دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

ارائه شده جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

عنوان

بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در لوله‌های چند لایه

نگارنده

بهنام زمانی حیدرآبادی

استاد راهنما

دکتر خسرو نادران طحان

استاد مشاور

دکتر کورش حیدری شیرازی

شهریور ۱۳۸۹

بسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

مدیریت تحصیلات تکمیلی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه دوره کارشناسی ارشد/دکتری)

بدین وسیله گواهی می‌گردد پایان‌نامه آقای **بهنام زمانی حیدرآبادی** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)** از دانشکده **مهندسی** به شماره دانشجویی **۸۶۴۰۱۰۹** تحت عنوان **بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در لوله‌های چند لایه** جهت اخذ درجه **کارشناسی ارشد** در تاریخ **۱۳۸۹/۶/۲۲** توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه **بسیار خوب** تصویب گردید.

۱- اعضا هیئت داوران:	مرتبه علمی	امضا
الف - استاد راهنما: **دکتر خسرو نادران طحان**	دانشیار	
ب - استاد مشاور: **دکتر کورش حیدری شیرازی**	دانشیار	
ج – داور ۱: **دکتر شاپور مرادی**	استادیار	
د – داور ۲: **دکتر افشین قنبرزاده**	استادیار	
هـ – نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (استاد ناظر): **دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد**	استادیار	
۲- مدیر گروه: **دکتر افشین قنبرزاده**	استادیار	
۳- معاون پژوهشی دانشکده: **دکتر کریم انصاری اصل**	استادیار	
۴- مدیر کل تحصیلات تکمیلی: **دکتر رحیم پیغان**	استاد	

تقدیم به

پدر دلسوز

مادر مهربان

و دیگر اعضای خانواده عزیزم

که دعای خیرشان همواره بدرقه راه پر فراز و نشیب من بوده است.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای گرامی جناب دکتر خسرو نادران طحان و همچنین جناب دکتر کورش حیدری شیرازی استاد مشاور ارجمند، تشکر کنم که با راهنمایی‌های ارزنده‌شان در بهبود این پژوهش کمک زیادی کردند.

چکیده پایان نامه

نام خانوادگی: زمانی حیدرآبادی **نام:** بهنام

عنوان پایان نامه: بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در لوله‌های چند لایه

استاد راهنما: دکتر خسرو نادران طحان **استاد مشاور:** دکتر کورش حیدری شیرازی

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** طراحی‌کاربردی

محل تحصیل(دانشگاه): شهید چمران اهواز

دانشکده: مهندسی

تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۹/۶/۲۲ **تعداد صفحه:** ۶۵

کلیدواژه ها: امواج هدایت شده فراصوت، منحنی پراکندگی، سرعت فاز و گروه، تست غیر مخرب، بازرسی لوله، سازه‌های استوانه‌ای چند لایه

چکیده:

استفاده از امواج هدایت شده‌ی فراصوت در بازرسی لوله‌های نفت، گاز، پتروشیمی و صنایع تولید انرژی به منظور تشخیص عیب و ترک، رو به گسترش است. به کمک این امواج در وقت و هزینه، در قیاس با روش‌های سابق که به صورت نقطه به نقطه بازرسی می‌شد، صرفه‌جویی قابل توجهی می‌شود. در این پایان‌نامه به بررسی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در لوله‌های ایزوتروپیک چند لایه پرداخته شده‌است. با این فرض که لایه‌ها بدون فضای مابین، به یکدیگر متصل هستند و شرایط مرزی در سطح داخلی استوانه داخلی و سطح بیرونی استوانه بیرونی تنش صفر می‌باشد. هدف از این طرح استخراج دیاگرام‌های طیف فرکانسی (فرکانس بر حسب عدد موج)، سرعت فاز بر حسب فرکانس، سرعت گروه بر حسب فرکانس و در نهایت ساختار موج در لوله‌های چند لایه می‌باشد. در این پژوهش ابتدا استوانه توپر (میله) و سپس لوله‌ی یک لایه بررسی شدند و پس از اطمینان از صحت روش و کد نوشته شده و مقایسه با مراجع مختلف، به حل معادلات برای استوانه چند لایه پرداخته و نمودارهای مربوطه با موفقیت استخراج شده‌اند.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فرم ارزشیابی ..... **أ**

اهدانامه ..... **ب**

تقدیر و تشکر ..... **ت**

چکیده پایان نامه ..... **ث**

فهرست مطالب ..... **ج**

فهرست شکل‌ها ..... **خ**

فهرست جدول‌ها ..... **ذ**

فهرست علامت‌ها ..... **ر**

فصل اول

مقدمه **۱**

فصل دوم

مرور پژوهش‌های پیشین **۴**

فصل سوم

مبانی نظری پژوهش **۹**

۱.۳ استخراج معادلات حاکم ۹

۲.۳ انتشار موج در استوانه‌ی توپر ۱۱

۱.۲.۳ انتشار موج پیچشی متقارن محور ۱۷

۲.۲.۳ انتشار موج طولی متقارن محور ۱۸

۳.۳ انتشار موج در استوانه‌ی توخالی ۲۱

۱.۳.۳ انتشار موج محیطی متقارن محور ۲۲

۲.۳.۳ انتشار موج طولی متقارن محور ۲۴

فصل چهارم

روش تحقیق ۲۷

۱.۴ انتشار موج محیطی متقارن محور در لوله‌ی دو لایه ۲۸
۲.۴ انتشار موج طولی متقارن محور در لوله‌ی دو لایه ۳۱

فصل پنجم

نتایج، بحث وبررسی ۳۷

۱.۵ استوانه توپر و موج محیطی ۳۷
۲.۵ استوانه توپر و موج طولی ۴۲
۳.۵ استوانه توخالی و موج محیطی ۴۵
۴.۵ استوانه توخالی و موج طولی ۴۸
۵.۵ لوله دولایه و موج محیطی ۵۲
۶.۵ لوله دولایه و موج طولی ۵۷

فصل ششم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۶۲

۱.۶ نتیجه‌گیری ۶۲
۲.۶ پیشنهادات جهت ادامه کار ۶۳

مراجع ۶۴

پیوست

برنامه‌های کامپیوتری محاسبه‌ی ریشه‌های معادلات فرکانسی ۶۶

پ.۱ لوله‌ی دولایه موج محیطی ۶۶
پ.۲ لوله‌ی دولایه موج طولی (سابروتین اصلی) ۶۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱: مختصات استوانه‌ای (r,θ,z) ۱۱
شکل ۳-۲: انتشار موج پیچشی و متقارن محور ۱۷
شکل ۳-۳: انتشار موج طولی و متقارن محور ۱۸
شکل ۳-۴: استوانه‌ی توخالی ۲۱
شکل ۴-۱: لوله‌ی دو لایه با طول بینهایت ۲۷
شکل ۵-۱: پراکندگی فرکانس بر حسب عدد موج ۳۸
شکل ۵-۲: منحنی پراکندگی انتشار موج محیطی در میله ۳۸
شکل ۵-۳: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۳۹
شکل ۵-۴: : منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۳۹
شکل ۵-۵: ساختار موج مود اول محیطی میله در فرکانس ۱۰۰ KHz ۴۰
شکل ۵-۶: ساختار موج مود دوم محیطی در میله در فرکانس ۱۰۴ KHz ۴۱
شکل ۵-۷: ساختار موج مود سوم محیطی در میله در فرکانس ۱۱۰ KHz ۴۱
شکل ۵-۸: منحنی پراکندگی انتشار موج طولی در میله ۴۲
شکل ۵-۹: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۴۳
شکل ۵-۱۰: منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۴۳
شکل ۵-۱۱: ساختار موج مود اول طولی در میله در فرکانس ۳۱۰ KHz ۴۴
شکل ۵-۱۲: ساختار موج مود دوم طولی در میله در فرکانس ۴۷۰ KHz ۴۴
شکل ۵-۱۴: نمودار پراکندگی انتشار موج طولی در لوله ۴۵
شکل ۵-۱۵: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۴۶
شکل ۵-۱۶: منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۴۶
شکل ۵-۱۷: ساختار موج مود اول محیطی در لوله در فرکانس ۳۶ KHz ۴۷
شکل ۵-۱۸: ساختار موج مود دوم محیطی در لوله در فرکانس ۷۲ KHz ۴۷
شکل ۵-۱۹: ساختار موج مود سوم محیطی در لوله در فرکانس ۱۰۹ KHz ۴۸
شکل ۵-۲۰: منحنی پراکندگی انتشار موج طولی در لوله ۴۹

شکل ۵-۲۱: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۴۹
شکل ۵-۲۲: منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۵۰
شکل ۵-۲۳: ساختار موج مود اول طولی در لوله در فرکانس ۰/۶ MHz ۵۱
شکل ۵-۲۴: ساختار موج مود دوم طولی در لوله در فرکانس ۱/۸ MHz ۵۱
شکل ۵-۲۵: ساختار موج مود سوم طولی در لوله در فرکانس ۱/۳ MHz ۵۲
شکل ۵-۲۶: منحنی پراکندگی انتشار موج محیطی در لوله دولایه ۵۳
شکل ۵-۲۷: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۵۴
شکل ۵-۲۸: منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۵۴
شکل ۵-۲۹: ساختار موج مود اول محیطی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۵۶ KHz ۵۵
شکل ۵-۳۰: ساختار موج مود دوم محیطی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۸۸ KHz ۵۶
شکل ۵-۳۱: ساختار موج مود سوم محیطی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۱۲۴ KHz ۵۶
شکل ۵-۳۳: منحنی پراکندگی انتشار موج طولی در لوله دولایه ۵۷
شکل ۵-۳۴: منحنی پراکندگی سرعت فاز بر حسب فرکانس ۵۸
شکل ۵-۳۵: منحنی پراکندگی سرعت گروه بر حسب فرکانس ۵۸
شکل ۵-۳۶: ساختار موج مود اول طولی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۵۳ KHz ۵۹
شکل ۵-۳۷: ساختار موج مود دوم طولی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۱۱۷ KHz ۶۰
شکل ۵-۳۸: ساختار موج مود دوم طولی در لوله‌ی دولایه در فرکانس ۱۲۸ KHz ۶۰
شکل ۵-۳۹: ساختار موج مود سوم طولی در لولهی دولایه در فرکانس ۱۱۷ KHz ۶۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۵-۱: خواص فیزیکی میله مورد مطالعه در هر دو حالت انتشار موج محیطی و طولی ۳۷
جدول ۵-۲: خواص فیزیکی لوله مورد مطالعه در حالت انتشار موج محیطی ۴۵
جدول ۵-۳: خواص فیزیکی لوله مورد مطالعه در حالت انتشار موج طولی ۴۸
جدول ۵-۴: خواص فیزیکی لوله دو لایه مورد مطالعه ۵۲

فهرست علامت‌ها

a	شعاع میله و شعاع داخلی استوانه
b	شعاع بیرونی استوانه
c_L	سرعت موج طولی
c_T	سرعت موج محیطی
d	قطر میله
k	عدد موج
n	مرتبه‌ی محیطی
r	شعاع میله و استوانه
t	زمان
t_m	ضخامت لایه‌ی mام استوانه
u_i	جابجایی در راستای i
$J_\upsilon(x)$	تابع بسل نوع اول از مرتبه‌ی ν
$Y_\upsilon(x)$	تابع بسل نوع دوم از مرتبه‌ی ν
$I_\upsilon(x)$	تابع بسل بهبود یافته نوع اول از مرتبه‌ی ν
$K_\upsilon(x)$	تابع بسل بهبود یافته نوع دوم از مرتبه‌ی ν
ω	فرکانس زاویه‌ای
λ,μ	ثابت‌های لامه
ρ	چگالی
ζ	نسبت شعاع‌ها
η	نسبت سرعت موج طولی به سرعت موج محیطی
σ	تنش
Δ	اتساع
Φ	تابع پتانسیل اسکالر(انتقال)
$\vec{H}$	تابع پتانسیل برداری(چرخش)

فصل اول

مقدمه

روش‌های بازرسی در لوله‌های صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و همچنین کارخانجات شیمیایی مستلزم این است که در فرآیند تولید خللی وارد نشود. برای این کار در صنعت، بازرسی‌هایی بر روی قطعه صورت می‌پذیرد که به بازرسی یا آزمون‌های غیر مخرب[1] موسومند.

میلیون‌ها کیلومتر خط لوله در سراسر جهان بکار رفته‌است و همگی نیاز به بازرسی‌های منظم دارند. بازرسی خطوط لوله یک مسئله‌ی بسیار مهم است که با استفاده از روش‌های مطمئن انجام می‌پذیرد. گزارش‌های متعددی از مسمومیت‌های شدید بر اثر نشت مواد سمی از ترک‌ها و خوردگی‌ها در محیط‌های مجاور خطوط لوله‌های کارخانجات شیمیایی و پتروشیمی، انفجارهای متعدد از خطوط انتقال نفت و گاز همگی حوادثی هستند که علاوه بر تهدید زندگی افراد و تخریب و آلوده کردن محیط زیست، هزینه‌های زیادی بر صنعت تحمیل می‌کند.

امروزه روش‌های بسیاری جهت بازرسی‌های غیر مخرب وجود دارد. آزمون‌های فراصوتی یکی از رایج‌ترین آزمون‌هایی است که توانایی فوق‌العاده‌ای در بازرسی و شناسایی عیوب موجود در قطعه را دارند. از سالیان گذشته بازرسی‌های فراصوتی به صورت گسترده‌ای در صنایع مختلف رواج یافته است. اینگونه بازرسی‌ها بر مبنای انتشار امواج حجمی در قطعه است. این امواج پس از انتشار به سرعت مستهلک شده و فقط دریافت آن در فاصله‌ی محدودی از محل انتشار میسر است. این نوع آزمون‌ها را بازرسی‌های نقطه به نقطه[2] می‌نامند. استفاده از این روش متداول در آزمون‌های فراصوتی باعث کندی فرآیند بازرسی و تحمیل هزینه‌های سنگین در بازرسی‌های کلی می‌شود. از این‌رو جهت برطرف کردن این مشکلات، تلاش گسترده‌ی مهندسان، محققان و دانشمندان نتیجه داد و اخیراً با پیشرفت این صنعت و استفاده از روش‌های نوین بازرسی از طریق امواج هدایت

[1] NDE & NDT (Non Destructive Evaluation & Non Destructive Testing)
[2] Point by Point

شده‌ی فراصوتی[1] امکان بازرسی سریع و دقیق فراهم شده است. این امواج در اجسام و بین مرزهای آن منتشر می‌شوند و چون به صورت یک گروه موج[2] منتشر می‌شوند، در برخی نقاط یکدیگر را تشدید می‌کنند. بنابراین اتلاف انرژی کمتری داشته، مانند امواج حجمی زود مستهلک نشده و امکان انتشار در مسیرهای طولانی را دارند. این روش منحصر به فرد هم از نظر زمانی و هم از نظر هزینه در قیاس با روش نقطه به نقطه‌ی متداول، بسیار به صرفه می‌باشد.

امواج هدایت شده فراصوت در بازرسی‌های مختلف به صورت گسترده مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته‌است. از نظراقتصادی، صنایع امروزه در حال رقابت با یکدیگر هستند و مواردی همچون کیفیت و کارایی محصولات و ماشین آلات جایگاه مهمی دارند. از سوی دیگر عیوب ایجاد شده در برخی قطعات موجب شکست سازه و ایجاد صدمات عظیم و جبران‌ناپذیر مالی و جانی می‌شود. شناسایی و بازرسی به موقع این نوع عیوب، منطقی و امری بسیار ضروری می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده اهمیت این نوع بازرسی‌ها بر هیچ‌کس پوشیده نیست.

امواج هدایت شده از یک معادله دیفرانسیل جزیی تبعیت می‌کنند. برای بررسی نحوه‌ی انتشار این امواج در یک جسم، لازم است که شرایط مرزی فیزیکی موجود بر روی این جسم نیز در نظر گرفته شود. علاوه بر آن برای هر هندسه مطلوب است که دستگاه مختصات متناسب با آن هندسه انتخاب شود. در پروژه‌ی حاضر محور استوانه در خلال حرکت ثابت باقی می‌ماند و جابجا نمی‌شود و در واقع امواج به صورت متقارن محور[3] در استوانه‌ها منتشر می‌شوند. پس از انتخاب دستگاه مختصات مناسب با نوع سازه و با در نظر گرفتن فرضیات، دستگاه معادلات تنش و تغییر مکان‌ها را ایجاد کرده و شرایط مرزی مربوط اعمال می‌شوند. معادلات حاصل یک دستگاه معادله‌ی همگن خطی با ضرایب مجهول است که برای داشتن جواب غیر بدیهی، دترمینان ضرایب مجهول معادلات باید صفر شود؛ معادله‌ی بدست آمده معادله‌ی فرکانسی می‌باشد که ریشه‌های این معادله، منحنی پراکندگی فرکانس بر حسب عدد موج[4] را نتیجه می‌دهد. این ویژگی امواج هدایت شده‌است که برخلاف امواج حجمی که مودهای فرکانس محدودی دارند، دارای مودهای نامحدودی هستند. از این‌رو یک سازه‌ی محدود، می‌تواند تعداد نامحدودی از مودهای انتشار را پشتیبانی کند.

[1] Ultrasonic Guided Waves
[2] Wave Packet
[3] Axisymmetric
[4] Wave Number

این پژوهش بر مبنای انتشار امواج در سازه‌های منظم هندسی و مواد ایزوتروپیک با خاصیت الاستیک استوار می‌باشد. در این راستا ابتدا به بررسی مسئله‌ی انتشار امواج طولی و پیچشی در استوانه‌ها (توپر و توخالی) پرداخته شد. پس از بررسی این دو هندسه، بدلیل کاربرد زیاد لوله‌های چند لایه در صنایع مختلف و اهمیت بازرسی آنها، این نوع سازه‌ها مورد تحقیق قرار گرفتند.

این پایان‌نامه از شش فصل تشکیل شده‌است که در فصل اول مقدمه‌ای راجع به اهمیت امواج هدایت شده فراصوت بیان می‌شود. فصل دوم به مروری بر کارها و پژوهش‌هایی انجام شده در این زمینه می‌پردازد. در فصل سوم معادلات حاکم بر انتشار امواج در سازه‌های استوانه‌ای شکل و شیوه‌ی حل آنها بیان می‌شود. در فصل چهارم نحوه‌ی بدست آوردن معادلات فرکانسی مربوط به لوله‌ی دولایه و روش حل آن توضیح داده می‌شود. نمودارهای طیف فرکانس (فرکانس بر حسب عدد موج) و نمودارهای پراکندگی سرعت فاز[1] بر حسب فرکانس و نمودار سرعت گروه[2] بر حسب فرکانس که از معادله‌ی فرکانسی بدست آورده می‌شوند، در فصل پنجم نشان داده می‌شوند. همچنین نمودارهای جابه‌جایی در چند مد و فرکانس متفاوت در این فصل ارائه می‌گردند که ساختار موج[3] را در این نوع سازه‌ها نشان می‌دهند. بحث در مورد نتایج حاصل و مقایسه آنها با نتایج منابع دیگر نیز در همین فصل ارائه می‌شود. در نهایت در فصل ششم نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاداتی در جهت ادامه‌ی کار ارائه می‌گردد.

[1] Phase velocity dispersion
[2] Group velocity dispersion
[3] Wave structure

فصل دوم

مرور پژوهش‌های پیشین

در این فصل، ابتدا مقالاتی پیرامون کاربردهای امواج هدایت شده‌ی فراصوت و اهمیت آنها در بازرسی‌های غیر مخرب مرور می‌شوند. سپس مقالاتی که معادلات حاکم، نحوه حل و ترسیم نمودارهای پراکندگی را برای هندسه‌های مختلف تشریح کرده‌اند، ارائه می‌گردد. در نهایت نیز مقالاتی مربوط به تأثیر عوامل مختلف بر انتشار امواج هدایت شده فراصوت آورده شده است.

رز[1] به روش‌های ایجاد و انتشار امواج هدایت شده فراصوت در اجسام و به مقایسه این روش‌ها با هم پرداخت. وی نشان داد که تراگذرهای شانه‌ای[2] نسبت به روش تابش مایل[3] از مزایای بیشتری برخوردار بوده و کاربرد وسیع‌تری در بازرسی‌های غیرمخرب دارند. تراگذرهای شانه‌ای توانایی ایجاد امواج هدایت شده را در هر نوع سازه‌ای دارند و نسبت به روش تابش مایل از دقت و حساسیت بالاتری برخوردارند. با استفاده از روش تراگذرهای شانه‌ای در جاهایی که دسترسی به آنها مشکل است، می‌توان به بازرسی آنها پرداخت [۱].

لی‌یبو[4] و همکاران به بررسی عوامل تضعیف انرژی امواج هدایت شده پرداختند و نشان دادند که امواج هدایت شده فراصوت در بخش داخلی، مرکزی و خارجی لوله منتشر می‌شوند. بنابراین بازرسی دیواره لوله به طور کامل انجام می‌شود. آنها نشان دادند که امواج طولی نسبت به نقص‌های محیطی و امواج پیچشی نسبت به عیوب طولی حساسیت دارند و امواج طولی حساسیت کمی نسبت به عیوب شعاعی دارند [۲].

[1] Joseph L.Rose
[2] Comb transduser
[3] Oblique incidence
[4] Li Yibo

توماس[1] و همکاران منحنی‌های پراکندگی سرعت فاز، سرعت گروه و ساختار موج را برای لوله‌ای فولادی با قطر داخلی ۳۵ میلیمتر و قطر خارجی ۳۸ میلیمتر بدست آوردند. آنها نشان دادند که تراگذرهای شانه‌ای توانایی تحریک مودهای متقارن محور با جابجایی‌های شعاعی بسیار کم و جابجایی محوری زیاد را دارند [۳].

یانگ مو چونگ[2] و همکاران به بازرسی لوله‌های تغذیه نیروگاه‌های هسته‌ای پرداختند. آنها بعد از بدست آوردن منحنی‌های پراکندگی مربوط به لوله تغذیه، نشان دادند که امواج هدایت شده‌ی طولی[3] به عیوب شعاعی و امواج هدایت شده‌ی محیطی[4] به عیوب طولی حساس‌ترند. در نهایت توصیه می‌شود که برای بازرسی عمومی لوله از موج هدایت شده‌ی طولی و برای بررسی کمی شکاف‌های محوری از موج هدایت شده‌ی محیطی استفاده شود [۴].

جی یون کیم[5] و همکاران به بازرسی خطوط لوله گاز شهری با استفاده از امواج هدایت شده پرداختند. آنها منحنی‌های پراکندگی سرعت فاز و سرعت گروه را برای خط لوله گاز شهری به قطر خارجی ۲۱۶/۳ میلیمتر و ضخامت دیواره ۵/۸۵ میلیمتر بدست آوردند. به منظور تعیین فرکانس بازرسی ایده‌آل جهت تشخیص شکاف‌های متفاوت در خط لوله گاز شهری، سیگنال‌های بدست آمده از هر فرکانس مورد تحلیل واقع شد [۵].

لاو[6] و همکارانش به تشخیص خوردگی در لوله‌های عایق‌دار به کمک امواج هدایت شده پرداختند. آنها توجه خود را بر روی انتشار امواج و حساسیتشان به عیوب مختلف و ایجاد رابطه‌ای بین اندازه ترک و قدرت بازگشت موج معطوف کردند. در پایان نیز نتایج عددی و تحلیلی را بر روی نمودارهای مختلف با هم مقایسه کردند [۶].

تاکاهیرو هایاشی[7] و همکاران منحنی‌های پراکندگی سرعت فاز و سرعت گروه را برای میله‌هایی با سطح مقطع مربع بدست آوردند. آنها یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی انتشار امواج هدایت شده در اجسام ارائه دادند [۷].

[1] Thomas
[2] Yong Moo Cheong
[3] Longitudinal guided waves
[4] Circumferential guided waves
[5] Gi Yoon Kim
[6] Lowe
[7] Takahiro hayashi

گولی لیو[1] و همکارانش به بررسی انتشار امواج هدایت شده‌ی محیطی در استوانه‌های با طول بسیار کم (حلقه)[2] پرداختند. آنها معادلات پراکندگی را برای این هندسه خاص و با شرایط مرزی سطح آزاد[3] به صورت تئوری بدست آورده و نتایج حل عددی را به صورت منحنی‌های طیف فرکانسی، نمودارهای سرعت فاز و سرعت گروه بر حسب فرکانس ارائه نمودند. آنها ساختار موج را در ضخامت حلقه برای پنج مود اول انتشار بدست آورده و مقایسه‌ای بین یک حلقه و یک ورق تخت با فرض شعاع انحنای بی‌نهایت انجام دادند [۸].

ایزد پناه[4] و همکاران انتشار امواج هدایت شده‌ی محوری[5]، پیچشی[6] و خمشی[7] در استوانه‌های تو خالی را مورد بررسی قرار دادند. آنها منحنی‌های پراکندگی سرعت فاز و گروه را برای استوانه‌ای تو خالی در مودهای مختلف بدست آوردند [۹].

توفیقی[8] و همکاران انتشار امواج الاستیک را در صفحات استوانه‌ای ناهمسانگرد مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات موج حاکم بر این هندسه خاص را بدست آورده، به روش خاصی این معادلات کوپل شده را با در نظر گرفتن شرایط مرزی تنش صفر در سطح داخلی و بیرونی ورق حل نموده و نمودارهای پراکندگی فرکانس بر حسب عدد موج، سرعت فاز و گروه بر حسب فرکانس را بدست آوردند [۱۰].

کریستین[9] و همکاران به بررسی امواج هدایت شده‌ی محیطی پرداختند که در یک استوانه‌ی توخالی دوبعدی با طول بی‌نهایت منتشر می‌شود. این استوانه توخالی بر روی یک شفت داخلی قرار دارد. آنها شرایط مرزی را در لایه‌ی بین شفت داخلی و استوانه‌ی بیرونی، لغزش آزاد[10] در نظر گرفته و سطح بیرونی استوانه را بدون تنش فرض نمودند. سپس نمودارهای پراکندگی را برای چند مود اول و در نهایت نیز ساختار موج را در امتداد شعاع ترسیم کردند. ایشان نشان دادند که در

[1] Guoli Liu
[2] Circular Annulus
[3] Free Traction
[4] Izadpanah
[5] Axial
[6] Torsional
[7] Flexural
[8] Towfighi
[9] Christine Valle
[10] Free Sliding

فرکانس های پایین، امواج محیطی در استوانه های لایه‌دار همانند استوانه تو پر رفتار می‌کنند و در فرکانس های بالا، مود اول به سمت موج رایلی در سطح صاف میل می‌کند [۱۱].

باشینگر[1] و همکاران انتشار امواج هدایت شده را در استوانه توخالی با یک لایه ویسکوالاستیک بررسی کردند. آنها به روش ماتریس کلی[2] به حل معادلات حاکم و تشکیل معادله‌ی پراکندگی برای مودهای طولی در لایه‌های مختلف پرداختند [۱۲و۱۳].

کوان[3] و همکاران انتشار امواج هدایت شده‌ی پیچشی در لوله‌های زیر خاک و تضعیف انرژی آنها در خلال انتشار را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با افزایش ارتفاع خاک بر روی لوله و همچنین با افزایش فرکانس ضریب میرایی[4] افزایش می‌یابد و انرژی موج منتشر شده تضعیف می‌شود [۱۴].

آریستگوی[5] و همکاران تأثیر سیال‌های مجاور لوله‌ی حاوی سیال‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها به بررسی خصوصیات انتشار موج هدایت شونده در یک لوله مسی که محیط داخلی و خارجی آن آب و یا هوا می‌باشد، پرداختند. ایشان نشان دادند که نمودارهای پراکندگی بسته به نوع سیال مجاور کمی متفاوت می‌شود. در نهایت نیز تأثیر ویسکوزیته را به صورت تئوری و تجربی برای لوله مسی حاوی روغن در معرض هوا مورد مطالعه قرار دادند [۱۵].

وان بی نا[6] و همکاران لوله‌های زیر آب را به کمک امواج هدایت شده مورد بازرسی قرار دادند. آنها حساسیت امواج هدایت شده را نسبت به سه نوع نقص متفاوت در لوله‌های زیر آب بررسی کردند و نمودارهای تضعیف انرژی امواج منتشر شده را در زوایای مختلف تحریک برای هر سه نوع ترک ترسیم کردند. آنها همچنین نشان دادند که فرکانس‌های بالا به نوع ترک حساسیت بیشتری نشان می‌دهند[۱۶].

در پژوهش حاضر به بررسی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در لوله‌های ایزوتروپیک چند لایه پرداخته شده‌است. با این فرض که لایه‌ها کاملاً به یکدیگر متصل هستند[7] و شرایط مرزی در سطح

[1] Barshinger James
[2] Global Matrix Method
[3] H. Kwan
[4] Attenuation Coefficient
[5] C. Aristegui
[6] Won Bea Na
[7] Perfectly Bounded

داخلی استوانه داخلی و سطح بیرونی استوانه بیرونی تنش صفر می‌باشد. محور استوانه در خلال انتشار موج جابجا نمی‌شود و در بین لایه‌ها که می‌توانند از دو جنس متفاوت باشند، شرط پیوستگی میدان تنش و میدان جابجایی اعمال می‌شود. هدف از این طرح استخراج منحنی‌های پراکندگی فرکانس بر حسب عدد موج، سرعت فاز بر حسب فرکانس، سرعت گروه بر حسب فرکانس و در نهایت ساختار موج در لوله‌های چند لایه می‌باشد. در این پژوهش ابتدا معادلات برای یک استوانه‌ی توپر (میله) و سپس استوانه‌ی توخالی (لوله) بررسی شده‌اند. پس از اطمینان از صحت روش و کد نوشته شده و مقایسه با مراجع، معادلات برای استوانه‌ی چند لایه حل و نمودارهای مربوطه با موفقیت استخراج شده‌اند.