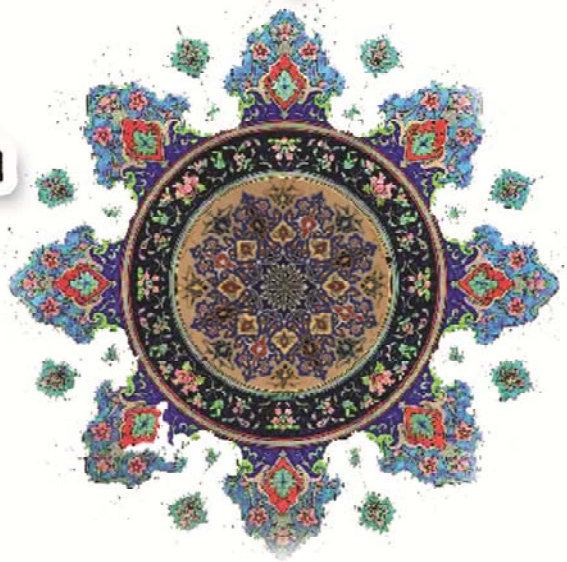
بسم الله الرحمن الرحیم



دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در ورق‌های چند لایه

پایان نامه ارائه شده به گروه مهندسی مکانیک جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

نگارنده
امین میرزاخانی نافچی

استاد راهنما
دکتر خسرو نادران طحان

استاد مشاور
دکتر شاپور مرادی

زمستان ۸۹

بسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

مدیریت تحصیلات تکمیلی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه دوره کارشناسی ارشد)

بدین وسیله گواهی می‌گردد پایان نامه آقای **امین میرزاخانی نافچی** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)** از دانشکده **مهندسی** به شماره دانشجویی **۸۷۴۰۱۱۳** تحت عنوان: **بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در ورق‌های چند لایه** جهت اخذ درجه **کارشناسی ارشد** در تاریخ **۱۳۸۹/۱۱/۳۰** توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه **عالی** تصویب گردید.

۱- اعضا هیئت داوران:	مرتبه علمی	امضا
الف - استاد راهنما: دکتر خسرو نادران طحان	دانشیار	
ب - استاد مشاور: دکتر شاپور مرادی	دانشیار	
ج – داور۱: دکتر محمد شیشه‌ساز	استاد	
د – داور ۲: دکتر افشین قنبرزاده	استادیار	
هـ – نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه: دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد	دانشیار	
۲- مدیر گروه: دکتر افشین قنبرزاده	استادیار	
۳- معاون پژوهشی دانشکده: دکتر سیدرضا علوی زارع	استادیار	
۴- مدیر کل تحصیلات تکمیلی: دکتر رحیم پیغان	استاد	

تقدیم به:

پدر بزرگوارم

به همت والای او، که بزرگواریش تکیه گاهم شد تا ایستادن را بیاموزم .

مادر دلسوزم

به فداکاری و از خودگذشتگی او، که چگونه زندگی کردن و ایستادگی در تنگناهای زندگی را به من آموخت.

همسر مهربانم

به بردباری و پایداری او، که با تحمل دشواری‌ها، سبب شد تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند.

برادر و خواهر عزیزم

به کسانی که دوست داشته می شوند به خاطر خوبی‌هایشان.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از استاد راهنمای پروژه جناب آقای دکتر خسرو نادران طحان و همچنین از استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر شاپور مرادی تشکر می‌کنم.

چکیده

نام خانوادگی: میرزاخانی نافچی	**نام:** امین
عنوان پایان نامه: بررسی و مطالعه‌ی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در ورق‌های چند لایه	
استاد راهنما: دکتر خسرو نادران طحان	**استاد مشاور:** دکتر شاپور مرادی
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** طراحی‌کاربردی
محل تحصیل(دانشگاه): شهید چمران اهواز	
دانشکده: مهندسی	
تاریخ فارغ التحصیلی:	**تعداد صفحه:** ۱۰۷
کلیدواژه ها: امواج هدایت شده فراصوت، منحنی پراکندگی، سرعت فاز و گروه، عدد موج، تست غیر مخرب، آزمون فراصوت، ورق‌های چند لایه	

در این پایان‌نامه به بررسی امواج هدایت شده‌ی فراصوت در ورق‌های ایزوتروپیک دو لایه با این فرض که لایه‌ها بدون فضای مابین، به یکدیگر متصل هستند و شرایط مرزی در سطح‌های بالا و پایین ورق به صورت تنش صفر می‌باشد، پرداخته شده‌است. هدف از این تحقیق استخراج دیاگرام‌های طیف فرکانسی (فرکانس بر حسب عدد موج)، سرعت فاز بر حسب فرکانس، سرعت گروه بر حسب فرکانس، زاویه‌ی تابش بر حسب فرکانس و در نهایت شکل مود و توزیع تنش در ورق‌های چند لایه می‌باشد. ابتدا ورق تک لایه بررسی شده و پس از اطمینان از صحت روش و کد نوشته شده با مقایسه با مراجع مختلف، به حل معادلات برای ورق دو لایه جامد-جامد و سیال – جامد پرداخته و نمودارهای ذکر شده در بالا رسم می‌شوند. با توجه به منحنی‌های پراکندگی بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس تعداد مودهای بیشتری در جسم منتشر می‌شوند که هر کدام از این مودها دارای یک شکل مود و منحنی توزیع تنش خاصی می‌باشد. در ادامه به نحوه‌ی تحریک یک مود خاص در یک فرکانس پروب برای ورق تک لایه و دو لایه پرداخته می‌شود و نمودارهای زاویه تابش بر حسب فرکانس رسم می‌شوند و نتایج برای ورق تک لایه و دو لایه مقایسه می‌شوند.

فهرست مطالب

فصل اول ۱

مقدمه ۱

فصل دوم ۳

مرور پژوهش‌های پیشین ۳

فصل سوم ۱۰

مبانی نظری پژوهش ۱۰

۳-۱ انتشار موج لمب در ورق تک لایه ایزوتروپیک ۱۰

۳-۱-۱ حل مسئله ورق آزاد توسط روش پتانسیل ۱۱

۳-۲ انتشار موج برشی افقی در ورق تک لایه ۱۴

۳-۳ انتشار موج لمب در ورق دو لایه ۱۶

۳-۳-۱ تحلیل روابط موج ۱۶

۳-۴ انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه ۲۸

فصل چهارم ۳۳

روش تحقیق ۳۳

۴-۱ استخراج منحنی پراکندگی ۳۳

۴-۲ فلوچارت برنامه‌ی رسم منحنی پراکندگی ۳۳

۴-۳ تحریک مود انتخابی از موج لمب در ورق یک لایه و دو لایه ۳۵

فصل پنجم ۳۷

نتایج، بحث وبررسی ۳۷

۵-۱ انتشار مود متقارن و پادمتقارن از موج لمب در ورق تک لایه ۳۷

۵-۲ مقایسه نتایج انتشار موج لمب در ورق تک لایه ۳۹

۵-۳ انتشار موج برشی افقی در ورق تک لایه ۴۱

۵-۴ مقایسه نتایج انتشار موج برشی افقی..... ۴۲
۵-۵ انتشار موج لمب در ورق دو لایه جامد-جامد..... ۴۴
۵-۶ انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه جامد-جامد..... ۵۰
۵-۷ انتشار موج لمب در ورق دو لایه سیال- جامد..... ۵۴
۵-۸ تحریک مودی خاص از موج لمب توسط روش آرایه‌ی فازی..... ۵۸
فصل ششم..... ۶۳
نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات..... ۶۳
۶-۱ نتیجه‌گیری..... ۶۳
۶-۲ پیشنهادات جهت ادامه کار..... ۶۴
مراجع..... ۶۵
پیوست..... ۶۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۳-۱ : هندسه‌ی ورق آزاد ۱۰
شکل ۳-۲ : انتشار موج برشی افقی در ورق تک لایه ۱۴
شکل ۳-۳ : هندسه و مشخصات ورق دو لایه ۱۶
شکل ۳-۴: انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه ۲۸
شکل ۴-۱ : استفاده از روش آرایه‌ی فازی برای تحریک یک مود خاص ۳۶
شکل ۵-۱ : انتشار الف) مود متقارن و ب) مود پادمتقارن از موج لمب در ورق ۳۷
شکل ۵-۲ : منحنی فرکانس بر حسب عدد موج برای انتشار موج لمب ۳۸
شکل ۵-۳ : منحنی سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انتشار موج لمب ۳۸
شکل ۵-۴ : منحنی سرعت گروه بر حسب فرکانس برای موج لمب ۳۹
شکل ۵-۵ : الف) ساختار موج مود $\mathbf{S_2}$ ب) توزیع تنش مود $\mathbf{S_2}$ در فرکانسهای مختلف ۴۰
شکل ۵-۶ : انتشار موج برشی افقی در ورق ۴۱
شکل ۵-۷ : منحنی فرکانس بر حسب عدد موج برای انتشار موج برشی افقی ۴۱
شکل ۵-۸ : منحنی سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انتشار موج برشی افقی ۴۲
شکل ۵-۹ : منحنی سرعت گروه بر حسب فرکانس برای انتشار موج برشی افقی ۴۲
شکل ۵-۱۰ : الف) توزیع تنش مود اول و هفتم ب) ساختار موج مود اول و هفتم برای انتشار موج برشی افقی در فرکانس‌های مختلف ۴۳
شکل ۵-۱۱ :هندسه‌ی ورق دو لایه ۴۴
شکل ۵-۱۲ : منحنی فرکانس بر حسب عدد موج برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه جامد-جامد ۴۶
شکل ۵-۱۳ : منحنی سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه جامد-جامد ۴۶
شکل ۵-۱۴ : منحنی سرعت گروه بر حسب فرکانس برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه جامد-جامد ۴۷
شکل ۵-۱۵ : الف) منحنی جابجایی در راستای عمود بر ضخامت ($\mathbf{y}$) ب) منحنی جابجایی در راستای انتشار موج ($\mathbf{z}$) برای مود اول در فرکانس‌های مختلف ۴۸
شکل ۵-۱۶ : الف) توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{22}}$ برای مود اول ب) توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{32}}$ برای مود اول در فرکانس‌های مختلف. ۴۹
شکل ۵-۱۷ : نمودار فرکانس بر حسب عدد موج برای انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه جامد-جامد..... ۵۱
شکل ۵-۱۸ : نمودار سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه جامد-جامد..... ۵۱
شکل ۵-۱۹ : نمودار سرعت گروه بر حسب فرکانس برای انتشار موج برشی افقی در ورق دو لایه جامد-جامد ۵۲
شکل ۵-۲۰ : الف) منحنی جابجایی در راستای $\mathbf{x}$ ب) توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{12}}$ برای مود سوم در فرکانسهای مختلف.. ۵۳
شکل ۵-۲۱ : نمودار فرکانس بر حسب عدد موج برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه سیال- جامد ۵۴

شکل ۵-۲۲ : نمودار سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه سیال-جامد..... ۵۵
شکل ۵-۲۳ : نمودار سرعت گروه بر حسب فرکانس برای انتشار موج لمب در ورق دو لایه سیال-جامد..... ۵۵
شکل ۵-۲۴ : منحنی جابجایی در راستای عمود بر ضخامت ($\mathbf{y}$) برای مود سوم در فرکانسهای مختلف ۵۶
شکل ۵-۲۵ : الف) توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{22}}$ ب) توزیع تنش $\boldsymbol{\sigma_{32}}$ برای مود سوم در فرکانسهای مختلف ۵۷
شکل ۵-۲۶ : هندسه‌ی گوه از جنس پرسپکس..... ۵۸
شکل ۵-۲۷: الف) زاویه تابش بر حسب فرکانس تحریک برای ورق تک لایه ب) زاویه تابش بر حسب فرکانس تحریک برای ورق دو لایه..... ۵۹
شکل ۵-۲۸ : فرکانس پروب مورد نیاز برای تحریک مود خاص در زاویه تابش ۴۰ درجه ۶۱
شکل ۵-۳۰ : تعداد مود قابل انتشار در ورق یک لایه و دو لایه در فرکانس ثابت و زوایای تابش متفاوت ۶۲
شکل ۵-۲۹ : تعداد مود قابل انتشار در ورق یک لایه و دو لایه در زوایای تابش ثابت و فرکانسهای متفاوت..... ۶۲

فهرست جداول

جدول ۵-۱ : مقایسه نتایج بدست آمده برای انتشار موج لمب در ورق تک لایه توسط برنامه نوشته شده در متلب و مرجع [۱۲]..... ۳۹
جدول ۵-۲ : مقایسه نتایج بدست آمده برای انتشار موج برشی افقی در ورق تک لایه توسط برنامه نوشته شده در متلب و مرجع [۲]..... ۴۳
جدول ۵-۳ : زاویه تابش مورد نیاز جهت تولید ۴ مود اول در ورق یک لایه برای گوه‌ی پرسپکس..... ۶۰
جدول ۵-۴ : زاویه تابش مورد نیاز جهت تولید ۴ مود اول در ورق دو لایه برای گوه‌ی پرسپکس..... ۶۰

فهرست علامت‌ها

ماتریس ضرایب معادله‌ی مشخصه مربوط به انتشار موج لمب	A
i امین مود پادمتقارن انتشار یافته از موج لمب در ورق تک لایه	A_{i}
ماتریس ضرایب معادله‌ی مشخصه مربوط به انتشار موج برشی افقی	B
سرعت گروه	c_g
سرعت موج طولی	c_L
سرعت فاز	c_p
سرعت موج عرضی	c_T
سرعت موج در گوه	c_w
ضخامت کل ورق تک لایه	d
ماتریس مجهولات معادله‌ی مشخصه مربوط به انتشار موج برشی افقی	F
بسامد	f
بردار نیروی حجمی در راستای i	f_{i}
ضخامت کل ورق دو لایه	h
عدد موج در راستای انتشار موج هدایت شده	k
عدد موج در راستای انتشار موج طولی	k_{L}
عدد موج در راستای انتشار موج عرضی	k_{T}
m امین مود انتشار یافته از موج لمب و برشی افقی در ورق دو لایه	m
n امین مود انتشار یافته از موج برشی افقی در ورق تک لایه	n
عدد موج طولی در راستای ضخامت ورق	p
عدد موج عرضی در راستای ضخامت ورق	q
i امین مود متقارن انتشار یافته از موج لمب در ورق تک لایه	s_{i}

بردار جابجایی در راستای i	u_{i}
ماتریس مجهولات معادله‌ی مشخصه مربوط به انتشار موج لمب	Y
زاویه‌ی برخورد موج به سطح گوه نسبت به خط عمود بر سطح گوه	α
زاویه‌ی برخورد موج به پایه گوه نسبت به خط عمود بر پایه گوه	β
زاویه انتشار موج طولی نسبت به محور عمود بر ضخامت	θ_L
زاویه انتشار موج عرضی نسبت به محور عمود بر ضخامت	θ_T
ضریب لامه	λ
طول موج، موج انتشار یافته در جسم	λ_{trace}
ضریب لامه	μ
چگالی جسم	ρ
تنش	σ
تابع پتانسیل اسکالر	ϕ
تابع پتانسیل برداری	ψ
فرکانس زاویه‌ای	ω
عملگر گرادیان	∇
عملگر دیورژانس	$\nabla.$
عملگر کرل	$\nabla\times$
عملگر لاپلاسین	∇^2
عملگر مشتق	∂

فصل اول

مقدمه

بررسی و آزمایش‌های قطعات صنعتی مانند ساختارهای چند لایه به وسیله آزمون‌های غیر مخرب[۱] یکی از مراحل مهم صنایع امروز دنیا است. ایمنی قطعات صنعتی ایجاب می‌نماید که به نحوی در مورد سالم بودن قطعات ساخته شده آزمون هایی به عمل آید. یکی از آزمون‌های غیر مخربی که امروزه بسیار از آن استفاده می‌شود، تست امواج فراصوت[۲] می‌باشد.

در ورق‌هایی که دارای ضخامت ناچیز در قیاس با طول موج می‌باشند، از تداخل بازگشت‌های متعددی که موج‌های طولی و عرضی از سطح آزاد ورق دارند، موج‌های لمب[۳] یا هدایت شده[۴] تشکیل می‌شود. علاوه بر انتشار مودهای موج لمب در ورق‌ها با ضخامت ناچیز، موج برشی افقی نیز می‌تواند در جسم منتشر شود.

امواج لمب و برشی افقی[۵] دارای خاصیت پراکندگی می‌باشند به طوریکه سرعت فاز[۶] و سرعت گروه[۷] این امواج علاوه بر خصوصیات ماده به هندسه و مشخصات موج بستگی دارند. هنگامیکه یک ضربه به صورت هارمونیک بر روی سطح ورق نواخته شود، تمامی مودها در فرکانس تحریک، در ورق منتشر می‌شوند. رفتار پراکندگی مودهای منتشر شده در ورق باعث می‌شود که مودها در زمان‌های مختلفی به عیب یا ناپیوستگی برخورد کنند به همین دلیل استخراج اطلاعات مورد نیاز

---

[۱] Non Destructive Testing (NDT)

[۲] Ultrasonic Testing (UT)

[۳] Lamb waves

[۴] Guided Wave

[۵] Shear Horizental Wave (SH Wave)

[۶] Phase Velocity

[۷] Group Velocity

از سیگنال‌های منعکس شده از مرز عیب کاری مشکل می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل نیاز است تا فقط مود خاصی از موج در ورق منتشر شود، برای این کار نیاز به رسم منحنی‌های پراکندگی ناشی از انتشار موج در جسم می‌باشد، زیرا تاثیر عوامل مختلفی همچون ضخامت، فرکانس تحریک و زاویه‌ی تابش موج بر روی انتشار مودهای مختلف در منحنی پراکندگی نمایش داده می‌شوند. از آنجا که هر یک از نقاط منحنی پراکندگی می‌توانند برای انجام یک تست غیر مخرب فراصوت به کار گرفته شوند، لذا رسم منحنی‌های پراکندگی برای انجام یک تست فراصوت موفق در اجسام الزامی می‌باشد. همچنین هر یک از نقاط منحنی پراکندگی به یک عیب خاص حساس‌تر می‌باشند، مثلا تعدادی از این نقاط به عیوب داخلی، تعدادی به عیوب سطحی، تعدادی به عیوب پوششی روی جسم و غیره حساس‌تر هستند، که این حساسیت به نوع عیب، توسط منحنی‌های جابجایی و تنش مشخص می‌شوند. لذا رسم منحنی‌های جابجایی و تنش در انجام تست غیر مخرب فراصوت از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

این پژوهش بر مبنای انتشار امواج در ورق‌های ایزوتروپیک با خاصیت الاستیک استوار می‌باشد. در این راستا ابتدا به بررسی مسئله‌ی انتشار امواج لمب و برشی افقی در ورق یک لایه پرداخته شد، پس از بررسی این هندسه، بدلیل کاربرد زیاد ورق‌های 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 امواج هدایت شده فراصوت بیان می‌شود. فصل دوم به مروری بر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌پردازد. در فصل سوم معادلات حاکم بر انتشار امواج در ورق یک لایه و دو لایه بیان می‌شود. در فصل چهارم نحوه‌ی بدست آوردن ریشه‌های معادلات فرکانسی مربوط به ورق دولایه توضیح داده می‌شود. در فصل پنجم نمودارهای پراکندگی[1] طیف فرکانس، سرعت فاز، سرعت گروه، زاویه‌ی تابش، نمودارهای جابجایی و تنش‌ها که از معادله‌ی فرکانسی بدست آورده می‌شوند، نشان داده می‌شوند. همچنین 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 پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ارائه می‌گردد.

[1] Dispersion Curve

فصل دوم

مرور پژوهش‌های پیشین

در این فصل، مقالات مرور شده به سه دسته کلی تقسیم بندی می‌شود. ابتدا مقالاتی پیرامون کاربردهای امواج هدایت شده‌ی فراصوت و اهمیت آنها در بازرسی‌های غیر مخرب مرور می‌شود. 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 بیان شده است.

پس از آنکه ریلی[۱] و لمب[۲] بیش از یک صد سال پیش مطالعات نظری خود پیرامون امواج صوتی در یک شیء محدود را ارائه دادند، محققان دیگری توانستند مطالعه بر روی امواج هدایت شده، از جمله امواج لمب و امواج برشی افقی در ورق‌ها را ادامه دهند. پس از مدتی استفاده از امواج هدایت شده در ارزیابی غیر مخرب به یک تکنیک جذاب و با کاربرد گسترده تبدیل شد. بعدها کتاب هایی در این زمینه توسط گراف[۳]، رز[۴]، منتشر شد [۲-۱].

لو[۵] و رز [۳]، از فرستنده الکترومغناطیسی، بدون آنکه تماسی با سطح جسم داشته باشد، برای اندازه گیری ضخامت و رسم نمودارهای پراکندگی استفاده کردند. آنها در این پژوهش از فرستنده‌های الکترومغناطیسی برشی افقی و لمب برای تولید موج‌های برشی افقی و لمب در ورق و لوله از جنس فولاد ضد زنگ استفاده کرده و منحنی پراکندگی مربوط به هر یک از این موج‌ها را

---

[۱] Rayleigh

[۲] Lamb

[۳] Graff

[۴] Rose

[۵] Luo

رسم کردند. در ادامه از ترنسدیوسرهای الکترومغناطیسی برشی افقی بر اساس ارتباط بین تغییرات فرکانس قله بر حسب تغییرات ضخامت، برای اندازه‌گیری ضخامت یک ورق که به چهار قسمت با ضخامت‌های مختلف تقسیم شده بود استفاده کردند.

پالاکیوس[۱] و همکاران [۴]، از روش جدید غیر حرارتی و غیر مخرب جهت یخ زدایی پره‌ی هلیکوپتر استفاده کردند. با توجه به محاسبات تئوری انجام شده و رسم منحنی‌های توزیع تنش نتیجه شد که مودهای فراصوت خاصی که ناشی از انتشار موج برشی افقی[۲] در جسم می‌باشند، دارای تنش‌های بزرگی در سطح مشترک بین پره‌های هلیکوپتر و لایه یخ تشکیل شده روی این پره می‌باشند.

ژو[۳] و همکارانش [۵]، از موج‌های هدایت شده فراصوت، برای تشخیص میزان اتصال بین پوسته رویی و لایه‌ی کندویی زیرین یک پره‌ی هلیکوپتر استفاده کردند. در این پژوهش روابط پراکندگی برای موج‌های هدایت شده در لبه پشتی پره‌ی هلیکوپتر، به کمک روش ماتریس کلی[۴] استخراج شد، سپس با استفاده از شبیه سازی المان محدود توانایی تشخیص نقص توسط موج‌های هدایت شده را نشان دادند. همچنین آنها با انجام آزمایش بر روی بخشی از پره هلیکوپتر، تاثیر ناپیوستگی در اتصال لایه ها، بر روی انرژی امواج فراصوت عبوری از سرتاسر پره را بررسی کردند.

لو[۵] و همکاران [۶]، اثر موج‌های لمب با فرکانس‌های متفاوت را بر روی یک ورق آلومینیومی که دارای ترک‌هایی با اندازه‌های متفاوت در راستای ضخامت بود، به کمک دو روش المان محدود و تجربی بررسی کردند. برای بررسی ساده‌تر مساله از یک مجموعه دو تایی ترنسدیوسرهای پیزوالکتریک برای تولید مود S_0 استفاده کردند. در ادامه به کمک تبدیل هیلبرت[۶]، اثر طول ترک بر روی ضرایب انتقال و بازتاب و همچنین اثر طول موج لمب و تجزیه موج نیز بر روی ضرایب انتقال و بازتاب بررسی شد.

---

[۱] Jose L. Palacios

[۲] Shear Horizontal Wave (SH Wave)

[۳] Q.I. Xue

[۴] Global Matrix Method (GMM)

[۵] Ye Lu

[۶] Hilbert Transform

هو[۱] و ریس[۲] [۷]، به بازرسی شیشه‌های ایمنی با فرض اینکه سطح مشترک بین لایه‌ها ناقص باشند، به دو روش مخرب و غیر مخرب پرداختند. سطح مشترک ناقص بین لایه‌ی پلاستیکی و دو ورق شیشه‌ای مماس با این لایه توسط مجموعه‌ای از فنرهای پیچشی و طولی مدل سازی شد. با مقایسه سرعت انرژی موج بدست آمده برای مدل تئوری ذکر شده و نتایج عملی بدست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی، نتیجه شد که روش سرعت انرژی موج می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب، جهت تخمین میزان چسبندگی بین لایه‌های شیشه‌های ایمنی به کار برده شود. همچنین با توجه به منحنی پراکندگی و جابجایی، نتیجه شد که مود S_0 در فرکانس ۵۰۰ کیلو هرتز بهترین مود برای بازرسی غیر مخرب شیشه‌های ایمنی می‌باشد.

ریاحی و ابولحسنی [۸]، مزایا و معایب روش زمان تفرق موج برخوردی[۳] به عیب را معرفی کرده و پس از آن مدل ریاضی از این روش بیان کردند. در این مدل با داشتن زمان رسیدن موج تفرق یافته از نوک عیب، می‌توان اندازه و محل عیب را تشخیص داد. در ادامه آزمایشات عملی بر روی سه قطعه با شکاف مصنوعی، که به ترتیب در سطح زیری، رویی و داخلی قطعه در نظر گرفته شده بودند، انجام داده و نتایج این بازرسی را نمایش دادند.

رز و همکارانش [۹]، از امواج هدایت شده فراصوت برای تشخیص عیوب در قطعات مورد استفاده در صنعت هواپیماسازی استفاده کردند. از جمله مدل‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در این مقاله می‌توان از ترک در پره‌های هلیکوپتر، خوردگی و ترک در اجسام چند لایه به کاربرده شده در ساختار هواپیما، ترک در چرخ‌های فرودی هواپیما، تشخیص نازک شدن دیواره‌های هواپیما و بررسی اتصال بین هسته و پوسته در ساختارهای مشبک نام برد. همچنین آنها از روش تنظیم فرکانس و سرعت فاز برای بهینه کردن فرایند تشخیص عیب مورد نظر استفاده کردند.

دمنکو[۴] و مازیکا[۵] [۱۰]، به بررسی روش‌های رسم منحنی پراکندگی برای یک ورق تک لایه و چند لایه پرداختند. در ابتدا روش بدست آوردن معادله حاکم بر موج لمب در یک ورق تک لایه را

---

[۱] S. Huo

[۲] H. Reis

[۳] Time Of Flight Diffraction (TOFD)

[۴] A. Demcenko

[۵] L. Mazeika

بیان کرده و در ادامه به معرفی روش‌های عددی و ماتریسی جهت رسم منحنی پراکندگی برای یک ساختار چند لایه و مزیت‌ها و معایب این روش‌ها پرداختند.

توفیقی و همکاران [۱۱]، انتشار امواج الاستیک را در پوسته‌های ناهمسانگرد مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات موج حاکم بر این هندسه خاص را بدست آوردند، سپس این معادلات را با در نظر گرفتن شرایط مرزی تنش صفر در سطح داخلی و بیرونی پوسته حل کردند و نمودارهای پراکندگی فرکانس بر حسب عدد موج، سرعت فاز و گروه بر حسب فرکانس را بدست آوردند.

رز [۱۲]، موارد استفاده از امواج هدایت شده فراصوت در صنعت، همچنین مزیت‌های استفاده از این امواج در بازرسی قطعات صنعتی را بیان کرد. سپس به بررسی انتشار موج هدایت شده در ورق تک لایه و میله با سطح مقطع مختلف (ریل آهن) پرداخت و منحنی پراکندگی سرعت فاز و سرعت گروه را برای سطح بالایی ریل آهن و ورق تک لایه رسم کرد. در ادامه همچنین نمودارهای جابجایی را برای یک ورق تک لایه آلومینیومی رسم کرد.

چن[۱] و همکاران [۱۳]، رفتار پراکندگی موج‌ها را در یک ورق ایزوتروپ که مشخصات ذرات در راستای ضخامت تغییر می‌کرد (ورق FGM[۲])، مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل مساله، ورق FGM را توسط یک ورق چند لایه با تعداد لایه مناسب و همگن تخمین زدند. سپس با استفاده از روش ماتریس پژواک[۳] که در این روش بر روی هر لایه دو محور مختصات محلی قرار داده می‌شود، منحنی پراکندگی سرعت فاز را برای ورق چند لایه معادل رسم کردند. در نهایت نتایج حاصل از روش ماتریس پژواک را با نتایج حاصل از دو روش فضای حالت[۴] و روش جابجایی مرسوم[۵] مقایسه کردند.

هنرور و همکاران [۱۴]، یک روش جدیدی برای رسم منحنی پراکندگی ارائه دادند که برای آن، حل معادله فرکانس به فرم منحنی پراکندگی، از نمایش سه بعدی معادله فرکانس استخراج می‌شود. آنها به منظور استفاده از این روش، یک نمایش سه بعدی از ریشه‌های حقیقی معادله‌ی

---

[۱] W.Q. Chen

[۲] Functionally Graded Material

[۳] Reverberation Matrix Method (RMM)

[۴] State Space Method (SSM)

[۵] Traditional Displacement Method (TDM)

فرکانس رسم کردند و با ایجاد یک برش مناسب در صفحه‌ی فرکانس- سرعت، منحنی پراکندگی سرعت فاز را بر حسب فرکانس بدست آوردند. آنها برای مقایسه این روش با روش‌های عددی دیگر، منحنی پراکندگی یک لوله‌ی متشکل از مواد مرکب اپوکسی- شیشه را که فقط در راستای ضخامت ایزوتروپ می‌باشد به کمک این روش رسم کردند و با نتایج بدست آمده توسط محققان دیگر مقایسه کردند. مقایسه‌ها نشان دادند که این روش نسبت به روش‌های عددی به کار برده شده توسط محققان دیگر سریعتر و ساده‌تر می‌باشد.

دسچامپس[۱] و همکاران [۱۵]، پس از رسم منحنی پراکندگی یک ورق آلومینیومی به تفسیر آن پرداختند. آنها با توجه به منحنی پراکندگی نشان دادند که تمام مودها به غیر از دو مود S_0 و A_0 دارای یک فرکانس قطع[۲] می‌باشند بطوریکه برای انتشار هر مود، فرکانس تحریک باید از فرکانس قطع مربوط به آن مود بیشتر باشد. در ادامه برای نشان دادن خواص فیزیکی موج لمب منحنی پراکندگی را برای یک لایه سیال در فضا $(C_T=0)$ و یک لایه مصنوعی در فضا، که فقط می‌توانست موج عرضی را تحمل کند $(C_L=0)$ به طور جداگانه رسم کردند. با روی هم گذاری این منحنی‌ها، منحنی متفاوت با منحنی پراکندگی موج لمب بدست آوردند، که این بیانگر آن است که در موج لمب دو موج طولی و عرضی برای ارضای شرایط مرزی در مرزها با هم کوپل می‌شوند در حالیکه با جدا در نظر گرفتن آنها این کوپل نادیده گرفته می‌شود.

ژونگ[۳] و رز [۱۶]، با تنظیم فرکانس و سرعت فاز[۴] نشان دادند که مودهای موج لمب می‌توانند نتایج بهتری برای تشخیص عیوب در یک ورق نازک آلومینیومی داشته باشند. آنها با انجام آزمایشات عملی تنظیم سرعت فاز مشاهده کردند که اولین مود متقارن S_0، و اولین مود پادمتقارن A_0، در فرکانس حدود ۸۴۰ کیلوهرتز، می‌توانند مودهای مناسب جهت تشخیص عیوب در یک ورق آلومینیومی با ضخامت ۲/۴ میلی متر باشند.

---

[۱] M. Deschamps

[۲] Cut off Frequency

[۳] H.D Jeong

[۴] Phase Velocity