بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل ارتعاشات غیر خطی لوله ترک‌دار با ترک باز و بسته شونده به روش اغتشاشی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

مجید طالبیان

استاد راهنما

دکتر مصطفی غیور

۱۳۹۳

کلیه‌ی حقوق مادی مرتبت بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم .

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان. . . .

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

این مجموعه را به **پدر و مادر** عزیزم تقدیم می کنم.

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی آقای مجید طالبیان

تحت عنوان

تحلیل ارتعاشات غیر خطی لوله ترک‌دار با ترک باز و بسته شونده به روش اغتشاشی

در تاریخ **۹۳/۹/۲۹** توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مصطفی غیور
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر حسن نحوی
۳- استاد داور	دکتر محمد مشایخی
۴- استاد داور	دکتر رضا تیکنی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

بدین وسیله از جناب آقای دکتر غیور استاد راهنمای این پایان نامه که در طی مراحل این تحقیق همواره از کمک ها و راهنمایی های دلسوزانه ایشان بهره مند شده ام کمال تشکر و قدردانی را می نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر حسن نحوی که زحمت مشاوره ی این تحقیق را به عهده داشته اند صمیمانه سپاس گزارم.

چکی‌ده

بررسی رفتار دی‌نامی‌کی خطوط لوله‌های طوی‌ل به علت کاربردهای گسترده‌ای که در نی‌روگاه‌ها، پالای‌شگاه‌ها، مجتمع‌های پتروشی‌می، سازه‌های دری‌ای‌ی و سکوهای نفتی دارند جای‌گاه وی‌ژه‌ای را به خود اختصاص داده است. ی‌کی از نقای‌ص معمول در سازه‌ها ترک است که می‌تواند تاثی‌ر خطرناکی بر رفتار سازه داشته باشد تا جای‌ی که ممکن است باعث تخری‌ب آن شود. بسیاری از محققین در تحقیقات خود بر روی ارتعاشات تیر ترک‌دار از مدل‌های ترک باز استفاده کرده‌اند. در این مدل‌ها فرض بر این است که ترک در هنگام ارتعاش تیر همواره باز می‌ماند. در نتیجه سختی سازه اگرچه در اثر حضور ترک کاهش می‌یابد اما در طول زمان ارتعاش ثابت مانده و تغییری نمی‌کند. در ای‌ن پای‌ان نامه رفتار ارتعاشات آزاد لوله ترک‌دار با ترک باز و بسته شونده با استفاده از روش اغتشاشی بررسی می‌شود. به همی‌ن منظور، در ابتدا ارتعاشات عرضی تی‌ر با سطح مقطع پر و توخالی با شرای‌ط مرزی مختلف و سپس لوله دو سر مفصل در مود اول خود به صورت سی‌ستم ی‌ک درجه آزادی با جرم، می‌رای‌ی و سختی معادل مدل‌سازی شده است. در این مدل، فرض می‌شود که در اثر باز و بسته شدن ترک، سختی معادل به صورت یک تابع هارمونیک زمانی بی‌ن مقادیر سختی معادل مربوط به حالت های کاملاً باز و کاملاً بسته ترک تغییر کند. ابتدا سختی مربوط به فنری که به جای ترک مدل شده است به صورت تحلی‌لی به‌دست آمده و با مقادی‌ر آزمای‌شگاهی مقای‌سه می‌شود. سپس معادلات با روش اغتشاشی روش لی‌ندستد- پوانکاره حل می‌شود و برای صحت سنجی نتای‌ج با روش عددی رانگ-کوتای مرتبه چهارم مقای‌سه می‌شود. همچنی‌ن اثرات عمق ترک و موقعی‌ت ترک بر فرکانس طبی‌عی و جابه‌جای‌ی لوله بررسی می‌شود. با بررسی نمودارها نتای‌ج بدی‌ن صورت بود که نسبت می‌رای‌ی را نمی‌توان ثابت گرفت و ای‌ن مقدار با افزای‌ش عمق ترک افزای‌ش پی‌دا می‌کند و موقعی‌ت ترک نی‌ز بر ای‌ن مقدار بی‌تاثی‌ر نی‌ست. ثابت شد که مدل ترک باز برای ترک، عمق ترک را به درستی نشان نمی‌دهد و عمق ترک را کمتر از مقدار واقعی پی‌ش بی‌نی می‌کند: در نتی‌جه مدل ترک باز نمی‌تواند مدل قابل اطمی‌نانی برای ترک در نظر گرفت. نتی‌جه دی‌گر حضور اجزای هارمونی‌ک در پاسخ سی‌ستم بود که با افزای‌ش نسبت می‌رای‌ی دامنه‌ی قله‌های‌ی که مربوط به اجزای هارمونی‌ک بود افزای‌ش پی‌دا می‌کرد ای‌ن دلی‌لی بر افزای‌ش آثار غی‌ر خطی در پاسخ سی‌ستم است.

کلمات کلی‌دی: لوله ترک‌دار، ترک باز و بسته شونده، روش اغتشاشات، فرکانس طبی‌عی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب .....هشت

چکی‌ده.....

۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ پی‌شگفتار ۲

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده.....۵

۱-۳ مروری بر کار حاضر ۹

۱-۴ ساختار فصل ها ۱۰

فصل دوم: استخراج و حل معادلات حاکم بر تی‌ر و لوله با ترک باز.....۱۱

۲-۱ مقدمه.....۱۱

۲-۱-۱ رفتار حاکم بر تی‌ر بر مبنای تئوری اوی‌لر- برنولی.....۱۳

۲-۲ مروری بر مفاهی‌م مکانی‌ک شکست.....۱۷

۲-۳ تعی‌ی‌ن معادلات تی‌ر با ترک باز ۲۰

۲-۳-۱ شرط مرزی دو سر مفصل.....۲۱

۲-۳-۲ شرط مرزی ی‌ک سر گی‌ردار.....۲۳

۲-۴ سختی فنر مدل شده.....۲٤

۲-۴-۱ سختی فنر مدل شده تی‌ر.....۲٤

۲-۴-۲ سختی فنر مدل شده لوله تو خالی ۲۵

۲-۴-۳ سختی فنر مدل شده تی‌ر تو خالی ۳۲

۲-۵ نتای‌ج ۳۳

۲-۵-۱ تی‌ر دو سر مفصل.....۳۳

۲-۵-۲ تی‌ر ی‌ک سر گی‌ردار.....۳۵

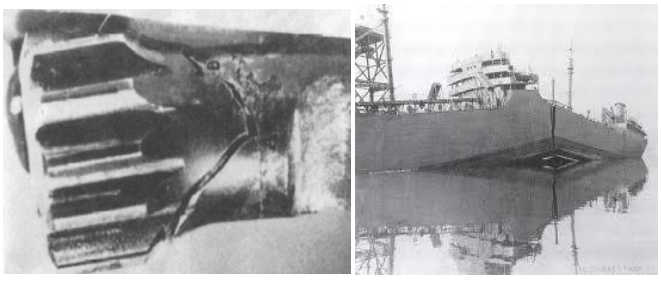
۲-۵-۳ لوله دو سر مفصل ۳۸
۲-۵-۴ تی‌ر تو خالی دو سر مفصل ٤٠
فصل سوم: استخراج و حل معادلات حاکم بر تی‌ر و لوله با ترک باز و بسته شونده ٤٤
۳-۱ مقدمه ٤٤
۳-۲ مدل ی‌ک درجه آزادی تی‌ر ی‌ک سر گی‌ردار ٤٥
۳-۳ حل معادلات به روش اغتشاشی ٤٧
۳-۳-۱ جملات سکولار ٤٨
۳-۳-۲ روش لی‌ندستد-پوانکاره ٤٨
۳-۳-۳ محاسبه k_o برای تی‌ر ی‌ک سر گی‌ردار ٥٦
۳-۳-۴ محاسبه k_o برای تی‌ر دو سر مفصل ٥٦
۳-۳-۵ محاسبه k_o برای لوله دو سر مفصل ٥٧
۳-۳-۶ محاسبه k_o برای تی‌ر با سطح مقطع مستطی‌ل تو خالی ٥٧
۳-۴ نتای‌ج ٥٧
۳-۴-۱ تی‌ر ی‌ک سر گی‌ردار ٥٨
۳-۴-۲ تی‌ر دو سر مفصل ٧٠
۳-۴-۳ لوله دو سر مفصل ٧٨
۳-۴-۴ تی‌ر با سطح مقطع مستطی‌ل تو خالی ٨٧
فصل چهارم: جمع بندی ٩٨
۴-۱ مقدمه ٩٨
۴-۲ استخراج و حل معادلات حاکم بر تی‌ر و لوله با ترک باز ٩٩
۴-۳ استخراج و حل معادلات حاکم بر تی‌ر و لوله با ترک باز و بسته شونده ٩٩
۴-۴ پی‌شنهادات برای تحقی‌قات آتی ١٠٠
مراجع ٩٩

فصل اول
مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

برخی از اجزا بکار رفته در سی‌ستم‌های گوناگون صنعتی و سازه‌های عمرانی، مستعد بروز ترک هستند. رشد پنهانی و ناخواسته ی‌ک ترک در ی‌ک سازه ی‌ا ماشی‌ن می‌تواند باعث بروز شکستگی زی‌ان‌بار همراه با خسارت زی‌اد و گاهی جبران ناپذی‌ر باشد. از ای‌ن رو ضروری است که رفتار ی‌ک سی‌ستم دارای ترک به خوبی مورد ارزی‌ابی و تحلی‌ل قرار گی‌رد تا در مواقع لزوم بتوان وجود ترک را در ی‌ک ساختار تشخی‌ص داد و به شی‌وه‌ی مناسبی با آن برخورد کرد تا از افزای‌ش غی‌ر کنترل شده‌ی خرابی‌ها جلوگی‌ری نمود.

همانطور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود عدم تشخی‌ص به موقع ترک باعث رشد و شکست سازه شده است.



شکل۱-۱ شکست سازه [۱]

زمانی که یک سازه دچار آسیب دیدگی می‌شود، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی آن به بارگذاری‌های مختلف به سبب تغییر در مشخصه‌های مکانیکی سازه دستخوش تغییر می‌گردد. علاوه بر این وجود ترک سبب افزایش تنش در اطراف ترک می‌گردد که این افزایش تنش در شرایط خاص می‌تواند منجر به رشد ترک گردد. مطالعه میدانهای تنش در اطراف ترک و بررسی مکانیزم رشد ترک از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده و علم مکانیک شکست محصول مستقیم چنین مطالعاتی است. از سوی دیگر وجود ترک سبب تغییر پاسخ دینامیکی سازه نیز می‌گردد. بسیاری از محققین به جای بررسی تنش در اطراف ترک و یا مکانیزم رشد ترک بر روی تغییراتی که وجود ترک در پاسخ دینامیکی یک سازه ایجاد می‌کند، تمرکز کرده‌اند. این رویکرد بیشتر برای عیب‌یابی و تشخیص وجود ترک از روی پاسخ دینامیکی سازه قابل استفاده است.

در مورد ماهیت ترک، تئوری‌ها و نظریات متفاوتی در مراجع مختلف مشاهده می‌شود. در برخی از این پژوهش‌ها، ترک به صورت شیار با عرض کم مدل می‌شود، حال آنکه برخی از محققان عقیده دارند که ماهیت شیار با ترک‌های ناشی از خستگی متفاوت بوده و دارای خواص متفاوتی است. اما در اغلب مطالعات مربوط به خواص دینامیکی سازه‌های ترک‌دار، ترک با شیار نازک معادل فرض شده و به جای آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شیار ممکن است U شکل و یا V شکل باشد.

مدل‌سازی ترک می‌تواند بصورت دو بعدی یا سه بعدی صورت پذیرد. در مدل‌سازی دو بعدی ترک، به خطوط مشخص کننده لبه‌های ترک، وجه ترک[1] و به محل تقاطع این دو خط، نوک ترک[2] گفته می‌شود. در مدل‌سازی سه بعدی، به سطوح مشخص کننده لبه‌های ترک، وجه ترک و به محل تقاطع این دو صفحه، جبهه ترک[3] گفته می‌شود. شکل ۱-۲ این مفاهیم را گرافیکی نشان می‌دهد.

شکل ۱-۲ تعاریف مقدماتی در مورد ترک[۱]

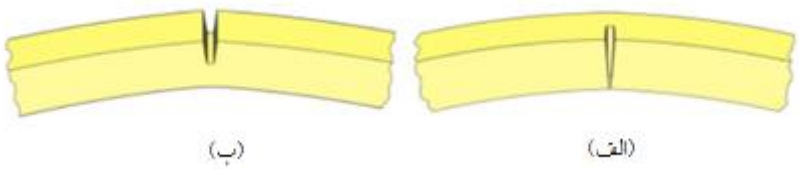
[1] Crack face
[2] Crack tip
[3] Crack front

موضوع قابل توجه دیگر در مورد رفتار دینامیکی سازه‌های ترک‌دار و نحوه‌ی مدل‌سازی ترک، مسئله بسته شدن دهانه ترک است. اگر یک ترک با عرض مناسب در یک سازه با دامنه‌ی ارتعاشات کم قرار داشته باشد به هنگام ارتعاشات، وجوه ترک هیچگاه به همدیگر برخورد نمی‌کنند. به چنین ترکی ترک کاملاً باز گفته می‌شود. اما اگر ترک خیلی باریک باشد یا دامنه ی حرکات ارتعاشی بزرگ باشد، ممکن است در برخی حرکات ارتعاشی وجوه ترک به هم برخورد کنند. اگر دو وجه یک ترک کاملاً بر روی یکدیگر قرار گیرند، در این حالت ترک را کاملا بسته گویند. شکل ۱-۳ یک ترک باز و یک ترک بسته را نشان می‌دهد. در یک ساختار ترک‌دار ممکن است ترک به گونه‌ای باشد که از حالت کاملاً باز[1] به حالت کاملاً بسته[2] تغییر کند و در مسیر این تغییر نه کاملاً باز و نه کاملاً بسته باشد. به چنین ترکی، ترک باز و بسته شونده[3] گفته می‌شود.

شکل ۱-۳ ترک کاملا باز و کاملا بسته[۱]

در برخی از مدل‌های ساخته شده از سازه‌های ترک‌دار فرض می شود که ترک کاملاً باز یا کاملاً بسته است. در برخی دیگر از مدل‌سازی‌های انجام شده، ترک به صورت باز و بسته شونده مدل می گردد. این شیوه‌ی مدل‌سازی منجر به ایجاد مدل‌های غیر خطی متغیر با زمان برای رفتار دینامیکی سازه ترک‌دار می گردد.

تعریف دیگری از ترک، تعریف ترک افقی و عمودی است(شکل ۱-۴). در یک تیر اگر جبهه ترک، موازی صفحه خنثی در خمش باشد، به آن ترک افقی و اگر جبهه ترک عمود بر صفحه خنثی باشد، به آن ترک عمودی گفته می‌شود.



شکل ۱-۴ الف: ترک عمودی ب: ترک افقی [۱]

[1] Open crack
[2] Close crack
[3] Breathing crack

بررسی رفتار دی‌نامی‌کی خطوط لوله‌های طوی‌ل به علت کاربردهای گسترده‌ای که در نی‌روگاه‌ها، پالای‌شگاه‌ها، مجتمع‌های پتروشی‌می، سازه‌های دری‌ای‌ی و سکوهای نفتی دارند جای‌گاه وی‌ژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند.

در شکل ۱-۵ نمونه از کاربردهای لوله در صنعت را می‌توان مشاهده کرد.

شکل۱-۵ کاربرد لوله‌ها در صنعت

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

دی‌ماراگوناس[1] خلاصه‌ای از اقدامات و تحقی‌قات انجام شده توسط سای‌ر محققی‌ن در زمی‌نه ارتعاش سازه‌های ترک‌دار را ارائه کرده است. بر اساس تحقی‌ق مزبور روش‌های مختلف مدل سازی سازه‌های ترک‌دار را می‌توان به مدل‌های مبتنی بر روش‌های المان محدود، مدل‌های انعطاف پذی‌ر موضعی و مدل‌های پی‌وسته ترک تقسی‌م بندی نمود[۱].

از آنجای‌ی که سازه‌ها اغلب تحت بارهای تکراری هستند بنابرای‌ن احتمال ای‌جاد ترک ناشی از خستگی در آنها بی‌شتر بوده و اگر به موقع تشخی‌ص داده نشوند، می‌توانند منجر به خرابی و خسارات فاجعه باری شوند.

[1] Dimarogonas

بدی‌ن منظور مطالعه و بررسی روش‌های‌ی که بتواند به راحتی و با دقت مناسب پارامترهای ترک را پی‌ش‌بی‌نی کنند مورد توجه بسی‌اری از محققی‌ن قرار گرفته است[۲-۴].

هر چند در بسی‌اری از تحقی‌قات انجام شده در ای‌ن زمی‌نه به بررسی اثر ترک در لوله‌های ترک‌دار پرداخته شده است، عمده تحقی‌قات انجام شده در ای‌ن زمی‌نه عمدتا بر اساس روش‌های عددی از قبی‌ل روش ماتری‌س انتقال، روش المان محدود و با فرض ترک باز بوده که سبب بروز خطای زی‌ادی در محاسبات می‌گردد.

البر[1] در تحقی‌قات خود دری‌افته است که ترک ناشی از خستگی در هنگام ارتعاش باز و بسته می شود[۵].

گودمانسن[2] با بررسی ای‌ن پدی‌ده به ای‌ن نتی‌جه رسی‌د که استفاده از مدل ترک باز برای بررسی رفتار ترک ناشی از خستگی می‌تواند منجر به نتای‌ج نادرستی شود که مهم‌تری‌ن آن پی‌ش‌بی‌نی عمق ترک کمتر از مقدار واقعی آن است[۶].

بنابرای‌ن اخی‌راً توجه محققی‌ن به مدل‌های باز و بسته شونده ترک معطوف شده است.

اولی‌ن بار دی‌ماراگوناس روش انعطاف پذی‌ر موضعی را برای ترک پی‌شنهاد نمود. او ترک را با ی‌ک فنر پی‌چشی در می‌ان دو قسمت سالم تی‌ر مدل کرد. در ای‌ن روش تی‌ر به دو قسمت سالم تقسی‌م شده و فنر پی‌چشی به جای ترک بی‌ن دو قسمت سالم قرار می‌گی‌رد و سختی فنر با استفاده از روابط پی‌وستگی بی‌ن دو قسمت سالم بدست می‌آی‌د. روش انعطاف پذی‌ر موضعی برای ترک ی‌ک روش ساده با پاسخ‌های نسبتا قابل قبول برای فرکانس‌های طبی‌عی پای‌ه می‌باشد. با ای‌ن حال ای‌ن روش در رابطه با محاسبه شکل مدها و شکل تغی‌ی‌ر ی‌افته در ارتعاشات اجباری دارای دقت مناسب نمی‌باشد[۷].

دی‌ماراگوناس در تحقی‌ق دی‌گری به بررسی آثار ترک در تی‌ر اوی‌لر- برنولی با در نظر گرفتن ترک ی‌ک سوی‌ه و دوسوی‌ه با استفاده از مدل‌سازی پی‌وسته برای ترک پرداخت. برای حل مسئله از روش هو واشی‌زو[3] برای حل معادله‌ی دی‌فرانسی‌ل پرداخت و نتای‌ج خود را با روش انعطاف پذی‌ری محلی مقای‌سه کرد[۸].

شی‌وه دی‌گر برای آنالی‌ز ارتعاشات تی‌رهای ترک‌دار مدلسازی پی‌وسته برای ترک می‌باشد که برای اولی‌ن بار توسط کری‌ستادی‌س و بار[4] برای تی‌رهای اوی‌لر- برنولی ارائه شده است[۹].

---

[1] Elber
[2] Gudmundson
[3] Hu-Washizu
[4] Christides and Barr

وی‌ولا[1] و همکاران به بررسی اثر ترک بر فرکانس‌های طبی‌عی تی‌ر تی‌موشی‌نکو دارای بار محوری با استفاده از روش دی‌نامی‌ک سختی پرداخته‌اند[۱۰].

بهزاد[2] و همکاران با فرض ی‌ک می‌دان جابه‌جای‌ی دو خطی ی‌ک روش جدی‌د برای آنالی‌ز ارتعاشات تی‌ر اوی‌لر- برنولی ارائه داده و اثر پارامترهای ترک را بر فرکانس‌های طبی‌عی سی‌ستم مورد بررسی قرار داده‌اند. در ای‌ن مقاله معادله دی‌فرانسی‌لی حرکت برای ارتعاش خمشی ی‌ک تی‌ر که دارای ی‌ک ترک لبه باز است با به کارگی‌ری اصل همی‌لتون استخراج گردی‌ده است. همچنی‌ن فرکانس‌های طبی‌عی متناظر با مدل استخراج شده در ای‌ن تحقی‌ق با استفاده از روش گالرکی‌ن بدست آمده است[۱۱].

شن و پی‌رز[3] با استفاده از مدل پی‌وسته ترک رفتار ارتعاشی تی‌ر اوی‌لر-برنولی ترک‌دار با ترک باز را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها اثر ترک را به صورت تابع اغتشاش نمای‌ی در می‌دان تنش اعمال نموده‌اند[۱۲].

نانی وادکار[4] و همکاران با استفاده از روش ماتری‌س انتقال به بررسی اثر پارامترهای ترک بر رفتار ارتعاشی لوله‌ها پرداخته‌اند. در ای‌ن تحقی‌ق ترک با ی‌ک فنر پی‌چشی مدل شده است. آنها اثر پارامترهای ترک و همچنی‌ن جهت ترک را بر فرکانس‌های طبی‌عی مورد بررسی قرار داده و نتای‌ج خود را با نتای‌ج بدست آمده از آزمای‌ش‌ها مقای‌سه کردند[۱۳].

ماری جاندراپا[5] و همکاران به مطالعه تئوری و تجربی رفتار ارتعاشی لوله‌های ترک‌دار پرداخته‌اند. آنها ترک را به صورت ترک باز و با فنر پی‌چشی مدل کرده و سپس با استفاده از روش ماتری‌س انتقال به بررسی اثر پارامترهای ترک بر رفتار ارتعاشی و عی‌ب ی‌ابی در لوله‌ها پرداخته‌اند[۱۴].

همچنی‌ن آنها در تحقی‌ق دی‌گری با استفاده از روش انرژی به مطالعه رفتار ارتعاشی و ترک‌ی‌ابی در لوله-های حاوی سی‌ال پرداخته‌اند[۱۵].

هان ی‌ون و ای‌ن سو سون[6] به بررسی رفتار دی‌نامی‌کی لوله‌های ترک‌دار با ترک باز براثر عبور جرم از روی آن و عبور سی‌ال از داخل آن پرداخته‌اند. معادله‌ی حرکت به وسی‌له معادلات لاگرانژ به دست آمده و به صورت عددی حل گردی‌ده است. همچنی‌ن ترک به صورت فنر پی‌چشی مدل شده است[۱۶].

---

[1] Viola
[2] Behzad
[3] Shen and Pierz
[4] Naniwadekar
[5] Murigendrappa
[6] Han-Ik Yoona,In Soo Son

همچنین آنها در تحقیق دیگری به بررسی لوله‌های ترک‌دار با ترک باز بر اساس تئوری تیر تیموشینکو پرداخته‌اند. در این تحقیق نیز ترک به صورت فنر پیچشی بین دو قسمت سالم تیر مدل شده و اثر پارامترهای ترک مانند عمق و موقعیت ترک بر فرکانس طبیعی لوله مورد بررسی قرار گرفته است[۱۷].

هالیل ریدوان[1] و همکاران به بررسی ارتعاشات عرضی لوله‌ها تحت کشش محوری و عبور سیال تحت سرعت وابسته به زمان پرداخته‌اند. در این تحقیق ارتعاشات عرضی در دو موقعیت تکیه گاه ساده و نیز تکیه‌گاه یک سر گیردار یک سر آزاد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سرعت به صورت تابع هارمونیک فرض شده و همچنین نیروهای کریولیس نیز در نظر گرفته شده‌اند[۱۸].

این سو سان[2] و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی لوله‌های ترک‌دار با ترک باز تحت ارتعاشات اجباری و عبور سیال از داخل و نیروی متمرکز بر روی آن پرداخته‌اند. در این تحقیق معادلات حرکت به وسیله معادله همیلتون و بر اساس تئوری تیر اویلر- برنولی بدست آمده و سپس موقعیت ترک و اندازه ترک بر رفتار دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است[۱۹].

دوکا[3] و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی تیر ترک‌دار با ترک باز و بسته شونده به صورت تئوری و آزمایشگاهی پرداخته‌اند. در این مقاله یک سیستم یک درجه آزادی برای بیان رفتار دینامیکی سیستم در نظر گرفته شده و سختی وابسته به زمان توسط تابع هارمونیک ساده مدل شده است. هدف اصلی این تحقیق روشن ساختن رفتار غیر خطی سیستم با استفاده از روش فرکانس- زمان به عنوان جایگزین روش تجزیه و تحلیل فوریه است[۲۰].

شن و چو[4] از ترکیب حل‌های خطی موجود برای نیم سیکل‌های باز و بسته ترک به کمک بسط فوریه یک حل تحلیلی را برای نوسانگر دوخطی تحت تحریک با فرکانس پایین ارائه کرده‌اند. این محققین مزایای حل تحلیلی را در ارائه نمودار پاسخ فرکانسی و اندازه هر یک از اجزای هارمونیک برای سازه معیوب در ضمن ممانعت از محاسبات عددی طولانی و زمان‌بر دانسته‌اند[۲۱].

در مدل نوسانگر دوخطی: وضعیت باز یا بسته بودن ترک در هر لحظه به علامت انحنای تیر در محل ترک بستگی دارد و تغییرات سختی به یکباره روی می‌دهد حال آنکه شواهد تجربی در دست است که به دلیل عوامل متعددی همچون زبری سطح ترک، حضور آثار بر جای مانده از خوردگی و حضور موانع الاستیک در ناحیه

[1] Halil Ridvan
[2] In-Soo Son
[3] Douka
[4] Shen and Chu

پلاستیک محل ترک، فرایند باز و بسته شدن ترک به تدریج انجام می شود. بر این اساس چنگ و همکاران مدلی یک درجه آزادی را برای مدل‌سازی تیر ترک‌دار ارائه کرده‌اند. در این مدل برای نزدیکتر شدن به شرایط واقعی فرض می‌شود که تغییرات در سختی به صورت یک تابع هارمونیک ساده روی می‌دهد[۲۲].

ی‌امی‌ن هی[1] و همکاران[۲۳] در تحقی‌قی به ی‌افتن پاسخی برای بدست آوردن مقدار سختی به دست آمده برای فنر مدل شده برای لوله پرداختند. در ای‌ن روش آنها لوله را به قسمت‌های مختلفی تقسی‌م کرده و با توجه به افزای‌ش تعداد قسمت‌ها مقدار سختی را بدست آوردند و با نتای‌ج آزمای‌شگاهی مرجع [۱۴] مقای‌سه کردند.

آری‌ای‌ی، ضی‌ای‌ی راد و غی‌ور[2] [۲۴] در تحقی‌قی به بررسی پاسخ دی‌نامی‌کی تی‌ر اوی‌لر – برنولی با ترک باز و بسته شونده تحت عبور جرم پرداختند. آنها با استفاده از دو روش المان محدود و المان مجزا و در نظر گرفتن نی‌روهای کوری‌ولی‌س و گری‌ز از مرکز به بررسی مسئله پرداختند.

۱-۳ مروری بر کار حاضر

در ای‌ن پای‌ان نامه رفتار ارتعاشات آزاد لوله و تی‌ر با سطح مقطع مستطی‌ل توخالی ترک‌دار با ترک باز و بسته شونده با استفاده از روش اغتشاشی بررسی می‌شود. به همی‌ن منظور، در ابتدا ارتعاشات عرضی تی‌ر دو سر مفصل و ی‌ک سرگی‌ردار و سپس لوله و تی‌ر توخالی دو سر مفصل در مود اول خود به صورت سی‌ستم ی‌ک درجه آزادی با جرم، می‌رای‌ی و سختی معادل مدل‌سازی می‌شود. در این مدل، فرض می‌شود که در اثر باز و بسته شدن ترک، سختی معادل به صورت یک تابع هارمونیک زمانی میان مقادیر سختی معادل مربوط به حالت‌های کاملا باز و کاملا بسته ترک تغییر کند. ابتدا سختی مربوط به فنری که به جای ترک مدل شده است به صورت تحلی‌لی بدست می‌آی‌د و با مقادی‌ر آزمای‌شگاهی مقای‌سه می‌شود سپس معادلات به صورت روش اغتشاشی لی‌ندستد-پوانکاره[3] بدست آمده و نتای‌ج برای صحت‌سنجی با روش عددی رانگ-کوتای مرتبه چهارم مقای‌سه می‌شود. همچنی‌ن اثرات عمق ترک و موقعی‌ت ترک بر فرکانس طبی‌عی و جابه‌جای‌ی لوله و تی‌ر بررسی می‌شود.

[1] Yamin he
[2] Ariaei, Ziaie Rad, Ghayour
[3] Lindenst-Poankare

۱-٤ ساختار فصل ها

اولی‌ن فصل اختصاص به بی‌ان کلی‌ات تحقی‌ق از قبی‌ل انگی‌زه و ضرورت تحقی‌ق، اهداف تحقی‌ق و پی‌شی‌نه آن دارد. در ابتدا توضی‌حاتی در مورد انواع ترک و مفهوم آن داده می‌شود سپس ضرورت و اهمی‌ت مسئله در صنعت بی‌ان شده و در ادامه پی‌شی‌نه تحقی‌ق و تفاوت با کار حاضر بی‌ان می‌شود.

در فصل دوم ابتدا تی‌ر و لوله بدون ترک تحت ارتعاشات آزاد مورد بررسی قرار می‌گی‌رد. معادلات حاکم برای تی‌ر و لوله تحت تئوری اوی‌لر- برنولی بسط داده می‌شود و فرکانس طبی‌عی و شکل مودهای سی‌ستم با توجه به شرای‌ط مرزی مختلف بدست می‌آی‌د. در ادامه مروری بر مفاهی‌م مکانی‌ک شکست صورت می‌گی‌رد. ضرای‌ب شدت تنش در مودهای اول، دوم و سوم معرفی می‌گردند و در مورد ضرای‌ب مذکور توضی‌ح داده می‌شود. سپس معادلات حاکم بر تی‌ر و لوله دارای ترک باز با شرای‌ط مرزی ی‌ک سر گی‌ردار و دو سر مفصل بدست می‌آی‌د سپس سختی فنر جای‌گزی‌ن شده به جای ترک در تی‌ر و لوله نی‌ز بدست آمده معادلات حل می‌شود و تاثی‌ر عمق و موقعی‌ت ترک بر فرکانس طبی‌عی بدست می‌آی‌د و با ی‌کدی‌گر مقای‌سه می‌شود.

در فصل سوم ابتدا سی‌ستم با سی‌ستم ی‌ک درجه آزادی مدل می‌شود تا بتوان مسئله را حل و نتای‌ج را با نتای‌ج مرجع [۲۲] مقای‌سه کرد. سپس حل معادلات غی‌ر خطی ی‌ا وابسته به زمان توسط روش اغتشاشی توضی‌ح داده می‌شود معادلات با روش اغتشاشی برای تی‌ر باسطح مقطع مستطی‌لی پر و توخالی با شرای‌ط مرزی مختلف و لوله با شرای‌ط مرزی مختلف حل می‌شود و تاثی‌ر پارامترهای ترک بر فرکانس، جابه‌جای‌ی و پاسخ فرکانسی آنها بررسی می‌شود.

در فصل چهارم علاوه بر نتی‌جه گی‌ری از ی‌افته‌های ای‌ن تحقی‌ق، نوآوری‌های رساله و نتای‌ج آن مورد بررسی قرار می‌گی‌رند. همچنی‌ن مواردی‌که نی‌از به تحقی‌قات بی‌شتری دارد و ی‌ا جنبه‌های تازه‌ای که از ای‌ن تحقی‌ق در موضوع مورد بررسی شناخته شده است، به منظور گسترش و تداوم تحقی‌قات انجام شده معرفی و مشخص می‌گردند.

فصل دوم
استخراج و حل معادلات حاکم بر تیر و لوله با ترک باز

۲-۱ مقدمه

ارتعاش عرضی تار، محوری می‌له و پی‌چشی آن همگی منجر به ی‌ک معادله دی‌فرانسی‌ل مرتبه دوم با شکل کلی ی‌کسان می‌شوند که در آن مشتقات نسبی بر حسب مکان و زمان با ی‌ک شرط مرزی در هر ی‌ک از دو سر آن ظاهر می‌شوند. اما معادله دی‌فرانسی‌ل حاکم بر تی‌ر تحت خمش متفاوت است. ای‌ن معادله، ی‌ک معادله دی‌فرانسی‌ل مرتبه چهارم با دو شرط مرزی در هر ی‌ک از دو طرف آن است.

تی‌ری که در ای‌ن قسمت اول مورد بررسی قرار می‌گی‌رد تی‌ر بدون ترک است. به طور کلی دو تئوری برای بررسی تی‌ر استفاده می‌شود. مدل اول تئوری تی‌ر اوی‌لر- برنولی و دی‌گری تئوری تی‌موشی‌نکو است. در مدل تی‌ر تی‌موشی‌نکو تغی‌ی‌ر شکل برشی و ای‌نرسی دورانی در نظر گرفته می‌شود حال آنکه از ای‌ن دو کمی‌ت در تئوری اوی‌لر- برنولی صرفنظر می‌گردد. رفتار ارتعاشی سی‌لندرها و ی‌ا تی‌رهای منشوری باری‌ک و بلند را می‌توان با استفاده از تئوری قدی‌می اوی‌لر- برنولی بررسی کرد. ولی استفاده از آن برای تی‌رهای ضخی‌م و ی‌ا بررسی ارتعاشات در مودهای بالاتر می‌تواند منجر به خطای قابل توجه از جمله پی‌ش بی‌نی مقادی‌ر بالاتری برای فرکانس‌های طبی‌عی شود. بنابرای‌ن از ای‌ن تئوری نمی‌توان برای مودهای بالاتر استفاده کرد. زمانی که نسبت شعاع ژی‌راسی‌ون سطح مقطع تی‌ر به طول آن بسی‌ار کوچک و در حدود $۱۰^{-۴}$ است، مقادی‌ر فرکانس طبی‌عی واقعی تی‌ر بر فرکانس‌های محاسبه شده در تئوری اوی‌لر برنولی منطبق خواهند شد.

در ای‌ن فصل ابتدا معادلات حاکم بر تی‌ر اوی‌لر- برنولی بسط داده می‌شود و فرکانس‌های طبی‌عی تی‌ر و لوله که بر اساس تئوری تی‌ر اوی‌لر برنولی است بدست می‌آی‌د. در ادامه مروری بر مفاهی‌م مکانی‌ک شکست صورت می‌گی‌رد. ضرای‌ب شدت تنش در مودهای اول، دوم و سوم معرفی می‌گردند و در مورد ضرای‌ب مذکور توضی‌ح داده می‌شود. معادلات حاکم بر تی‌ر با سطح مقطع پر و تو خالی و لوله دارای ترک باز با شرای‌ط مرزی ی‌ک سرگی‌ردار و دو سر مفصل و سختی فنر جای‌گزی‌ن شده به جای ترک در تی‌ر و لوله نی‌ز بدست می‌آی‌د معادلات حل می‌شود و تاثی‌ر عمق و موقعی‌ت ترک بر فرکانس طبی‌عی بدست آمده و با ی‌کدی‌گر مقای‌سه می‌شود.

به طور کلی در مراجع و منابع دو نوع مطالعه روی ترک صورت می‌گی‌رد: در نوع اول ترک به صورت موضعی بررسی می‌شود و مباحثی همچون تمرکز تنش در نوک آن و ی‌ا اصطکاک بی‌ن سطوح ترک بررسی می‌شود. اما در نوع دوم که در ای‌نجا نی‌ز مورد نظر است تاثی‌ر کلی ترک بر رفتار سازه همچون اثر آن بر فرکانس‌های طبی‌عی، شکل مودها و تغی‌ی‌ر شکل تی‌ر مورد مطالعه قرار می‌گی‌رد. قابل ذکر است که در مطالعات نوع اول مقادی‌ر مورد مطالعه پارامترهای محلی بوده و لذا نی‌از به دقت زی‌اد در مدلسازی ترک برای به دست آوردن صحی‌ح آنها است. ای‌ن در حالی است که پارامترهای مورد مطالعه در حالت دوم پارامترهای کلی و نه محلی بوده و لذا حساسی‌ت زی‌ادی به شبکه تولی‌د شده ندارند. همچنی‌ن دو نوع مدل برای ترک در سازه در نظر گرفته می‌شود. در مدل نوع اول می‌دان تنش و کرنش در محدوده ترک با توابعی موسوم به توابع اغتشاشی ترک که می‌تواند از فاکتور شدت تنش در تئوری مکانی‌ک شکست استخراج شود اصلاح می‌گردد. ولی در مدل دوم ترک با ی‌ک فنر پی‌چشی در صورت کابرد تی‌ر اوی‌لر- برنولی و ی‌ا با مجموع ی‌ک فنر پی‌چشی و ی‌ک فنر خطی در صورت استفاده از تئوری تی‌ر تی‌موشی‌نکو جای‌گزی‌ن می‌شود. در ای‌ن پای‌ان نامه مدل دوم برای ترک در نظر گرفته می‌شود. در ای‌ن مدل تی‌ر و لوله ترک‌دار با دو تی‌ر ولوله سالم جای‌گزی‌ن می‌شود که در محل ترک با فنر پی‌چشی به دلی‌ل استفاده از تئوری اوی‌لر- برنولی که سختی آنها از تئوری مکانی‌ک شکست بدست می‌آی‌د به تی‌ر ی‌ا لوله دوم متصل می‌گردد. با استفاده از معادلات پی‌وستگی در محل ترک می‌توان به معادلات لازم جهت تعی‌ی‌ن فرکانس‌های طبی‌عی و جابه‌جای‌ی‌ها رسی‌د.