک بی بعد	$P_{sh}$
J/kg	گرمای آزاد شده در واحد جرم	Q
m	شعاع داخلی لوله	$R_{in}$
m	شعاع خارجی لوله	$R_{out}$
s	فاکتور کاهش نمایی	T
K	دمای اولیه مخلوط قابل احتراق	$T_1$
m/s	سرعت چاپمن-ژوگت	$V_{CJ}$
m/s	سرعت شاک	$V_{Shock}$
	نصف طول ناحیه واکنش	$X_{sh}$
m	ضخامت لوله تراک	h
m	شعاع متوسط لوله تراک	r
s	متغیر زمان	t
$m^3/kg$	حجم ویژه مخلوط اولیه	$v_0$
m	جابجایی شعاعی	w
m	متغیر مختصات طولی	x
	نسبت گرمای ویژه مخلوط	$\gamma$

Hz	فرکانس نوسانات خواص تراک	$\omega$
	نسبت پواسون	$\nu$
Kg/m <sup>3</sup>	چگالی	$\rho$
	کرنش محیطی	$\epsilon_{\theta}$
s	زمان لازم برای عبور جبهه تراک از المان i ام	$\Delta t_i$

## فهرست جداول

جدول (۱-۳): مشخصات مکانیکی و هندسی لوله..... ۲۲

جدول (۲-۳): مشخصات موج تراک در حالت های سه گانه بارگذاری..... ۲۶



## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نوسانات سرعت شاک نسبت به زمان و مکان برای سوخت  $C_3H_8/5O_2/6Ar$ ..... ۴
- شکل (۲-۱): مدل ساده از تیر با بار متحرک با پایه الاستیک..... ۷
- شکل (۱-۲): طرحواره موج تراک، شامل شاک و ناحیه واکنش و موج تیلور..... ۱۴
- شکل (۲-۲): توزیع واقعی (الف) و تقریبی فشار تراک (ب) بر حسب زمان..... ۱۵
- شکل (۳-۲): نمودار سرعت شاک نسبت به مکان برای سوخت رقیق نشده  $C_3H_8/5O_2$  در فشار اولیه  $1/33$  kPa (سمت چپ) و  $0/27$  kPa (سمت راست)..... ۱۷
- شکل (۴-۲): نمونه ای از نوسانات فشار شاک نسبت به مختصات، استخراج شده از حل عددی تراک برای انرژی های فعال سازی مختلف،  $(E_a/RT_1 = 26, (Q/RT_1 = 50, \gamma = 1.2)$  (a)..... ۱۸
- .....(b)  $E_a/RT_1 = 29.5$ ..... ۱۸
- شکل (۵-۲): کرنش محیطی بر حسب زمان در بارگذاری تراک حاصل از تست آزمایشگاهی..... ۱۸
- شکل (۶-۲): طرحواره حرکت امواج خمشی و ارتعاش لوله..... ۱۹
- شکل (۱-۳): طرحواره ای نحوه اتصال لوله ها به هم..... ۲۴
- شکل (۲-۳): طرحواره لوله تراک و قرار گیری آن بر روی یاتاقان های خطی..... ۲۵
- شکل (۳-۳): شرایط تکیه گاهی اعمال شده بر حل های المان محدود..... ۲۵
- شکل (۴-۳): مدل سازی بارگذاری برای المان های داخلی پوسته و مدل سازی حرکت بار با استفاده از اختلاف زمان ورود بار به هر المان (تغییر پله های زمانی)..... ۲۷
- شکل (۵-۳): نوسانات فشار شاک بی بعد  $(P/\gamma P_1)$  بر حسب نصف طول ناحیه واکنش برای انرژی فعال سازی بی بعد شده  $(E_a/RT_1 = 25.5, (Q/RT_1 = 50, \gamma = 1.2)$ ..... ۳۰
- شکل (۶-۳): طرحواره مدل سازی توزیع فشار نوسانی (نوسانات دنباله تیلور، نشان داده نشده است)..... ۳۲

شکل (۴-۱): کرنش محیطی بر حسب زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۱۰ در سرعت بحرانی بدون در نظر گرفتن دنباله تیلور، (الف)-گسسته سازی با حدود ۲۰۲۰ خط راست (پوشش کامل زمان حل)، (ب)-گسسته سازی با ۱۰۰۰ خط راست (عدم پوشش کامل زمان حل)، (ج)-گسسته سازی با ۵۰۰ خط راست، (د)- پاسخ آزمایشگاهی .....۳۷

شکل (۴-۲): کرنش های محیطی بر حسب زمان (ثانیه) حاصل از مدل عددی بارگذاری با سرعت و فشار شاک ثابت در کرنش سنج ۵ با تعداد تقسیمات گسسته سازی برابر، ردیف اول: حالت زیر بحرانی (تعداد تقسیمات ۱۹۱۲)، ردیف دوم: حالت بحرانی (تعداد تقسیمات ۲۰۲۰)، ردیف سوم: حالت فرا بحرانی (تعداد تقسیمات ۲۱۴۴)، ستون چپ: بدون در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات، ستون راست: با در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات .....۳۹

شکل (۴-۳): کرنش های محیطی بر حسب زمان (ثانیه) حاصل از مدل عددی بارگذاری با سرعت و فشار شاک ثابت در کرنش سنج ۱۰ با تعداد تقسیمات گسسته سازی برابر، ردیف اول: حالت زیر بحرانی (تعداد تقسیمات ۱۹۱۲)، ردیف دوم: حالت بحرانی (تعداد تقسیمات ۲۰۲۰)، ردیف سوم: حالت فرا بحرانی (تعداد تقسیمات ۲۱۴۴)، ستون چپ: بدون در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات، ستون راست: با در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات .....۴۰

شکل (۴-۴): کرنش های الاستیک محیطی در کرنش سنج ۵ در سرعت زیر بحرانی (۱/۱۴۰۰ متر بر ثانیه) برای بررسی تاثیر فشار نهایی محصولات روی پاسخ سازه، (الف) پاسخ عددی تحقیق حاضر با در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات، (ب) پاسخ تحلیلی با در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات، (ج) پاسخ آزمایشگاهی، (د) پاسخ تحلیلی بدون در نظر گرفتن فشار نهایی محصولات .....۴۲

- شکل (۴-۵): کرنش محیطی نسبت به زمان (ثانیه) بدون اعمال اصلاحات در بارگذاری و با استفاده از شرایط تکیه گاهی ساده مطابق مراجع در کرنش سنج ۱۰ در سرعت بحرانی، تعداد داده خروجی حلگر (الف) ۱۰۰ (پیش فرض نرم افزار)، (ب) ۲۰۰، (پ) ۴۰۰، (ت) ۶۰۰، (ث) حدود ۱۲۰ (این پاسخ از مرجع [۱۸] انتخاب شده و اصلاحات بارگذاری در آن اعمال نشده است)، (ج) پاسخ آزمایشگاهی..... ۴۵
- شکل (۴-۶): (الف) کرنش های محیطی حاصل از حل عددی برای کرنش سنج ۱۰ در سرعت بحرانی برای سطوح داخلی و خارجی لوله، (ب) بزرگنمایی پاسخ در قسمت بیشینه کرنش برای سهولت در مشاهده تفاوت بیشینه کرنش ها در سطوح مختلف..... ۴۷
- شکل (۴-۷): شرایط تکیه گاهی ساده و گیردار اعمال شده به مدل المان محدود در مراجع [۱-۲] و [۱۷-۱۸]..... ۴۸
- شکل (۴-۸): کرنش های محیطی عددی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵ بعد از انجام اصلاحات در گسسته سازی بار و پس پردازش و شرایط یکسان (تعداد داده خروجی ۱۰۰۰- (ردیف اول تکیه گاه ساده، (ردیف دوم) تکیه گاه گیردار، (ردیف سوم) شرایط تکیه گاهی بکار رفته در تحقیق حاضر، (ردیف چهارم) نتایج آزمایشگاهی - ستون چپ سرعت زیر بحرانی، ستون وسط سرعت بحرانی و ستون راست سرعت فرا بحرانی..... ۵۱
- شکل (۴-۹): کرنش های محیطی عددی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۱۰ بعد از انجام اصلاحات در گسسته سازی بار و پس پردازش و شرایط یکسان (تعداد داده خروجی ۱۰۰۰- (ردیف اول تکیه گاه ساده، (ردیف دوم) تکیه گاه گیردار، (ردیف سوم) شرایط تکیه گاهی بکار رفته در تحقیق حاضر، (ردیف چهارم) نتایج آزمایشگاهی - ستون چپ سرعت زیر بحرانی، ستون وسط سرعت بحرانی و ستون راست سرعت فرا بحرانی..... ۵۲

شکل (۴-۱۰): کرنش های محیطی بر حسب زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵، سرعت زیر بحرانی (ستون چپ)، سرعت بحرانی (ستون وسط)، سرعت فرا بحرانی (ستون راست) - ردیف اول، تحقیق حاضر و بعد از انجام اصلاحات در گسسته سازی بار و پس پردازش و با استفاده از شرایط تکیه گاهی معرفی شده (تعداد داده های خروجی ۱۰۰۰)، ردیف دوم نتایج عددی مرجع [۱۸]، ردیف سوم نتایج آزمایشگاهی [۱-۲]، ردیف چهارم نتایج تحلیلی مرجع [۱۹]..... ۵۷

شکل (۴-۱۱): کرنش های محیطی بر حسب زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵، سرعت زیر بحرانی (ستون چپ)، سرعت بحرانی (ستون وسط)، سرعت فرا بحرانی (ستون راست) - ردیف، تحقیق حاضر و بعد از انجام اصلاحات در گسسته سازی بار و پس پردازش و با استفاده از شرایط تکیه گاهی معرفی شده (تعداد داده های خروجی ۱۰۰۰)، ردیف دوم نتایج عددی مرجع [۱۸]، ردیف سوم نتایج آزمایشگاهی [۱-۲]، ردیف چهارم نتایج تحلیلی مرجع [۱۹]..... ۵۸

شکل (۵-۱): نمودار ضریب تقویت بر حسب تغییرات فرکانس در حالت زیر بحرانی با دامنه نوسان ۲۰ درصد فشار CJ، (الف) - کرنش سنج ۵، (ب) - کرنش سنج ۱۰..... ۶۳

شکل (۵-۲): نمودار ضریب تقویت بر حسب تغییرات فرکانس در حالت بحرانی با دامنه نوسان ۲۰ درصد فشار CJ، (الف) - کرنش سنج ۵، (ب) - کرنش سنج..... ۶۴

شکل (۵-۳): نمودار ضریب تقویت بر حسب تغییرات فرکانس در حالت فرا بحرانی با دامنه نوسان ۲۰ درصد فشار CJ، (الف) - کرنش سنج ۵، (ب) - کرنش سنج ۱۰..... ۶۵

شکل (۵-۴): تغییرات ضریب تقویت در دامنه های مختلف در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای محدوده زیر بحرانی در کرنش های ۵ و ۱۰، استخراج شده از مدل بارگذاری جدید..... ۶۸

شکل (۵-۵): تغییرات ضریب تقویت در دامنه های مختلف در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای محدوده بحرانی در کرنش سنج های ۵ و ۱۰، استخراج شده از مدل بارگذاری جدید..... ۶۸

شکل (۶-۵): تغییرات ضریب تقویت در دامنه های مختلف در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای محدوده فرا بحرانی در کرنش سنج های ۵ و ۱۰، استخراج شده از مدل بارگذاری جدید..... ۶۹

شکل (۷-۵): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵ در سرعت های زیر بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ)- (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتزی در کنار مقدار دامنه آمده است)- الف: ۱۰٪ (۱۴۵۹/۵۹)، ب: ۲۰٪ (۱۴۵۶/۸۵)، پ: ۳۰٪ (۱۴۵۲/۱۲)، ت: ۴۰٪ (۱۴۴۵/۳۰)، ث: ۵۰٪ (۱۴۳۶/۱۳)، ج: ۶۰٪ (۱۴۲۴/۱۸)، چ: ۷۰٪ (۱۴۰۹/۱۴)، ه: ۸۰٪ (۱۳۸۹)..... ۷۰

شکل (۸-۵): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۱۰ در سرعت های زیر بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ)- (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتزی در کنار مقدار دامنه آمده است)- الف: ۱۰٪ (۱۴۵۹/۵۹)، ب: ۲۰٪ (۱۴۵۶/۸۵)، پ: ۳۰٪ (۱۴۵۲/۱۲)، ت: ۴۰٪ (۱۴۴۵/۳۰)، ث: ۵۰٪ (۱۴۳۶/۱۳)، ج: ۶۰٪ (۱۴۲۴/۱۸)، چ: ۷۰٪ (۱۴۰۹/۱۴)، ه: ۸۰٪ (۱۳۸۹)..... ۷۱

شکل (۹-۵): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵ در حالت بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ)- (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتزی در کنار مقدار دامنه آمده است)- الف: ۱۰٪ (۱۵۶۷/۸۶)، ب: ۲۰٪ (۱۵۶۴/۹۲)، پ: ۳۰٪ (۱۵۵۹/۸۳)، ت: ۴۰٪ (۱۵۵۲/۴۲)، ث: ۵۰٪ (۱۵۴۲/۷۳)، ج: ۶۰٪ (۱۵۲۹/۸۰)، چ: ۷۰٪ (۱۵۱۳/۳۷)، ه: ۸۰٪ (۱۴۹۲/۳۵)..... ۷۲

شکل (۵-۱۰): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۱۰ در حالت بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ) - (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتری در کنار مقدار دامنه آمده است) -  
 الف: ۱۰٪ (۱۵۶۷/۸۶)، ب: ۲۰٪ (۱۵۶۴/۹۲)، پ: ۳۰٪ (۱۵۵۹/۸۳)، ت: ۴۰٪ (۱۵۵۲/۴۲)،  
 ث: ۵۰٪ (۱۵۴۲/۷۳)، ج: ۶۰٪ (۱۵۲۹/۸۰)، چ: ۷۰٪ (۱۵۱۳/۳۷)، ه: ۸۰٪ (۱۴۹۲/۳۵)..... ۷۳

شکل (۵-۱۱): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۵ در حالت بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ) - (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتری در کنار مقدار دامنه آمده است) -  
 الف: ۱۰٪ (۱۸۳۹/۶۹)، ب: ۲۰٪ (۱۸۳۶/۲۲)، پ: ۳۰٪ (۱۸۳۰/۱۹)، ت: ۴۰٪ (۱۸۲۱/۶۰)،  
 ث: ۵۰٪ (۱۸۱۰/۰۵)، ج: ۶۰٪ (۱۷۹۵/۱۰)، چ: ۷۰٪ (۱۷۷۵/۸۱)، ه: ۸۰٪ (۱۷۵۰/۸۶)..... ۷۴

شکل (۵-۱۲): کرنش های محیطی نسبت به زمان (ثانیه) در کرنش سنج ۱۰ در حالت بحرانی در فرکانس ۷۵۰ هرتز برای درصد دامنه های مختلف (درصدی از فشار CJ) - (متوسط سرعت در هر دامنه، بر حسب متر بر ثانیه در پرانتری در کنار مقدار دامنه آمده است) -  
 الف: ۱۰٪ (۱۸۳۹/۶۹)، ب: ۲۰٪ (۱۸۳۶/۲۲)، پ: ۳۰٪ (۱۸۳۰/۱۹)، ت: ۴۰٪ (۱۸۲۱/۶۰)،  
 ث: ۵۰٪ (۱۸۱۰/۰۵)، ج: ۶۰٪ (۱۷۹۵/۱۰)، چ: ۷۰٪ (۱۷۷۵/۸۱)، ه: ۸۰٪ (۱۷۵۰/۸۶)..... ۷۵

شکل (۵-۱۳): ضرایب تقویت برای سرعت های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه، الف - کرنش سنج ۵، ب - کرنش سنج ۱۰، خط تیره: المان محدود با تکیه گاه گیردار، خط چین: المان محدود با تکیه گاه ساده، نقطه چین: مدل تحلیلی تانگ، شکل لوزی: نتایج آزمایشگاهی..... ۷۸

شکل (۵-۱۴): مقایسه توزیع فشار بدست آمده از مدل بارگذاری جدید برای المان های اول و پانصدم لوله در حالت زیر بحرانی با نوسانات جبهه تراک در فرکانس ۷۵۰ هرتز و دامنه  
 $P_{CJ} / 3 \times 0 \dots \dots \dots 80$

شکل (۵-۱۵): تاثیر فاکتور کاهش نمایی متغیر با مکان در کرنش سنج ۵ در حالت زیر بحرانی در دامنه نوسان ۰.۵٪، فرکانس ۷۵۰، سرعت متوسط ۱۴۳۶/۳۶ متر بر ثانیه و فشار متوسط ۱/۲ مگاپاسکال. الف: T ثابت، ب: T متغیر (نوسانی)، ج: کرنش آزمایشگاهی در سرعت زیر بحرانی..... ۸۱

شکل (۵-۱۶): کرنش های محیطی (محور عمودی) بر حسب زمان (ثانیه)(محور افقی) در کرنش سنج ۵، سرعت زیر بحرانی (ستون چپ)، سرعت بحرانی (ستون وسط)، سرعت فرا بحرانی (ستون راست)- ردیف اول مربوط به تحقیق حاضر بعد از انجام اصلاحات در مدل بارگذاری قدیم-ردیف دوم، مربوط به نتایج تحقیق حاضر با استفاده از مدل بارگذاری جدید در فرکانس ۷۵۰ در دامنه های ۴۵، ۶۰ و ۳۰ درصد بترتیب برای حالت های زیر بحرانی، بحرانی و فرا بحرانی-ردیف سوم نتایج آزمایشگاهی [۱-۲]-ردیف چهارم نتایج عددی مرجع [۱۸]..... ۸۳

شکل (۵-۱۷): کرنش های محیطی (محور عمودی) بر حسب زمان (ثانیه)(محور افقی) در کرنش سنج ۱۰، سرعت زیر بحرانی (ستون چپ)، سرعت بحرانی (ستون وسط)، سرعت فرا بحرانی (ستون راست)- ردیف اول مربوط به تحقیق حاضر بعد از انجام اصلاحات در مدل بارگذاری قدیم-ردیف دوم، مربوط به نتایج تحقیق حاضر با استفاده از مدل بارگذاری جدید در فرکانس ۷۵۰ در دامنه های ۴۵، ۶۰ و ۳۰ درصد بترتیب برای حالت های زیر بحرانی، بحرانی و فرا بحرانی-ردیف سوم نتایج آزمایشگاهی [۱-۲]-ردیف چهارم نتایج عددی مرجع [۱۸]..... ۸۴

شکل (الف-۱): الگوریتم کلی مراحل حل عددی..... ۱۰۸

شکل (ب-۱): توزیع فشار بدست آمده در فشار متوسط ۱/۲ مگاپاسکال و سرعت متوسط

۱۴۳۸ متر بر ثانیه برای المان های شماره ۱ و ۲۰۰..... ۱۱۰

# فصل ۱- پیشگفتار

## ۱-۱- مقدمه

امروزه با بکارگیری وسیع مخازن و لوله های تحت فشار در صنایع و علوم مختلف، لزوم و اهمیت افزایش ایمنی این سازه ها در برابر انفجار های داخلی خواسته، یا ناخواسته احتمالی، برای محققان بیشتر مشخص شده است. کاربرد وسیع این بحث در صنایع نفت و گاز (خطوط انتقال)، صنایع نظامی (لوله توپ ها و تفنگ ها) و صنایع هوا فضا (موتور های ضربه ای - انفجاری<sup>۱</sup> و انفجار داخل بدنه هواپیما<sup>۲</sup>) باعث شده است تا نیاز به ایجاد و توسعه روش های مطمئن و کارآمد برای طراحی، تخمین عمر خستگی و مسائل مربوط به رشد ترکها در این سازه ها بیشتر احساس شود. اولین قدم در راستای رسیدن به اهداف ذکر شده، یافتن پاسخ های سازه ای<sup>۳</sup> و چگونگی توزیع تنش ها در سازه های تحت بارگذاری می باشد، که با توجه به ماهیت گذرای دینامیکی بارگذاری، بسیار پیچیده است. نیل به این هدف از روش های تحلیلی، عددی و یا تست های آزمایشگاهی میسر است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارا می باشند. طبیعتاً، روش های تحلیلی شامل فرضیات ساده کننده ای هستند که اغلب بواسطه آنها قابلیت اطمینان به نتایج این روش ها محدود می شود.

---

<sup>۱</sup> *Pulse Detonation Engines*

<sup>۲</sup> *Fuselage*

<sup>۳</sup> - منظور از پاسخ سازه در تحقیق حاضر، صرفاً کرنش محیطی الاستیک می باشد که در کل پایان نامه به اختصار از کلمه کرنش استفاده خواهد شد.



روش های آزمایشگاهی نیز به علت هزینه زیاد و محدودیت های ناشی از ایمنی، نمی توانند کاملاً پاسخگوی این نیاز باشند. ولی با استفاده از روش های عددی می توان، با استفاده از مدل های مناسب، شرایطی نزدیک به آنچه در عمل وجود دارد، ایجاد کرد و پاسخ های قابل اطمینانی استخراج نمود.

یکی از سازه های پایه<sup>۱</sup> که در سال های اخیر مورد توجه زیاد محققین بوده است، لوله تراک می باشد. بطور کلی این سازه، نوعی بارگذاری متحرک داخلی و متغییر با زمان را که موج تراک نام دارد و منجر به تغییر شکل گذرای لوله می شود، تجربه می کند. در طراحی لوله های شاک و تراک، بارگذاری دینامیکی با استفاده از ضریب تقویت<sup>۲</sup> (نسبت بیشینه کرنش دینامیکی به کرنش استاتیکی در فشار یکسان)، به شکل بارگذاری استاتیکی مدل شده و سپس مساله حل می گردد. برای سازه های ساده که دارای ارتعاشاتی با یک درجه آزادی هستند، بیشترین مقدار این ضریب برابر ۲ فرض می شود. تحقیقات اخیر [۱-۲] نشان داده شده است که مقدار این ضریب تحت شرایط و مکانیزم های خاصی نظیر نزدیک شدن سرعت موج تراک به سرعت بحرانی امواج خمشی و تداخل امواج اصلی با امواج سازه ای منعکس شده از اتصالات و انتهای لوله تراک، به مقادیر بالاتر تا حد ۴ می رسد. این مساله نشان دهنده ناتوانی این ضریب در طراحی سازه های مورد نظر در همه شرایط، می باشد و ضرورت در نظر گرفتن کل طیف پاسخ سازه ای لوله را بیش از پیش نشان می دهد. استخراج طیف کلی پاسخ های سازه ای، نیازمند مدل های تحلیلی یا عددی کارآمد و نزدیک به شرایط آزمایشگاهی می باشد.

گسترده و پیچیدگی زمینه های تحقیقاتی مورد نیاز در جهت بررسی پاسخ های سازه ای لوله تراک، زیاد و روش های تحقیق (آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی) در مورد این سازه نیز متنوع می باشد. لذا تحقیق حاضر با تمرکز بر موارد زیر دنبال شده است:

---

<sup>1</sup> Basic Structure

<sup>2</sup> Amplification factor

- استفاده از روش های عددی

- ایجاد و توسعه مدل عددی جدید و کارآمد برای بارگذاری

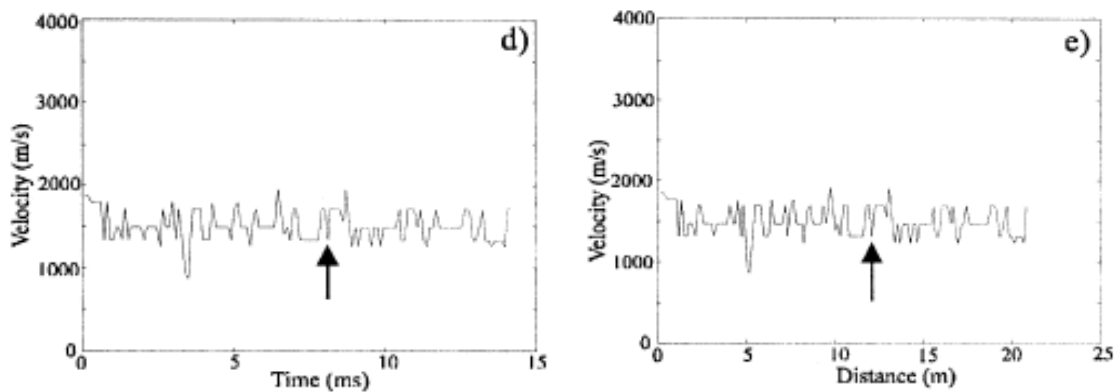
پاسخ های سازه ای لوله تراک تحت بارگذاری انفجاری داخلی، از دو دیدگاه سازه لوله و دینامیک گاز و انفجار قابل بررسی می باشند. بارگذاری این سازه کاملاً وابسته به مباحث دینامیک انفجار می باشد. در نتیجه وقوع انفجار گازی در یک لوله، موج تراک ایجاد شده و در لوله حرکت می کند. موج تراک از یک موج شاک در جلو و یک ناحیه واکنش شیمیایی در پشت آن تشکیل شده که به شدت با هم کوپل شده اند. فشار بلافاصله بعد از پیشانی موج به ۲۰ تا ۳۰ برابر فشار اولیه محیط می رسد. این موج در حالت ایده آل طبق تئوری چاپمن - ژوگت (CJ) با سرعت ثابت حرکت می کند و بسته به نوع مخلوط قابل احتراق اولیه و پارامترهای دیگر بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه سرعت دارد. از آنجا که محدوده سرعت امواج تراک در محدوده سرعت امواج خمشی سازه ای یا بیشتر از آن می باشد، امکان تشدید امواج خمشی وجود دارد. این تشدید باعث افزایش زیاد کرنش های محیطی نسبت به حالت بارگذاری استاتیکی در همان فشار (بیشینه فشار تراک) می شود. لذا، سرعت موج تراک و پارامترهای مربوط به آن، از مهمترین عوامل موثر در بارگذاری و بررسی پاسخ های سازه ای می باشند.

## ۲-۱- تعریف مساله

بر طبق تحقیقات و مشاهدات تجربی که در مورد دینامیک انفجار صورت گرفته است، سرعت و فشار موج شاک در تراک، نسبت به مکان و زمان، تغییر و نوسان می کند. عوامل مختلفی در این نوسانات تاثیر دارند و حتی فرکانس نوسانات نیز می تواند متغیر باشد [۳-۴]. در شکل (۱-۱) نمونه ای از تغییرات سرعت شاک، نسبت به زمان و مکان برای مخلوط  $C_3H_8/5O_2/6Ar$  نشان داده شده است.

تحقیقات اخیر در مورد پاسخ های سازه ای لوله تراک نشان داده است که، سرعت موج تراک تاثیر بسزایی در پاسخ سازه و بخصوص مکانیزم تشدید امواج سازه ای دارا می باشد [۵-۸ و ۱-۲]. در تمامی تحقیقات عددی و تحلیلی صورت گرفته در زمینه سازه، سرعت موج تراک در مدل های بارگذاری، ثابت و برابر سرعت چاپمن-ژوگت ( $V_{CI}$ )، فرض شده و نوسانات موج تراک در نظر گرفته نشده است. گرچه پیشرفت قابل توجهی در تعیین پاسخ سازه ها به بار گذاری تراک بوسیله روش های عددی در سال های اخیر حاصل شده است، همچنان در پاره ای موارد پاسخ ها از تطابق کافی با نتایج تجربی برخوردار نمی باشند. این عدم تطابق کافی در تحقیقات اخیر می تواند به دلیل کامل نبودن مدل هایی باشد که برای این نوع بارگذاری توسعه یافته اند.

همچنین مشاهدات تجربی بلتمن و شفرد [۱-۲] مبنی بر افزایش ضریب تقویت در شرایطی که اندازه سلول ها (که خود متاثر و ناشی از نوسانات تراک می باشند) به اندازه طول موج امواج خمشی نزدیک می شود، احتمال وجود مکانیزم تشدید خاص دیگری که بر گرفته از نوسانات تراک و متغیر های متاثر در آن (نظیر دامنه و فرکانس) باشد را افزایش می دهد.



شکل (۱-۱): نوسانات سرعت شاک نسبت به زمان و مکان برای سوخت  $C_3H_8/5O_2/6Ar$  [۳]

لذا در تحقیق حاضر، با توجه به اهمیت و نقش نوسانات فشار و سرعت تراک در پاسخ سازه ای و تاثیر آن در مکانیزم تشدید امواج خمشی، سعی بر آن است تا مدل عددی جدیدی برای بارگذاری

توسعه یابد که این نوسانات را در نظر بگیرد. بررسی پاسخ های سازه ای ناشی از این مدل بارگذاری جدید، می تواند در انتها، پاسخگوی سئوالات زیر باشد:

- آیا نوسانی فرض کردن سرعت و فشار شاک (مدل بارگذاری جدید)، می تواند تاثیری در بهبود پاسخ های سازه ای داشته باشد یا خیر؟
- پارامتر های مختلف موثر در نوسانات سرعت و فشار شاک (فرکانس تغییرات، دامنه تغییرات و غیره)، هر کدام چگونه و تا چه حدی در پاسخ های سازه ای و مکانیزم تشدید امواج خمشی تاثیر دارند؟

### ۱-۳- بررسی تحقیقات پیشین

در زمینه پاسخ سازه ای پوسته ها به بارگذاری شاک و تراک داخلی، تحقیقاتی در گذشته صورت گرفته است. ساده ترین مدل دینامیکی، تنها بیانگر حرکت شعاعی سطح مقطع لوله می باشد. در این مدل طول لوله بی نهایت فرض می شود و پاسخ ها مستقل از موقعیت مکانی موج و سرعت آن می باشند و تنها به فشار اعمالی بر لوله که بصورت استاتیکی و همزمان بر کل طول لوله اعمال می شود بستگی دارند.<sup>۱</sup> شفرد<sup>۲</sup> [۱۰] از مدل سطح مقطعی برای پیش بینی پاسخ لوله به بارگذاری تراک داخلی استفاده کرد. وی به دلیل ضعف این مدل در توصیف تشدید کرنش ها در سرعت های خاص (سرعت بحرانی امواج خمشی)، به دلیل عدم وابستگی پاسخ این مدل به سرعت و مختصات موج تراک در لوله، نتوانست به هدف خود برسد و پی برد که این مدل، ضریب تقویت دینامیکی را بین

---

<sup>۱</sup> - در مراجع [۲] و [۹] ذکر شده است که دی مالهرب در سال ۱۹۶۶ نتایج بدست آمده از مدل سطح مقطعی را با مقادیر آزمایشگاهی برای بارگذاری تراک مقایسه نمود، ولی به دلیل ضعف این مدل، نتوانست پاسخ های آزمایشگاهی را بوسیله این مدل توصیف کند و تنها توانست بیشینه کرنش هایی نزدیک به کرنش های آزمایشگاهی، استخراج نماید.  
*2 Shepherd*