دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی مکانیک- جامدات

تحلیل رفتار دینامیکی لوله با خواص تابعی حامل سیال

به وسیله‌ی

بابک یزدان پناه

استاد راهنما

دکتر سید احمد فاضل زاده

آذر ۱۳۹۰

به نام خداوند جان و خرد

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب بابک یزدان پناه(۸۷۰۹۰۸)، دانشجوی رشته مهندسی مکانیک گرایش جامدات دانشکده مکانیک اظهار می کنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته ام. همچنین اظهار میکنم که تحقیق و موضوع پایان نامه ام تکراری نیست و تعهد می نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی: بابک یزدان پناه

تاریخ و امضا: ۱۳۹۱/۵/۱۲

به نام خدا

تحلیل رفتار دینامیکی لوله با خواص تابعی حامل سیال

به کوشش

بابک یزدان پناه

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از

فعالیت های لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی مکانیک

(طراحی کاربردی)

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه، با درجه: عالی

دکتر سید احمد فاضل زاده، دانشیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما).....

دکتر محمد اقتصاد، استاد مهندسی مکانیک.....

دکتر علی نایبی، دانشیار مهندسی مکانیک.....

آذر ۱۳۹۰

سپاسگزاری

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر سید احمد فاضل زاده جهت کمک های بی شائبه و دلسوزی و سعه صدر ایشان کمال تشکر را داشته باشم که اگر راهنمایی ها و الطاف بی حد ایشان نبود، انجام این رساله را میسر و مقدور نمیدیدم. همچنین از اساتید بسیار عزیز و مهربانم، آقای دکتر اقتصاد، آقای دکتر نایبی و آقای دکتر خیاطیان نیز به سبب راهنمایی های خردمندانه شان طی انجام این رساله بسیار سپاسگزارم.

چکیده

تحلیل رفتار دینامیکی لوله با خواص تابعی حاوی جریان سیال

به کوشش
بابک یزدان پناه

در پایان نامه پیش رو که عمدتا به تحلیل رفتار دینامیکی لوله های با خواص تابعی حاوی جریان سیال اختصاص دارد، در ابتدا با مروری بر تحقیقات انجام شده طی چند سال اخیر، سعی شده است تا شناخت بیشتری نسبت به ابعاد موضوع ایجاد شود. در ادامه پس از بدست آوردن معادلات دینامیکی حاکم بر مساله به فرم مشتقات جزئی از طریق تئوری تیر جداره نازک و تبدیل آن ها به فرم گسسته یا مشتقات معمولی با استفاده از روش گلرکین، مرزهای پایداری لوله در سرعت های سیال و دماهای محیطی مختلف و پارامترهای سیستم از جمله کسرهای حجمی و نسبتهای جرمی متفاوت بدست آمده است. سپس، پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان سیال با خواص تابعی همراه با تکیه گاه ساده و یکسرگیردار تحت بارگذاری های متفاوت و در رژیم های سیال با سرعت ثابت و ضربانی و همچنین در مواجهه با پدیده ضربه قوچ بررسی شده است. در آخر، روش کنترلی بهینه با تحریک کننده های پیزوالکتریک برای دینامیک خطی لوله با خواص تابعی حاوی جریان سیال و روش خطی سازی پسخورد جهت کنترل معادلات غیرخطی لوله معرفی شده است و در نهایت شبیه سازی کامپیوتری انجام شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کلیات و کاربرد..... ۲

۲-۲- هدف تحقیق ۳

فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱- تداخل سیال-سازه در لوله های با معادلات خطی..... ۵

۲-۲- تداخل سیال-سازه در لوله های با معادلات غیرخطی..... ۱۹

۲-۳- مروری بر کاربرد مواد با خواص تابعی و تئوری جداره نازک..... ۳۱

۲-۴- مروری بر کاربرد مواد پیزوالکتریک در کنترل فعال سازه ای..... ۳۴

فصل سوم: معرفی مواد هوشمند

۳-۱- مواد با خواص تابعی..... ۳۶

۳-۲- مواد پیزوالکتریک..... ۴۰

۳-۲-۱- آنتالپی الکتریکی و میدان الکتریکی..... ۴۲

۳-۲-۲- روابط خطی متشکله پیزوالکتریک..... ۴۲

فصل چهارم: معادلات حاکمه

۴-۱-معادله حرکت لوله حاوی جریان سیال..... ۴۷

۴-۲-کرنش و جابجایی..... ۴۸

۴-۳- سینماتیک لوله و سیال..... ۴۸

۴-۴-اصل هامیلتون..... ۴۹

۴-۵- کار غیرپایستار..... ۴۹

۴-۶- انرژی جنبشی و پتانسیل..... ۵۰

عنوان **صفحه**

۴-۷- معادلات حرکت لوله حاوی جریان سیال با خواص تابعی ۵۱
۴-۷-۱- سینماتیک مساله ۵۱
۴-۷-۲- روابط متشکله ترموالاستیک ۵۳
۴-۷-۳- معادلات حاکم بر لوله با خواص تابعی ۵۳
۴-۸- معادلات غیرخطی لوله حاوی جریان سیال ۵۶
۴-۹- معادلات حرکت لوله معمولی همراه با لایه پیزوالکتریک ۵۷
۴-۱۰- معادلات حرکت لوله با خاصیت تابعی همراه با لایه پیزوالکتریک ۵۸

فصل پنجم: تحلیل رفتار دینامیکی

۵-۱- روش گلرکین ۶۱
۵-۲- تحلیل پایداری ۶۳
۵-۳- پاسخ دینامیکی سیستم ۶۵
۵-۳-۱- پاسخ دینامیکی نسبت به شرایط اولیه ۶۶
۵-۳-۲- پاسخ دینامیکی به بار پله واحد ۶۶
۵-۳-۳- پاسخ دینامیکی به بار تابع خطی زمان ۶۷
۵-۳-۴- پاسخ دینامیکی به بار گسترده تابع زمان ۶۷
۵-۳-۵- پاسخ دینامیکی به بار ضربه ۶۸
۵-۳-۶- پاسخ دینامیکی به بار متحرک در طول لوله ۶۸
۵-۳-۷- پاسخ دینامیکی به تحریک پایه هارمونیک ۶۹
۵-۳-۸- پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان سیال ضربانی به شرایط اولیه ۶۹
۵-۳-۹- پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان سیال به ضربه قوچ ۶۹

فصل ششم: کنترل خطی ارتعاشات لوله حاوی جریان سیال

۶-۱- معادلات گسسته شده حرکت ۷۲
۶-۲- معادلات حسگر ۷۳
۶-۳- قانون کنترلی بهینه ۷۴

عنوان **صفحه**

فصل هفتم:کنترل با روش خطی سازی پسخورد

۷-۱- سیستم تک ورودی-تک خروجی ۷۹
۷-۱-۱- درجه نسبی ۷۹
۷-۱-۲- خطی سازی دقیق ۷۹
۷-۱-۳- تبدیل مختصات غیر خطی ۸۰
۷-۱-۴- خطی سازی جزیی ۸۰
۷-۲- کنترل غیر خطی چند ورودی-چند خروجی ۸۲
۷-۳- کاربرد برای فرونشاندن ارتعاشات لوله ۸۴
۷-۳-۱- کنترل با مود اول به عنوان ورودی ۸۴
۷-۳-۲-کنترل با مود دوم به عنوان ورودی ۸۸
۷-۳-۳- کنترل با در نظر گرفتن مود اول و دوم به عنوان خروجی ۹۱

فصل هشتم: ارائه نتایج و بحث

۸-۱- پایداری لوله حاوی جریان سیال ۹۷
۸-۲- پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان سیال ۱۰۴
۸-۲-۱-پاسخ دینامیکی به شرایط اولیه ۱۰۴
۸-۲-۲- پاسخ دینامیکی به بار پله ۱۱۱
۸-۲-۳- پاسخ دینامیکی به بار تابع خطی زمان ۱۱۶
۸-۲-۴- پاسخ دینامیکی به بار گسترده زمانمند ۱۱۸
۸-۲-۵- پاسخ دینامیکی به بار ضربه ای ۱۲۰
۸-۲-۶- پاسخ دینامیکی به بار متحرک ۱۲۱
۸-۲-۷- پاسخ دینامیکی به تحریک پایه ای هارمونیک ۱۲۵
۸-۲-۸- پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان ضربانی ۱۳۵
۸-۲-۹- پاسخ دینامیکی لوله حاوی جریان سیال به ضربه قوچ ۱۵۲
۸-۳- کنترل بهینه لوله حاوی جریان سیال ۱۵۵
۸-۴- لوله با معادلات حرکت غیرخطی ۱۶۰
۸-۴-۱- پاسخ غیر خطی لوله حاوی جریان سیال ۱۶۰
۸-۴-۲-کنترل غیرخطی لوله معمولی حاوی جریان سیال ۱۶۲

عنوان **صفحه**

فصل نهم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۹-۱- نتیجه گیری ۱۶۹

۹-۲- پیشنهادات ۱۷۱

فهرست منابع و ماخذ ۱۷۳

پیوست

الف- تئوری تیر جداره نازک ۱۸۵

الف-۱- فرم ماتریسی انرژی جنبشی در تیر جداره نازک ۱۸۵

الف-۲- انرژی پتانسیل(کرنش) در تئوری تیر جداره نازک ۱۸۶

ب- معادلات غیر خطی لوله ۱۸۹

ب-۱- اصل هامیلتون و توضیحات مربوط به انرژی ۱۹۱

ب-۲- ضرایب معادلات حرکت غیرخطی ۱۹۲

پ- آزمون پایداری ۱۹۳

ت- چگالی طیفی ۱۹۵

ث- پیش نیاز خطی سازی پسخورد ۱۹۶

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول۱- ضرایب وابسته به دمای مدول یانگE(Pa)، ضریب انبساط
دماییα(1/k) و نسبت پواسونv برای فلز ۹۶
جدول۲- ضرایب وابسته به دمای مدول یانگE(Pa)، ضریب انبساط
دماییα(1/k) و نسبت پواسونv برای سرامیک ۹۷

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل(۳-۱): ماده FGM با کسر حجمی فازهای تشکیل دهنده دریک راستا (راستای عمودی) ۳۷
شکل(۳-۲): تغییرات کسر حجمی در راستای ضخامت بدون بعد ۳۹
شکل(۳-۳): یک کریستال کوارتز و جایدهی یون های سیلیس و اکسیژن و مختصات متعامد بر روی آن ۴۰
شکل(۳-۴): اثر مستقیم پیزوالکتریک در سازه کوارتز، (الف) اثر طولی پیزوالکتریک. (ب) اثر عرضی پیزوالکتریک ۴۱
شکل(۴-۱): لوله حاوی جریان سیال با تکیه گاه ساده ۴۵
شکل(۴-۲): لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال ۴۷
شکل(۴-۳): المان لوله با خواص تابعی در مختصات جداره نازک ۵۲
شکل(۴-۴): لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال همراه با لایه پیزوالکتریک ۵۷
شکل(۵-۱): لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال همراه با بار خارجی ۶۵
شکل(۵-۲): نمایش تابع پله ۶۶
شکل(۵-۳): نمایش بار تابع خطی زمان ۶۷
شکل(۵-۴): نمایش بار (گسترده) تابع زمان ۶۷
شکل(۵-۵): نمایش بار ضربه ۶۸
شکل(۵-۶): نمایش بار متحرک بر روی تیر یکسرگیردار ۶۸
شکل(۵-۷): نمایش تحریک از پایه بر روی تیر با تکیه گاه ساده ۶۹
شکل(۵-۸): لوله یکسرگیردار متصل به مخزن و شیر ۷۰
شکل(۶-۱): لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال همراه با لایه پیزوالکتریک ۷۳
شکل(۸-۱): دیاگرام آرگاند برای لوله حاوی جریان سیال با $k = 100, \lambda_T = 0, \beta = 0.1$ ۹۸
شکل(۸-۲): نمودار U-λ_T در کسرهای حجمی $k=0\ ,\ 5\ ,\ 100$ در $\beta = .1$ ۹۹
شکل(۸-۳): نمودار U-λ_T در کسرهای حجمی $k=0\ ,\ 5\ ,\ 100$ در $\beta = .2$ ۹۹

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۴): نمودار U-λ_T در کسرهای حجمی $k=0\ ,\ 5\ ,\ 100$ در $\beta = .5$ ۱۰۰
شکل(۸-۵): نمودار U- β در کسرهای حجمی $k=0\ ,1\ ,3\ ,\ 5\ ,\ 50$ در $\lambda_T = 0$ ۱۰۱
شکل(۸-۶): نمودار U- β در کسرهای حجمی $k=0\ ,1\ ,3\ ,\ 5\ ,\ 50$ در $\lambda_T = 2$ ۱۰۱
شکل(۸-۷): نمودار U- β در کسر حجمی $k=100$ و $\lambda_T = 0,1,2,3,4,5,6$ ۱۰۲
شکل(۸-۸): نمودار پایداری لوله حاوی جریان سیال در $k=100$ و $\lambda_T = 0$ و با در
نظرگرفتن ۴ مود ارتعاشی ۱۰۳
شکل(۸-۹): نمودار پایداری لوله حاوی جریان سیال در $k=100$ و $\lambda_T = 0$ و با در
نظرگرفتن ۳ مود ارتعاشی ۱۰۳
شکل(۸-۱۰): نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با $k = 1\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال($U=6.7$) ۱۰۵
شکل(۸-۱۱): نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال(U=5.5) ۱۰۶
شکل(۸-۱۲): نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال($U=5$) ۱۰۷
شکل(۸-۱۳):نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با $k = 1\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال(U=۳.۱۴) ۱۰۸
شکل(۸-۱۴): نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با $k = 1\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال(U=3.6) ۱۰۹
شکل(۸-۱۵): نمودار پاسخ به شرایط اولیه در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال(U=۳.۱۴) ۱۱۰
شکل(۸-۱۶): نمودار پاسخ به بار پله ای در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال(U=۵.۱۹) ۱۱۳
شکل(۸-۱۷): نمودار پاسخ به بار پله ای در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال($U=3.04$) ۱۱۴
شکل(۸-۱۸)-نمودار پاسخ به بار پله در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال($U=3.24$) ۱۱۵
شکل(۸-۱۹): نمودار پاسخ به بار خطی تابع زمان در لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ ،با سرعت سیال($U=5$) ۱۱۶
شکل(۸-۲۰): نمودار پاسخ به بار خطی تابع زمان در لوله با تکیه گاه ساده حاوی جریان
سیال با $k = 100\ ،.1 = \beta$ و $\lambda_T = 0$ با سرعت سیال($U=3.14$) ۱۱۷

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۲۱): نمودار پاسخ به بار گسترده زمانمند در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=5.19$) ۱۱۸
شکل(۸-۲۲): نمودار پاسخ به بار گسترده زمانمند در لوله با تکیه گاه ساده حاوی
جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=3.14$) ۱۱۹
شکل(۸-۲۳): نمودار پاسخ به بار ضربه ای در لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ ، با سرعت سیال(U=5)..... ۱۲۰
شکل(۸-۲۴): نمودار پاسخ به بار متحرک(۱ پاس در طول لوله به مدت ۱۰ ثانیه) در
طول لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$
با سرعت سیال($U=5.19$)..... ۱۲۲
شکل(۸-۲۵): نمودار پاسخ به بار متحرک(رفت و برگشت در طول لوله به مدت ۲۰ ثانیه)
در طول لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$
با سرعت سیال($U=5.19$)..... ۱۲۳
شکل(۸-۲۶): نمودار پاسخ به بار متحرک(۱ پاس در طول لوله به مدت ۱۰ ثانیه) در
طول لوله یکسرگیردار حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$
با سرعت سیال($U=3.04$)..... ۱۲۴
شکل(۸-۲۷): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=2$)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۲۶
شکل(۸-۲۸): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=2$)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۲۷
شکل(۸-۲۹): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=2$)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۲۸
شکل(۸-۳۰): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=5$)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۲۹
شکل(۸-۳۱): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و $\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال($U=5$)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۳۰

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۳۲): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال(*U=5*)
در فرکانس های متفاوت ۱۳۱
شکل(۸-۳۳): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال(*U=5.19*)
در فرکانس های متفاوت ۱۳۳
شکل(۸-۳۴): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال(*U=5.19*)
در فرکانس های متفاوت ۱۳۳
شکل(۸-۳۵): نمودار پاسخ به تحریک از پایه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت سیال(*U=5.19*)
در فرکانس های متفاوت ۱۳۴
شکل(۸-۳۶): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=2*) در
فرکانس های متفاوت..... ۱۳۶
شکل(۸-۳۷): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=2*) در فرکانس
های متفاوت..... ۱۳۷
شکل(۸-۳۸): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ باسرعت متوسط سیال(*U=3*) در فرکانس
های متفاوت. ۱۳۸
شکل(۸-۳۹): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ باسرعت متوسط سیال(*U=3*) در فرکانس
های متفاوت. ۱۳۹
شکل(۸-۴۰): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=4*) در فرکانس
های متفاوت. ۱۴۰

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۴۱): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1 ، k = 100$ با سرعت متوسط
سیال(U=4) در فرکانس های متفاوت. ۱۴۱
شکل(۸-۴۲): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=5*) در فرکانس
های متفاوت. ۱۴۳
شکل(۸-۴۳): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط
سیال(*U=5*) در فرکانس های متفاوت. ۱۴۴
شکل(۸-۴۴): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار
حاوی جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط
سیال(*U=5*) درفرکانس های متفاوت. ۱۴۵
شکل(۸-۴۵): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=5*)
در فرکانس های متفاوت. ۱۴۶
شکل(۸-۴۶): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1 ، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(U=5.5)
در فرکانس های متفاوت..... ۱۴۷
شکل(۸-۴۷): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی
جریان سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=5.5*)
در فرکانس های متفاوت. ۱۴۸
شکل(۸-۴۸): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=5.5*)
در فرکانسهای متفاوت. ۱۴۹
شکل(۸-۴۹): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=6*)
در فرکانسهای متفاوت..... ۱۵۰
شکل(۸-۵۰): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار حاوی جریان
سیال ضربانی با$\lambda_T = 0$و$\beta = .1، k = 100$ با سرعت متوسط سیال(*U=6*)
در فرکانسهای متفاوت. ۱۵۱

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۵۱): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار
به ضربه قوچ با$k = 100$، $\beta = .1$ و$\lambda_T = 0$ با فشار بدون بعد سیال$T = 1$،
در سرعتهای بدون بعد سیال متفاوت ۱۵۳
شکل(۸-۵۲): نمودار پاسخ به شرایط اولیه دلخواه یک لوله یکسرگیردار
به ضربه قوچ با$k = 100$، $\beta = .1$ و$\lambda_T = 0$ با فشار بدون بعد سیال$T = 1$، در
سرعتهای بدون بعد سیال متفاوت..... ۱۵۴
شکل(۸-۵۳): پاسخ کنترل شده نوک لوله حاوی جریان سیال با سرعت$U = 5.5$ و
ثابت های وزنی($Q = I, 10I, 100I$ و*R=1*) ۱۵۶
شکل(۸-۵۴): نمودار چگالی طیفی توان لوله حاوی جریان سیال با سرعت $U = 5.5$
به صورت کنترل نشده(- -) و کنترل شده با ثابت های وزنی$Q = 100I$ و*R=1* (-)..... ۱۵۶
شکل(۸-۵۵): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال
$U = 5.5$ وثابت‌های وزنی$Q = 100I$ *R=1* ۱۵۷
شکل(۸-۵۶): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال$U = 5.5$ وثابت
های وزنی$Q = 10I$ *R=1* ۱۵۷
شکل(۸-۵۷): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال$U = 5.5$ وثابت
های وزنی$Q = 1I$ *R=1* ۱۵۷
شکل(۸-۵۸): پاسخ کنترل شده نوک لوله حاوی جریان سیال با سرعت$U = 6$ و ثابت
های وزنی($Q = I, 10I, 100I$ و*R=1*)..... ۱۵۸
شکل(۸-۵۹): نمودار چگالی طیفی توان لوله حاوی جریان سیال با سرعت $U = 6$ به
صورت کنترل نشده(- -) و کنترل شده با ثابت های وزنی$Q = 100I$ و*R=1* (-). ۱۵۸
شکل(۸-۶۰): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال$U = 6$
وثابت های وزنی$Q = 100I$ *R=1* ۱۵۹
شکل(۸-۶۱): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال$U = 6$
وثابت های وزنی$Q = 10I$ *R=1* ۱۵۹
شکل(۸-۶۲): ولتاژ تحریک کننده برای کنترل لوله با سرعت سیال
$U = 6$ وثابت های وزنی$Q = 1I$ *R=1* ۱۵۹
شکل(۸-۶۳): پاسخ غیرخطی لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی$\beta = .1$.
و سرعت سیال$U = 4.9$. الف: نمودار جابجایی بر حسب زمان. ب: نمودار فازی ۱۶۱

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۶۴): پاسخ غیرخطی لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی $\beta = 1.$
و سرعت سیال $U = 5$. الف: نمودار جابجایی بر حسب زمان. ب: نمودار فازی ۱۶۱
شکل(۸-۶۵): پاسخ غیرخطی لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی $\beta = 1.$
و سرعت سیال $U = 7$. الف: نمودار جابجایی بر حسب زمان. ب: نمودار فازی ۱۶۱
شکل(۸-۶۶): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با
کسرجرمی $\beta = 1.$ و سرعت سیال $U = 4$.(*): کنترل شده با روش خطی سازی
پسخورد مود اول به عنوان خروجی. (-) :کنترل نشده ۱۶۲
شکل(۸-۶۷): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با
کسرجرمی $\beta = 1.$ و سرعت سیال $U = 5$.(*): کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد
مود اول به عنوان خروجی.(-) :کنترل نشده ۱۶۳
شکل(۸-۶۸): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با
کسرجرمی $\beta = 1.$ و سرعت سیال $U = 7$. ۱۶۳
شکل(۸-۶۹): دینامیک صفر اول لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی $\beta = 1.$
و سرعت سیال $U = 7$، کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد و استفاده
از مود اول ارتعاشات به عنوان خروجی ۱۶۴
شکل(۸-۷۰): دینامیک صفر دوم لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت
جرمی $\beta = 1.$ و سرعت سیال $U = 7$، کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد
و استفاده از مود اول ارتعاشات به عنوان خروجی ۱۶۴
شکل(۸-۷۱): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با
کسرجرمی $\beta = 2.$ و سرعت سیال $U = 5$.(*): کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد
مود اول به عنوان خروجی. (-) :کنترل نشده ۱۶۵
شکل(۸-۷۲): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با
کسرجرمی $\beta = 2.$ و سرعت سیال $U = 7$. ۱۶۵
شکل(۸-۷۳): دینامیک صفر اول لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی
$\beta = 2.$ و سرعت سیال $U = 7$، کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد و استفاده
از مود اول ارتعاشات به عنوان خروجی ۱۶۶
شکل(۸-۷۴): دینامیک صفر دوم لوله معمولی حاوی جریان سیال با نسبت جرمی $\beta = 2.$
و سرعت سیال $U = 7$، کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد و استفاده
از مود اول ارتعاشات به عنوان خروجی ۱۶۶

عنوان **صفحه**

شکل(۸-۷۵): پاسخ لوله معمولی حاوی جریان سیال با معادلات غیرخطی حرکت. با کسر جرمی $\beta = .1$ و سرعت سیال $U = 7$. کنترل شده با روش خطی سازی پسخورد مود اول و دوم به عنوان خروجی ۱۶۷
شکل (الف-۱) : هندسه زوایا و بردارهای مماس و عمود بر مرز یک کانتور و رابطه آنها با المانهای دستگاه کارتزین ۱۸۶
شکل(الف-۲): الگوریتم بدست آوردن مقادیر سختی a_{ij}. ۱۸۷
شکل(ب.۱) : لوله در مختصات اویلری و لاگرانژی و مختصات s در هنگامی که لوله یکسرگیردار است ۱۹۰