دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

# تحلیل پایداری و بررسی رفتارهای غیرخطی لوله‌های حامل جریان دوار

ارائه‌شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک-گرایش طراحی کاربردی

اساتید راهنما:

**دکتر مرتضی دردل**

**دکتر محمدهادی پاشایی**

استاد مشاور:

**دکتر محمد حسن‌قاسمی**

نگارش:

**سعید همایونی بورا**

زمستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

## تقدیر و تشکر

با حمد و ثنای خداوند متعال، بر خود لازم می دانم از زحمات و راهنمایی های اساتید ارزشمند "**دکتر مرتضی دردل**"، "**دکتر محمدهادی پاشایی**" و "**دکتر محمد حسن قاسمی**" که در انتخاب موضوع پایان نامه، تهیه و تدوین آن در تمام مراحل مرا مورد لطف و عنایت خود قرار دادند، تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین، از اساتید ارزشمند، **دکتر مجید عباسی** و **دکتر روزبه شفقت**، به دلیل یاریها و راهنمایی های بی چشمداشت ایشان که بسیاری از سختیها را برایم آسانتر نمودند، کمال تشکر را دارم.

از دوستان خوبم که در مدت تحصیل در دانشگاه سختی و مشکلات گذراندن واحدهای درسی و انجام پایان نامه را به لحظات خوش و خاطره انگیز تبدیل نمودند تشکر می کنم. عمار مفید نخعی، معین محمدپور، محمدمهدی برزگری، آرمان قاسمی، مازیار مرعشی، محمدحسین حمیدی از جمله دوستانی بودند که ذکر نام هرکدامشان، یادآور دوران خوش تحصیل می باشد، بدین وسیله از خداوند منان سلامتی و موفقیت روز افزون برای تمامشان خواهانم.

سعید همایونی بورا

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر سخت کوش و مادر مهربانم

خواهر و برادر عزیزم

که زندگی با بودن آنان معنا دارد و بس

به ویژه دکتر دردل

که با همدلی و همراهی و همگامی، همواره راهنما و راه گشای نگارنده در اتمام و کمال پایان نامه بوده است.

## چکیده

در این تحقیق، به مدلسازی و بررسی پایداری خطی و غیرخطی لوله حامل سیال با در نظر گرفتن دوران پرداخته خواهد شد. به طور خاص رفتارهای دینامیک یک لوله یکسرگیردار به صورت تئوری با میدان غیرخطی جدید مورد بررسی قرار گرفته می شود. در مدل‌سازی، توابع جابجایی ۳ بعدی که شامل جابجایی عرضی دو خمش و جابجایی درون صفحه‌ای می‌باشد انتخاب شده و همچنین با توجه به غیرخطی بودن ذاتی سیستم از روابط کرنش-جابجایی غیرخطی استفاده می شود.

معادلات غیرخطی حاکم بر حرکت برای لوله یکسرگیردار با استفاده از اصل لاگرانژ استخراج شده است. در استخراج معادلات، به علت حرکت سه بعدی میدان حرکت به صورت دو خمش مدل گردیده است. معادله دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش گالرکین[1] به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل‌شده ، ابتدا تحلیل خطی معادلات انجام‌گرفته و پارامترهای بحرانی، نوع انشقاق‌ها و ناپایداری‌ها تعیین گردیده است. این بررسی‌ها برای شرایط مرزی‌های گیردار-گیردار، لولا-لولا هم انجام شده و ناپایداری هایی نظیر واگرایی و کمانش، فلاتر و فلاتر کوپل شده مشاهده شده است. پس از آن معادلات غیرخطی حل شده و رفتارهای تناوبی به صورت سیکل حدی، پریود دوبل و آشوب به کمک نگاشت پوانکاره و دیاگرام دوشاخه‌شدگی[2] مشاهده شده است. همچنین اثر پارامترهای طراحی بر رفتار سیستم ارائه شده است.



**کلمات کلیدی**: لوله حامل سیال، تحلیل ناپایداری، انشقاق، فلاتر، نگاشت پوانکاره ، رفتار غیرخطی


[1] Galerkin method

[2] Bifurcation diagram

# فهرست مطالب


فصل ۱: مقدمه و مرور کارهای انجام شده ..... ۱

۱-۱ مقدمه ..... ۱

۱-۲ کاربرد لوله حامل سیال ..... ۱

۱-۳ اهمیت مدلسازی و مرور پژوهشهای انجام گرفته ..... ۲

*۱-۳-۱ اهمیت مدسازی مکانیکی لوله های حامل سیال ..... ۲*

*۱-۳-۲ ناپایداری لوله های حامل سیال ..... ۳*

*۱-۳-۳ بررسی رفتارهای غیرخطی لوله های حامل سیال ..... ٤*

۱-۴ تکنیک های حل معادلات ..... ۷

۱-۵ بررسی اثر دوران بر لوله حامل سیال ..... ۷

۱-۶ اهداف و مسائل مورد بررسی پایاننامه ..... ۸

*۱-۶-۱ فرضیات حاکم بر مسئله ..... ۸*

*۱-۶-۲ اهداف پایان نامه ..... ۸*

**فصل ۲: مدلسازی لوله حامل سیال به همراه دوران در حالت ۳ بعدی ..... ۱۰**

۲-۱ مقدمه ..... ۱۰

۲-۲ سیستم گسسته و پارامترها ..... ۱۱

۲-۳ روش لاگرانژ برای مدلسازی سیستمهای پیوسته ..... ۱۲

۲-۴ روش همیلتون برای مدلسازی سیستم های پیوسته ..... ۱۳

۲-۵ معرفی مشخصات فیزیکی و هندسی لوله و جریان سیال ..... ۱۳

۲-۶ استخراج معادلات دینامیکی سیستم ..... ۱٤

*۲-۶-۱ تابع جابجایی ۳ بعدی و توابع کرنش-جابجایی ..... ۱٤*

*۲-۶-۲ انرژی جنبشی لوله و سیال عبوری ..... ۲۲*

*۲-۶-۳ کار نیروهای غیرپایستار ..... ۲۵*

۲-۷ روش حل مسئله ..... ۲۵
۲-۸ اعمال روش لاگرانژ و معادلات نهایی حرکت ..... ۲۷
۲-۹ خلاصه بحث و نتیجه گیری فصل دوم ..... ۳٤
**فصل ۳: نتایج ..... ۳۶**
۳-۱ مقدمه ..... ۳٦
۳-۲ خصوصیات مکانیکی و هندسی لوله‌ی و سیال ..... ۳٦
۳-۳ مختصه تعمیم‌یافته و توابع پایه‌ی برای حل معادلات ..... ۳۷
*۳-۳-۱ توابع پایه برای جابجایی عرضی و حرکت درون صفحه ای ..... ۳۷*
۳-۴ معادلات خطی و ماتریسهای سیستم ..... ۳۹
۳-۵ بررسی ناپایداری های دینامیکی لوله حامل سیال ..... ٤۱
۳-۶ اعتبارسنجی و بررسی صحت نتایج کار حاضر ..... ٤۱
۳-۷ انواع انشقاق ها و اثر آن بر رفتار سیستم ..... ٤۲
۳-۸ فلاتر در سیستمهای سازه سیال ..... ٤٦
۳-۹ بررسی ناپایداری دینامیکی لوله حامل سیال ..... ٤۷
*۳-۹-۱ بررسی ناپایداری لوله یکسرگیردار حامل سیال ..... ٤۹*
*۳-۹-۲ بررسی ناپایداری لوله حامل سیال با شرط مرزی پین-پین ..... ۵۳*
*۳-۹-۳ بررسی ناپایداری لوله حامل سیال با شرط مرزی گیردار-گیردار ..... ۵۹*
۳-۱۰ اثر تغییر پارامترها بر کیفیت رفتار سیستم ..... ٦٤
*۳-۱۰-۱ بررسی تغییر پارامتر جرمی $\boldsymbol{\beta}$ بر رفتار سیستم ..... ٦۵*
*۳-۱۰-۲ اثر تغییر سرعت دوران $\boldsymbol{\Omega}$ بر سیستم ..... ٦۹*
۳-۱۱ مدلسازی لوله حامل سیال، یک بعدی و دوران حول محور عمود بر لوله ..... ۷۰
*۳-۱۱-۱ بررسی نتایج خطی برای لوله با دوران حول محور عمود بر لوله ..... ۷٤*
*۳-۱۱-۲ بررسی ناپایداری حالت یک بعدی ..... ۷۵*
۳-۱۲ تحلیل غیرخطی لوله حامل سیال ..... ۸۱
۳-۱۳ نتایج بدست آمده برای تحلیل غیرخطی ..... ۸۱
*۳-۱۳-۱ اثر سرعت سیال $\boldsymbol{U}$ ، بر جابجایی عرضی و سیکل حدی لوله یکسرگیردار حامل سیال ..... ۸۱*

۳-۱۳-۲ *تاثیر $\beta$ بر جابجایی عرضی و سیکل حدی* ..... ۹۲
۳-۱۳-۳ *تاثیر $sp$ بر جابجایی عرضی و سیکل حدی* ..... ۹٤
۳-۱۳-۴ *اثر تغییرات سرعت دوران $\Omega$ بر کیفیت رفتار سیستم لوله یکسرگیردار* ..... ۹۸
۳-۱۴ بررسی رفتار غیرخطی نمونه یک بعدی، با دوران حول محور عمود بر محور لوله ..... ۹۹
۳-۱۵ خلاصه بحث و نتیجه‌گیری فصل چهارم ..... ۱۰۳
**فصل ۴: نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۴**
۴-۱ نتیجه گیری ..... ۱۰٤
۴-۲ پیشنهادات ..... ۱۰۵

# فهرست شکل‌ها


شکل ۲-۱: آونگ با دو میله بدون جرم سفت به طول $l1$ و $l2$ و جرم های متمرکز $M1$ و$M2$ ب) یک سیستم لوله سه درجه آزادی حامل سیال، با میله های سفت و سخت با جرم در واحد طول $m$ و طول $l$ و فنر پیچشی به سختی $k$ و مختصات تعمیم یافته $\theta it, i = 1,2,3$ ج) یک لوله بینهایت درجه آزادی. ۱۱

شکل ۲-۲: شماتیکی از لوله حامل سیال الف) قبل از تغییر شکل ب) پس از تغییر شکل [26] ۱۴

شکل ۳-۱ :مُدهای خمشی تیر: الف) تکیه‌گاه پین-پین، ب) تکیه‌گاه گیردار-آزاد، ج) گیردار -گیردار ۳۹

شکل ۳-۲:انشقاق پیچفرک در مقادیر ویژه سیستم الف) اثر آن بر قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم)، ب) اثر آن بر قسمت حقیقی ۴۳

شکل ۳-۳: انشقاق همیلتونین-هاپف در مقادیر ویژه سیستم الف)اثر آن بر قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم)، ب)اثر آن بر قسمت حقیقی ۴۴

شکل ۳-۴:انشقاق هاپف تک مُدی در مقادیر ویژه سیستم الف)اثر آن بر قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم)، ب)اثر آن بر قسمت حقیقی ۴۵

شکل ۳-۵: نمونه ای از پدیده فلاتر در سیستم سازه-سیال ۴۷

شکل ۳-۶: اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد و $\beta = 0.145$ الف) قسمت موهومی (فرکانس های سیستم)، ب)اثر آن قسمت حقیقی ۵۱

شکل ۳-۷: اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد و $\beta = 0.145$ ۵۳

شکل ۳-۸:اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه پین– پین و $\beta = 0.145$ الف) قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم)، ب)اثر آن قسمت حقیقی ۵۷

شکل ۳-۹:اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه پین – پین و $\beta = 0.145$ ۵۹

شکل ۳-۱۰:اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار– گیردار و $\beta = 0.145$ الف) قسمت موهومی (فرکانس های سیستم)، ب)اثر آن قسمت حقیقی ۶۲

شکل ۳-۱۱:اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار– گیردار و $\beta = 0.145$ ۶۴

شکل ۳-۱۲: مقایسه چهار مد اول لوله حامل سیال به ازای دو مقدار مختلف $\beta$ الف) قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم) تکیه‌گاه گیردار– آزاد ب) قسمت حقیقی تکیه‌گاه گیردار– آزاد ۶۵

شکل ۳-۱۳: مقایسه چهار مد اول لوله حامل سیال به ازای دو مقدار مختلف $\beta$ الف) قسمت‌های حقیقی و موهومی برای تکیه‌گاه گیردار– آزاد و $\beta = 0.2$ ب) قسمت‌های حقیقی و موهومی برای تکیه‌گاه گیردار– آزاد و $\beta = 0.4$ ۶۶

شکل ۳-۱۴:مقایسه ۲ مد اول لوله حامل سیال به ازای دو مقدار مختلف $\beta$ الف) قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم) تکیه‌گاه پین– پین ب) قسمت حقیقی تکیه‌گاه پین– پین ۶۷

شکل ۳-۱۵: مقایسه ۲ مد اول لوله حامل سیال به ازای دو مقدار مختلف $\beta$ الف) قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم) تکیه‌گاه گیردار– گیردار ب) قسمت حقیقی تکیه‌گاه گیردار– گیردار ۶۸

شکل ۳-۱۶: اثر سرعت سیال عبوری بر چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد در حالت یک بعدی و $\boldsymbol{\beta = 0.145}$ الف) قسمت موهومی (فرکانس‌های سیستم)، ب)اثر آن قسمت حقیقی ..... ۷۵
شکل ۳-۱۷: اثر سرعت سیال عبوری بر بخش حقیقی چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد در حالت یک بعدی ۴ پارامتر $\boldsymbol{\beta}$ الف) $\boldsymbol{\beta = 0.3}$، ب) $\boldsymbol{\beta = 0.4}$، ج) $\boldsymbol{\beta = 0.5}$، د) $\boldsymbol{\beta = 0.6}$ ..... ۷۷
شکل ۳-۱۸: اثر سرعت سیال عبوری بر بخش حقیقی و موهومی چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد در حالت یک بعدی ۴ پارامتر $\boldsymbol{\beta}$ الف) $\boldsymbol{\beta = 0.3}$، ب) $\boldsymbol{\beta = 0.4}$، ج) $\boldsymbol{\beta = 0.5}$، د) $\boldsymbol{\beta = 0.6}$ ..... ۷۸
شکل ۳-۱۹: اثر سرعت سیال عبوری بر بخش حقیقی چهار مد اول با تکیه‌گاه گیردار – آزاد در حالت یک بعدی ۲ پارامتر $\boldsymbol{\alpha}$ الف) بخش موهومی مقادیر ویژه(فرکانس سیستم) برای $\boldsymbol{\alpha = 5}$ ب) بخش حقیقی مقادیر ویژه برای $\boldsymbol{\alpha = 5}$ ج) بخش موهومی مقادیر ویژه(فرکانس سیستم) برای $\boldsymbol{\alpha = 10}$ د) ) بخش حقیقی مقادیر ویژه برای $\boldsymbol{\alpha = 10}$ ..... ۸۰
شکل ۳-۲۰ : جابجایی عرضی $\boldsymbol{w}$ بی بعد انتهای لوله الف)در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 5}$، ب) در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6}$ ..... ۸۲
شکل ۳-۲۱: نمودار صفحه فاز برای نقطه انتهای لوله، الف)در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 5}$، ب) در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6}$ ..... ۸۳
شکل ۳-۲۲:الف)لوله پس از تغییر شکل در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6.5}$، ب) پاسخ زمانی سیستم مربوط به انتهای لوله در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6.5}$ ..... ۸۴
شکل ۳-۲۳:الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6.5}$، ب) جابجایی W نسبت به V مربوط به انتهای لوله در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6.5}$ ..... ۸۴
شکل ۳-۲۴: جابجایی عرضی بی بعد انتهای لوله برای سرعتهای بی بعد ۷ و ۱۰ ..... ۸۵
شکل ۳-۲۵: الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 7}$، ب) نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 10}$ ..... ۸۶
شکل ۳-۲۶: جابجایی عرضی بی بعد انتهای لوله برای سرعتهای بی بعد ۹ و ۱۱ ..... ۸۶
شکل ۳-۲۷: الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 9}$، ب) نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 11}$ ..... ۸۷
شکل ۳-۲۸:الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 12}$ ..... ۸۸
شکل ۳-۲۹:الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 13}$ ..... ۸۸
شکل ۳-۳۰:الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 14}$ ..... ۸۸
شکل ۳-۳۱:الف)نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 15}$ ..... ۸۸
شکل ۳-۳۲:جابجایی عرضی بی بعد W و V در نقطه انتهای لوله برای سرعت بی بعد ۱۲ ..... ۸۹
شکل ۳-۳۳:جابجایی عرضی بی بعد W و V در نقطه انتهای لوله برای سرعت بی بعد ۱۳ ..... ۸۹
شکل ۳-۳۴:جابجایی عرضی بی بعد W و V در نقطه انتهای لوله برای سرعت بی بعد ۱۴ ..... ۸۹
شکل ۳-۳۵:جابجایی عرضی بی بعد W و V در نقطه انتهای لوله برای سرعت بی بعد ۱۵ ..... ۹۰
شکل ۳-۳۶: پدیده انقطاع در پاسخ سیستم در ازای سرعت بیبعد ۱۵ ..... ۹۰
شکل ۳-۳۷:نمودار دوشاخه شدگی با انتخاب سرعت جریان سیال $\boldsymbol{U}$، به عنوان پارامتر کنترل ..... ۹۱
شکل ۳-۳۸:پاسخ سیستم لوله یکسرگیردار در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 15}$ و $\boldsymbol{sp = 50}$ الف) نمودار صفحه- فاز W ، ب) نمودار صفحه- فاز V ..... ۹۷
شکل ۳-۳۹:پاسخ سیستم در نقطه انتهای لوله یکسرگیردار برای سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 15}$ و $\boldsymbol{sp = 50}$ ..... ۹۸
شکل ۳-۴۰:تغییر شکل لوله در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 15}$ و $\boldsymbol{sp = 50}$ الف) جابجایی عرضی W در طول لوله، ب) جابجایی عرضی V در طول لوله ..... ۹۸

شکل ۳-۴۱: پاسخ سیستم برای جابجایی عرضی در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 5}$ ..... ۱۰۰
شکل ۳-۴۲: نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 6.5}$ ..... ۱۰۰
شکل ۳-۴۳: نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 7}$ ..... ۱۰۱
شکل ۳-۴۴: نمودار صفحه- فاز، در سرعت بی بعد $\boldsymbol{U = 8.5}$ ..... ۱۰۱
شکل ۳-۴۵: نمودار دوشاخه شدگی جابجایی عرضی به ازای سرعت بی بعد جریان سیال ..... ۱۰۲
شکل ۳-۴۶: پاسخ سیستم برای جابجایی عرضی در سرعت سیال بی بعد $\boldsymbol{U = 5}$ و سرعتهای دوران بی بعد $\boldsymbol{\alpha = 0, 10, 20}$ ..... ۱۰۲
شکل ۳-۴۷: نمودار دوشاخه شدگی جابجایی عرضی به ازای سرعت بی بعد جریان سیال و سرعت دوران ۶ ..... ۱۰۳
شکل ۳-۴۸: نمودار دوشاخه شدگی جابجایی عرضی به ازای سرعت بی بعد جریان سیال و سرعت دوران ۱۲ ..... ۱۰۳

# فهرست جدول‌ها


جدول ۳-۱: خصوصیات هندسی و مکانیکی لوله وسیال ..... ۳۷

جدول ۳-۲:مقایسه سرعت ناپایداری ($\mathbf{uc}$) لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه گیردار-آزاد ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت، با مقادیر مشابه در مرجع[1] و [43] ..... ۴۲

جدول ۳-۳:مقایسه سرعت ناپایداری ($\mathbf{uc}$) لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه گیردار-آزاد ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت، برای ۳ مقدار سرعت دورانی ..... ۶۹

جدول ۳-۴:مقایسه سرعت ناپایداری ($\mathbf{uc}$) لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه پین-پین ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت، برای ۳ مقدار سرعت دورانی ..... ۶۹

جدول ۳-۵:مقایسه سرعت ناپایداری ($\mathbf{uc}$) لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه گیردار-گیردار ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت، برای ۳ مقدار سرعت دورانی ..... ۷۰

جدول ۳-۶: مقایسه سرعت ناپایداری ($\boldsymbol{uc}$) لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه گیردار-آزاد ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت، با مقادیر مشابه در مرجع[1] و [43] ..... ۷۴

جدول ۳-۷: مقایسه مدهای ناپایدار لوله‌ی حامل سیال با تکیه‌گاه گیردار-آزاد ، در $\boldsymbol{\beta}$ های متفاوت ..... ۷۹

جدول ۳-۸: دامنه سیکل حدی و نوع رفتار لوله یکسرگیردار حامل سیال برای جابجایی عرضی v برای ۴ مقدار از پارامتر جرم، $\beta$ ..... ۹۲

جدول ۳-۹: دامنه سیکل حدی و نوع رفتار لوله یکسرگیردار حامل سیال برای جابجایی عرضی w برای ۴ مقدار از پارامتر جرم، $\boldsymbol{\beta}$ ..... ۹۳

جدول ۳-۱۰: دامنه سیکل حدی و نوع رفتار لوله یکسرگیردار حامل سیال برای جابجایی عرضی v برای ۴ مقدار از پارامتر جرم، $\mathbf{sp}$ ..... ۹۵

جدول ۳-۱۱: دامنه سیکل حدی و نوع رفتار لوله یکسرگیردار حامل سیال برای جابجایی عرضی w برای ۴ مقدار از پارامتر جرم، $\mathbf{sp}$ ..... ۹۵

جدول ۳-۱۲: دامنه سیکل حدی و نوع رفتار لوله یکسرگیردار حامل سیال برای جابجایی عرضی w برای ۴ مقدار از سرعت دورانی بی بعد $\boldsymbol{\alpha}$ ، $\boldsymbol{\beta = 0.145}$ ..... ۹۹

# فصل ۱: مقدمه و مرور کارهای انجام شده

## ۱-۱ مقدمه

در این فصل مباحث مربوط به لوله حامل سیال ، به طور مختصر شرح داده شده است. اهمیت این دسته از مواد، کاربرد و لزوم مدل‌سازی مکانیکی آن‌ها ذکر گردید. همچنین مختصری به لوله‌های حامل سیال، کاربردهای آن و تحلیل ناپایداری آن‌ها اختصاص داده شده است. در ادامه مروری اجمالی بر کارهای انجام‌شده در زمینه‌های ارتعاشات، ناپایداری، آشوب و سیکل حدی ارائه می‌گردد. در انتها نیز به فرضیات حاکم بر مسئله و اهداف این پایان‌نامه پرداخته می‌شود.

## ۱-۲ کاربرد لوله حامل سیال

با گسترش تحقیقات و تکنولوژی‌های نوین، شناخت و به‌کارگیری لوله‌های حامل سیال در صنایع، روزبه‌روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. در این راستا تحقیقات صنعتی و دانشگاهی، توجه خاصی به شناخت رفتار این سیستم ها دارند. در تأسیسات نفت و گاز، چه در ساحل و یا خارج از ساحل، لوله‌ها معمولاً برای انتقال سیال و نفت خام و دیگر محصولات استفاده می‌شود. همچنین لوله ها برای انتقال سیال-های مایع و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر صورت، لوله‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی مختلفی از قبیل، نوسانات درجه حرارت داخلی و خارجی، زلزله، حرکت زمین و حرکت جریان سیال قرار می‌گیرند.

ارتعاشات لوله‌ها تأثیر بسزایی در رفتار پروژه‌های کاربردی دارد، از قبیل، خرابی ماشین‌آلات، نشت، شکست خستگی، سر و صدا بالا، آتش‌سوزی، و انفجار در پالایشگاه و پتروشیمی[1] .

## ۱-۳ اهمیت مدل‌سازی و مرور پژوهش‌های انجام گرفته

در این بخش به مرور مختصر بر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه اهمیت مدل‌سازی مکانیکی لوله‌های حامل سیال و دوار، تحلیل ارتعاشات آن‌ها، انواع ناپایداری‌ها، و بررسی رفتار غیرخطی لوله حامل سیال پرداخته می‌شود تا زمینه لازم برای ارائه کارهای صورت پذیرفته در فصول بعدی مهیا شود.

### ۱-۳-۱ اهمیت مدسازی مکانیکی لوله‌های حامل سیال

در بسیاری از کاربردهای مهندسی، ارتعاشات سازه ناشی از جریان ممکن است به وجود آید که ممکن است موجب بروز مشکلات در سازه گردد. خصوصاً در لوله حامل سیال، در لحظه اولیه (استارت موتور و شروع جریان سیال ) و لحضه پایان کار( خاموشی و قطع جریان سیال ) جریانی در لوله ایجاد شده که موجب بروز تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر خواهد شد. این تغییر شکل ها می تواند به صورت کمانش بر لوله اثر کرده و موجب تخریب سیستم کردد. بررسی رفتار مکانیکی لوله‌های حامل سیال برای تعیین مشخصه رفتاری آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای به دست آوردن مشخصه‌های مکانیکی سیستم بسیار دشوار و پرهزینه است؛ لذا کارهای زیادی با استفاده از شبیه‌سازی و مدل‌های تئوری در این زمینه انجام گرفته است. اگرچه کارهای آزمایشگاهی هم در بعضی پروژه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است[2] .

اکثر مدل‌سازی‌های تئوری برای سیستم‌های حامل سیال با در نظر گرفتن میدان جابجایی کوچک ( کرنش خطی ) صورت گرفته است. درصورتیکه جابجایی لوله حامل سیال از نوع جابجایی بزرگ[۳] می‌باشد، معقول تر می‌باشد که از میدان جابجایی بزرگ و غیرخطی برای مدل‌سازی رفتار آن استفاده شود.

[3] large deflection

### ۱-۳-۲ ناپایداری لوله های حامل سیال

لوله‌های حامل سیال، به دلیل برهمکنش مابین سیال و لوله در معرض ناپایداری قرار دارند. لوله دارای سفتی سازه‌ای بوده و در صورت حرکت دینامیک (حرکتی توأم با سرعت و یا شتاب) دارای انرژی جنبشی (اینرسی) می‌باشد. سیال عبور کننده در داخل لوله اگر دارای جریانی با سرعت ثابت باشد و در صورتی که لوله حمل‌کننده آن حرکت دینامیک داشته باشد، سیال نیروهایی هیدرواستاتیک، ژیروسکوپی و اینرسی بر لوله وارد می‌کند و در صورتی لوله حرکت استاتیک (حرکتی که به اندازه کافی آرام صورت پذیرد) داشته باشد، سیال فقط نیروی هیدرواستاتیک بر سیستم وارد می‌کند[3] . در بررسی پایداری خطی لوله حامل سیال، رفتار سیستم اساسا در تعامل اینرسی، الاستیک، گریز از مرکز، و نیروهای کوریولیس است [4]. هر دو نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس از جریان سیال بوجود می آیند، در حالی که اینرسی کل سیستم ترکیبی  از اینرسی سیال و لوله است. ناپایداری لوله انتقال سیال عمدتا به دلیل کاهش در سختی موثر لوله با سرعت جریان است [5].

فرکانس طبیعی لوله حامل سیال به سرعت عبور جرین وابسطه می‌باشد. در این خصوص مطالعه وابستگی فرکانس طبیعی، به سرعت سیال در لوله های حامل سیال آلومینیومی به صورت تجربی توسط لیو و ریزه اندازه گیری شد. این بررسی برای طیف گسترده‌ای از سرعت سیال و شرایط مرزی گیردار-آزاد، پین-پین و گیردار –گیردار انجام شد [6]. فرکانس طبیعی یک لوله پین-پین با استفاده از روش موج توسط سینگ و مالک مشخص شد. مطالعه آنها شامل انتشار امواج هارمونیک آزاد در یک لوله بود [7]. چن بررسی تحلیلی از ارتعاشات عرضی لوله های پیوسته انتقال سیال معرفی نمود. در این کار ارتعاشات آزاد و اجباری لوله‌های مختلف با توجه به اثرات پارامترهای مختلف در فرکانس های طبیعی بررسی شد [8]. ارتعاشات آزاد پوسته های استوانه ای دایره ای شکل محدود و لوله های با و بدون عبور سیال اطراف آن توسط وپلینک مورد مطالعه قرار گرفت [9]. ایوانف یک روش برای یکپارچه سازی معادله حرکت نوسانات اجباری لوله های انعطاف پذیر حامل سیال مطرح کرد. نتایج حاصل از ادغام معادلات، در مقادیر مختلف فرکانس اجباری، برای ساخت دامنه فرکانس مشخصه از نوسانات از لوله مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد که، برای

مورد لوله محدود و مستقیم، فرکانس نوسان طبیعی در اثر افزایش سرعت جریان سیال، کاهش می یابد [10]. هولمز نشان داد، برای لوله‌های پین-پین و گیردار-گیردار بسته به سرعت جریان سیال ممکن است کمانش یا فلاتر رخ دهد. همچنین، فرکانس طبیعی لوله یکسرگیردار دارای قسمت‌های حقیقی و موهومی است. ناپایداری لوله به شکل کمانش برای مقادیر مثبت از قسمت حقیقی رخ می دهد [11]، [12] و [13]. چن به بررسی تجربی و تحلیلی و مطالعه ویژگی‌های انواع مختلف ناپایداری لوله حامل سیال پرداخت، و کنترل ناپایداری برای دو نوع متفاوت از شرایط مرزی از لوله های حامل سیال را انجام داد [14].

در لوله‌های حامل سیال، در حالتی که لوله در هر دو انتهای آن مقید باشد، مانند شرایط مرزی ( گیردار-گیردار، گیردار- لولا، لولا- لولا ) سیستم پایستار ژیروسکوپی است، و نیروهای ناپایستار قادر به اعمال کار بر روی این سیستم نیستند. در این سیستم‌ها ناپایداری از نوع واگرایی (کمانش) رخ خواهد داد. در حالت پایستار، اولین واگرایی که در مُد اول رخ می‌دهد، با یک انشقاق از نوع پیچفورک[۴] در قسمت حقیقی مقادیر ویژه سیستم همراه است. ناپایداری‌های مربوط به مُدهای بعدی، می‌تواند به صورت فلاتر یا فلاتر کوپل شده باشد که با یک انشقاق همیلتونین-هاپف[۵] در مقادیر ویژه سیستم همراه است که در اثر به هم آمیختن پایداری مجدد در مُد ناپایدار قبلی با ایجاد واگرایی در مُد جدید ایجاد شده است. لوله‌های حامل سیال که یک سر آزاد دارند، کار نیروهای ناپایستار در سیستم وجود دارد. در این سیستم‌ها ناپایداری از نوع فلاتر رخ خواهد داد که با یک انشقاق از نوع هاپف تک مُد در مقادیر ویژه سیستم همراه است. در ادامه مروری بر مطالعات صورت پذیرفته در زمینه تحلیل رفتار غیرخطی لوله‌های حامل سیال خواهد شد.

### ۱-۳-۳ بررسی رفتارهای غیرخطی لوله های حامل سیال

مدل های خطی قادر هستند، پایداری سیستم را در نزدیکی سرعت بحرانی که انشقاق در آن رخ می-دهد توصیف کنند [15]. بنابراین به منظور بررسی کامل‌تر و جامع تر سیستم‌های لوله حامل سیال نیاز به

[4] pitchfork

[5] Hamiltonian Hopf

مدلسازی و بررسی رفتار غیرخطی احساس شد. در طول دو دهه های گذشته، دانشمندان و ریاضیدانان ابزارهای جدیدی را به ویژه در زمینه پایداری غیر خطی مطرح نموده اند. از موارد مورد توجه مهندسین، بررسی رفتار، در حوزه سازه- سیال است، که در آن رفتار سیستم اغلب پیچیده و دشوار می‌باشد [16]و [17]. پژوهشگران از مطالعات دقیق تحلیلی و آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی سیستم‌های لوله حامل سیال، آن‌ها را سیستم‌های ذاتاً غیرخطی توصیف می‌کنند. این سیستم‌های غیرخطی منجر به پدیده‌هایی می‌شوند که نمی‌توان آن‌ها را با روابط خطی توصیف نمود. از این پدیده‌ها می‌توان به فلاتر، واگرایی، سیکل‌حدی، پریود دوبل اشاره نمود. در برخی از موارد حضور رفتارهای آشوبناک در این ساختارها نیز گزارش شده است.

مدلی از یک لوله یکسرگیردار حامل سیال می تواند به عنوان الگویی مناسب جهت بررسی رفتارهای متقابل سازه سیال باشد. واگرایی و فلاتر شایع‌ترین نوع بی‌ثباتی فیزیکی این نوع سیستم ها می‌باشد. دو عامل اصلی که رفتار دینامیکی لوله حامل سیال مورد توجه قرار گرفته است(۱۹۸۰ -۱۹۹۰ ) (۱) رفتار دینامیکی جالب و گاهی اوغات پیچیده آن و (۲) ابزاری برای روش های آزمایشی می تواند باشد.

بوریز (۱۹۳۹) اولین مطالعات را درخصوص پایداری لوله انعطاف پذیر حامل سیال انجام داد. وی برای اولین بار معادلات غیرخطی حالت مسطح را استخراج کرد. او از روش تعادل نیروی، روابط کامل و دقیق غیر خطی را با بیان انحنا استخراج نمود. "متاسفانه"، سپس اقدام به ساده کردن سیستم های خطی و به دست آوردن تحلیلی برخی از نتایج پرداخت، بدون اینکه هرگونه تجزیه و تحلیل غیرخطی از سیستم انجام دهد. اگرچه او سرعت بحرانی را پیدا کرد و بسیاری از ویژگی‌های سیستم را بیان کرد. پس از آن مطالعاتی بیشتر در خصوص لوله انعطاف پذیر، توسط هوزنر در سال ۱۹۵۲[18] ، نیوردسن در سال ۱۹۵۳ و بنجامین در سال ۱۹۶۱ انجام شد [19] و [20].

ادبیات اصلی این مباحث با مطالعات و تلاش های افرادی چون پویدوسیوس و گرگوری در سال های ۱۹۶۶ [21] و [22]، پویدوسیوس در سال ۱۹۷۰ و پویدوسیوس و ایسد در سال ۱۹۷۴ برای جریان با ضربان

مطرح گردید. هوزنر نشان داد که برای لوله دو سر ثابت، عامل ناپایدار کننده گریز از مرکز به صورت بار محوری فشاری عمل می‌کند، که ممکن است در سرعت جریان به اندازه کافی بزرگ موجب بازگرداندن نیروی خمشی بزرگ گردیده، و منجر به واگرایی گردد. پویدوسیوس و همکاران وی ثابت کردند که برای سرعت بیشترِ جریانِ سیال، ممکن است فلاتر همراه با واگرایی رخ دهد. به منظور استخراج معادلات این سیستم ها، تلاش های دیگری را ستنا با رویکردی متفاوت دنبال کرد. همچنین لاندگرن، ستنا و باجج [23] در سال ۱۹۷۹ مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسل انتگرالی را استخراج کردند که به نظر می‌رسید کاملاً درست است. اما بدون در نظر گرفتن جابجایی بزرگ مدل شده بود و پاسخگوی خوبی برای این سیستم ها نبود.

تحقیقات بعدی که در خصوص دینامیک سیستم لوله حامل سیال انجام شد توسط ریسلت و هرمن در سال های ۱۹۷۷ و ۱۹۸۱ مطرح شد. آنها معادلات سیستم را به دو روش تعادل نیرو و تعادل انرژی به طور دقیق محاسبه کردند. تنها نماد متفاوت در این کار معرفی زاویه $\theta$ که موجب شد ظاهر کار کمی متفاوت باشد. پس از آن در سال ۱۹۸۷، بررسی‌های مهمی توسط پویدوسیوس درخصوص معادلات خطی انجام شد و نتایج زیادی درخصوص پایداری سیستم ارائه شد.

کامل ترین و به روز ترین مطالعات در خصوص رفتار غیرخطی لوله حامل سیال را پویدوسیوس و همکارانش در دانشگاه مگ‌گیل کانادا در سال ۲۰۰۷ مطرح کردند. آنها مدلسازی ۳ بُعدی یک لوله یکسرگیردار را انجام داده و پارامترهای بحرانی و رفتارهای غیرخطی را مشاهده کردند. از طرفی این بررسی ها در محیط آزمایشگاهی سنجیده شده و مطابقت خوبی را نشان داد [24] و [25]. در ادامه این کارها، تا سال ۲۰۱۱ نتایج بیشتری از معادلات مطرح شده در مرجع [26] و [25] استخراج شد و با اعمال تغییراتی در سیستم نتایجی از قبیل سیکل حدی و آشوب مشاهده شد [27]. امروزه به خوبی میدانیم که لوله یکسرگیردار حامل سیال، سیستمی غیرپایستار بوده و پایداری خود را به صورت فلاتر از دست میدهد و انشقاق هاپف در آن صورت می‌پذیرد. از لحاظ فیزیکی، این بی ثباتی زمانی رخ میدهد که انرژی استخراج

شده لوله در اثر جریان از انرژی توسط لوله از طریق نیروی کوریولیس (نیروی وابسته به سرعت لوله، به طور موثر مانند میرایی عمل میکند) از دست داده مهم تر می شود.

## ۱-۴ تکنیک‌های حل معادلات

معادلات مطرح شده توسط پژوهشگران با تکنیک های مختلفی حل شد. این روشهای حل که شامل حل های تحلیلی، المان محدود مطرح شد. پایداری دینامیکی لوله های یکسرگیردارحامل سیال توسط روش های مختلف عددی مانند روش المان محدود و الگوریتم عنصر طیفی مورد مطالعه قرار گرفته است. به عنوان نمونه، لانگ‌جم حل اجزاء محدود لوله یکسرگیردار حامل سیال را مطرح کرد [28]. او نشان داد، هنگامی که جریان سیال با نرخ بیش از مقدار بحرانی اعمال گردد، پایداری سازه از طریق یک انشقاق هاپف از دست می‌رود. همچنین وی بهینه سازی طراحی برای افزایش سرعت بحرانی انجام داد. کوی و تانی [29] و هانگو و جنجی [30] بهینه سازی معادله حاکم برای لوله های حامل سیال با تاثیر اختلاف فشار در داخل و اطراف لوله و شرایط مرزی سیال و لوله را مطرح کردند. با بکارگیری معادلات جدید نتیجه به پاسخ‌های تجربی نزدیکتر شد. سرعت بحرانی به دست آمده از نظریه های جدید برای لوله یکسرگیردارحامل سیال، بالاتر از نظریه های قبلی محاسه گردید.

لی و چانگ مدل غیر خطی از یک لوله با شرایط مرزی گیردار، گیردار حامل سیال با استفاده از تئوری تیر اویلر برنولی و تئوری کرنش غیر خطی را توسعه دادند. معادلات حرکت گسسته و خطی در همسایگی موقعیت تعادل تعیین شده و فرکانس های طبیعی مشخص گردید [31]. یانگ و جین برآوردی از فرکانس طبیعی یک لوله حامل سیال با استفاده از روش گالرکین انجام داده و فرکانس طبیعی های پایین را محاسبه کردند [32].

## ۱-۵ بررسی اثر دوران بر لوله حامل سیال

تا کنون اثر دوران بر لوله حامل سیال پرداخته نشده است. بلکه سرعت دوران به تنهایی مدلسازی و بررسی شده است، و در منابع اندکی به مدلسازی تیر چرخان پرداخته شده است [33]، [34] و [35]. اما

آنچه که مهم می‌باشد، اینست که دوران موجب تغییر رفتار خطی و غیرخطی سیستم خواهد شد. از طرفی با توجه به نوع دوران (که به چه شکلی به سازه اعمال گردد)، نوع انشقاق ها و سرعت بحرانی تغییر خواهد کرد.

## ۱-۶ اهداف و مسائل مورد بررسی پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، به مدلسازی و بررسی رفتار خطی و غیرخطی یک سیستم لوله حامل سیال با در نظر گرفتن دوران لوله پرداخته شده است. برای مدل‌سازی لوله از روش جدیدی استفاده شده، بدین صورت که در مدلسازی، ارتعاشات درون‌صفحه‌ای و ارتعاش عرضیِ خمشی دوطرفه مدنظر قرار گرفته‌اند. بدین منظور، توابع جابجایی در ۳ بعد مطرح شده و از میدان‌های کرنش – جابجایی غیرخطی استفاده شده است. معادلات استخراج شده با فرضیات زیر مطرح گردیده است.

### ۱-۶-۱ فرضیات حاکم بر مسئله

فرضیات حاکم بر مسئله به صورت زیر می‌باشد:

- سیال عبوری از لوله تراکم ناپذیر می باشد، اما غیرلزج نیست.
- سرعت سیال ثابت بوده و جدا از هرگونه اغتشاش می باشد.
- فشار در لوله کوچک فرض می‌شود، اگرچه تغییر شکل ممکن است بزرگ باشد.
- ارتعاش دوخمش درنظر گرفته شده است.
- لوله نازک بوده و نیروی سیال به صورت فیزیکی مدل می شود. بنابراین به بررسی مدل سازی سیال داخل لوله پرداخته نمی شود.

### ۱-۶-۲ اهداف پایان‌نامه

اهداف و مسایل مورد بررسی در این پایان‌نامه به صورت زیر می‌باشند: