

## امواج لمب و کاربرد آنها در ارزیابی غیرمخرب

فرهنگ هنرور\*

استاد دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

honarvar@kntu.ac.ir

عادل صداقتی

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

adel.sedaghati@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

### چکیده

امواج لمب یا امواج ورقی از امواج هدایت شده مکانیکی اند که در ورق‌ها انتشار می‌یابند. در این مقاله ضمن بررسی خواص این امواج، تفاوت این امواج با سایر امواج مکانیکی بررسی می‌شود و مزایا و معایب آنها نسبت به سایر امواج مورد بحث قرار می‌گیرد. امواج لمب دارای خاصیت دیسپرژن<sup>۱</sup> هستند؛ یعنی سرعت آنها وابسته به فرکانس است. این خاصیت امواج لمب، که بسیار پراهمیت است، در این مقاله بررسی و روش‌های متداول تولید و دریافت امواج لمب و کاربردهای آنها در صنایع مختلف ارائه و شماری از پژوهش‌های انجام شده در خصوص امواج لمب در زمینه‌های نظری، تجربی، روش اجزای محدود و پردازش سیگنال به اختصار مرور خواهد شد. هرچند در این مقاله کاربردهای متنوع امواج لمب مورد بحث قرار خواهند گرفت، اما رویکرد مقاله پیش رو بیشتر معطوف به کاربرد امواج لمب در ارزیابی غیرمخرب قطعات است.

**واژگان کلیدی:** امواج مکانیکی، امواج لمب، امواج فراصوتی، دیسپرژن، پردازش سیگنال

### ۱. مقدمه

ارزیابی غیرمخرب<sup>۲</sup> قطعات صنعتی از جمله الزامات صنایع امروز است. در این روش‌ها بدون اینکه آسیبی به قطعه وارد شود و یا خللی به عملکرد آن وارد آید، ارزیابی صورت می‌گیرد. با توجه به گستردگی نیازها در صنایع گوناگون، روش‌های ارزیابی غیرمخرب گوناگونی نیز ابداع شده است. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، ارزیابی غیرمخرب با استفاده از امواج فراصوتی است. به‌طور کلی امواج فراصوتی به سه دسته امواج حجمی<sup>۳</sup>، ریلی<sup>۴</sup> (سطحی<sup>۵</sup>) و لمب<sup>۶</sup> (ورقی<sup>۷</sup>) تقسیم می‌شوند. در یک ارزیابی غیرمخرب

فراصوتی، هر یک از این امواج برای هدف و کاربرد خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۲. تاریخچه امواج لمب

امواج لمب یا امواج ورقی، در سال ۱۹۱۷ م، توسط هوراس لمب<sup>۸</sup> در ادامه تحقیقات لرد ریلی<sup>۹</sup> شناسایی شدند و وجود این امواج نخستین بار در مقاله‌ای با عنوان /امواج در ورق الاستیک توسط لمب به چاپ رسید [۱]. در آن زمان به علت پیچیدگی فیزیک این امواج، این مقاله از سوی مجامع

علمی مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۴۵ م، در پژوهش آزیبورن و هارت<sup>۱۰</sup> معلوم شد که این امواج در سازه‌های زیر دریا در اثر انفجار ایجاد می‌شوند. بعد از این بود که بسیاری از ویژگی‌های منحصر به فرد این امواج شناسایی و پژوهش‌های متنوعی در رابطه با امواج لمب انجام شد. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به کارهای فایرستون و لینگ<sup>۱۱</sup> اشاره کرد [۲].

## ۲-۱. ماهیت امواج لمب

امواج لمب عضوی از خانواده امواج هدایت‌شده<sup>۱۲</sup> هستند که برای انتشار خود نیاز به دو مرز آزاد دارند. این امواج از مسیر مرزها پیروی می‌کنند و می‌توانند در فواصل طولانی و با حداقل میرایی انتشار یابند. با توجه به اینکه این امواج معمولاً در ورق‌های نازک (در مقایسه با طول موج آنها) منتشر می‌شوند، به آنها امواج ورقی نیز گفته می‌شود. امواج لمب از تداخل امواج طولی و عرضی در زاویه‌های تابش مشخصی ایجاد می‌شوند. وقتی موج در یک ورق انتشار می‌یابد، با مرز ورق برخورد می‌کند و در هنگام بازتابش دچار تغییر حالت<sup>۱۳</sup> می‌شود و در نتیجه هر دو موج طولی و عرضی بازتابیده می‌شوند. روند بازتابش متوالی برای این امواج طولی و عرضی تکرار می‌شود (شکل ۱) تا جایی که دیگر امواج طولی و عرضی از هم قابل تفکیک نبوده و فقط یک الگوی تداخلی وجود دارد که کل ورق را به ارتعاش درمی‌آورد. به همین دلیل، در اثر تداخل‌های مختلف مدهای متفاوتی از امواج لمب ایجاد می‌شوند. در مقایسه امواج لمب با امواج حجمی می‌توان گفت که امواج حجمی می‌توانند از مرزهای جسم کاملاً دور باشند، اما امواج لمب برای انتشار به دو مرز آزاد نیاز دارند. هرچند تماس‌هایی با مرزها صورت می‌گیرد که سبب شکست، بازتاب و تغییر حالت امواج طولی به عرضی و بالعکس می‌شود، اما از نظر اصولی این دو نوع موج با هم متفاوت‌اند. با اینکه معادلات حاکم بر امواج حجمی و لمب شباهت‌های زیادی دارند، اما به علت وجود شرایط مرزی متفاوت، در حل این معادلات

تفاوت‌های زیادی وجود دارد. تفاوت دیگر امواج لمب و امواج حجمی تعداد مدهای ایجاد شده است. در امواج حجمی تعداد محدودی مد (طولی، عرضی) وجود دارد، حال آنکه در امواج لمب تعداد مدها نامحدود است. به عبارت دیگر در یک جسم محدود تعداد نامحدودی مدهای موج لمب می‌توانند ایجاد شوند. علاوه بر این سرعت انتشار امواج لمب در ورق به فرکانس و هندسه آن وابسته است، در صورتی که هر یک از دو موج طولی و عرضی سرعت انتشار ثابتی دارند که فقط به خواص ماده وابسته است [۳]. برای استفاده مناسب از امواج لمب باید ویژگی‌ها و محدودیت‌های آن به‌طور کامل شناخته شود. ویژگی‌های امواج لمب در کاربردهای ارزیابی غیرمخرب به شرح ذیل است:

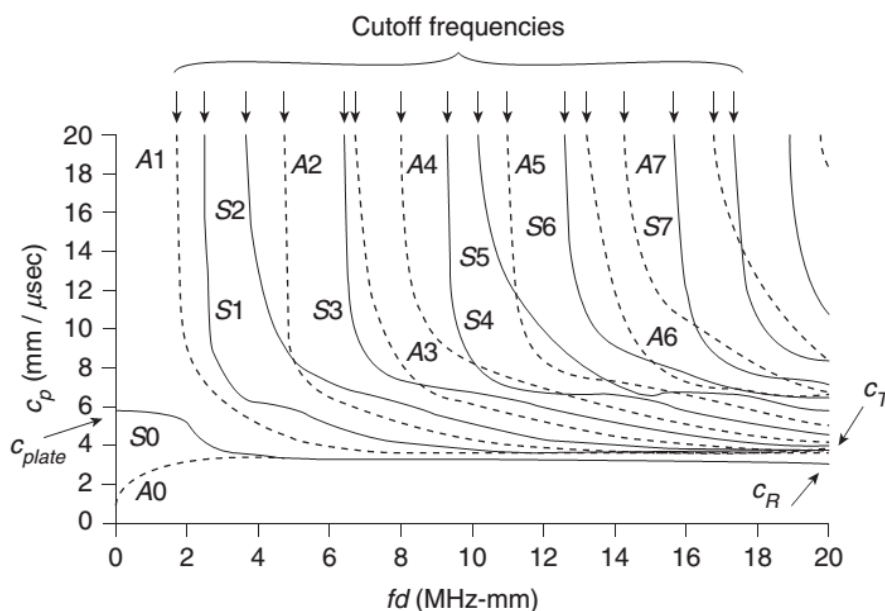
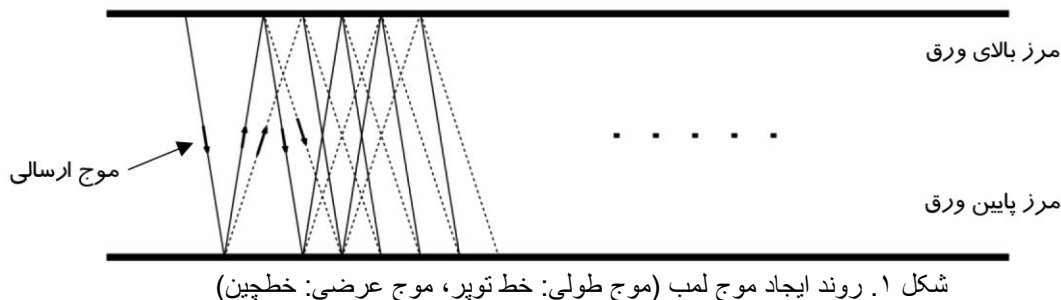
۱. استهلاک کم در مقایسه با سایر امواج
  ۲. توانایی بازرسی سطوح بسیار بزرگ
  ۳. توانایی بازرسی سطوح منحنی
  ۴. قابلیت شناسایی عیوب داخلی و سطحی با حساسیت بالا
  ۵. امکان دسته‌بندی عیوب با استفاده از مدهای مختلف موج لمب
  ۶. امکان بازرسی بخش‌های روکش‌دار، قطعات در زیر آب و زیر خاک
- در کنار مزایای امواج لمب، محدودیت‌هایی نیز برای آنها وجود دارد که عبارت است از:
۱. پیچیده بودن سیگنال موج لمب
  ۲. تأثیر شدید عوامل محیطی از جمله دما، ارتعاشات سازه و جز این‌ها بر روی موج لمب
  ۳. نیاز به پردازش سیگنال برای نتیجه مناسب

## ۲-۲. دیسپرژن

به وابستگی سرعت انتشار موج به فرکانس دیسپرژن گفته می‌شود. ایجاد دیسپرژن به جنس و هندسه ماده وابسته است. امواج لمب با توجه به اینکه در ورق‌ها ایجاد و منتشر می‌شوند، دارای خاصیت دیسپرژن هستند. این خاصیت

برای هر مد) برحسب سرعت فاز یا گروه و فرکانس نمایش داده می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی‌های دیسپرز برای ورق‌های آلومینیوم نمایش داده شده است.

منجر به ایجاد مدهای انتشاری موج لمب می‌شود، به نحوی که در هر فرکانس مدهای متفاوتی منتشر می‌شوند. خاصیت دیسپرز توسط بی‌نهایت منحنی (یک منحنی



شکل ۲. منحنی دیسپرز برای ورق آلومینیوم [۴]

به آن معادله دیسپرز<sup>۱۵</sup> می‌گویند، به دست می‌آید [۳]. تاکنون نرم‌افزارهای متعددی برای رسم منحنی دیسپرز برای مواد گوناگون از جمله مواد ناهمسانگرد تولید شده است. در این میان می‌توان به نرم‌افزارهای دیسپرس<sup>۱۶</sup> [۵]، پک شیر<sup>۱۷</sup> [۶]، والن<sup>۱۸</sup> [۷] و گوپگو<sup>۱۹</sup> [۸] اشاره کرد. برخی از این نرم‌افزارها براساس روش المان محدود شبه‌تحلیلی<sup>۲۰</sup>، که امکان بررسی طیف گسترده‌ای از مواد و هندسه‌های مختلف را فراهم می‌سازد، کار می‌کنند. علاوه بر روش‌های رسم عددی، یک روش رسم گرافیکی نیز به‌تازگی ابداع

معمولاً منحنی دیسپرز به صورت بی‌بعد شده رسم می‌شود که تنها وابسته به جنس ماده ورق است و می‌توان از آن برای ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف استفاده کرد. یکی از کاربردهای عمده منحنی دیسپرز تعیین شرایط لازم برای تولید مد مشخصی از امواج لمب است. علاوه بر این اگر منحنی دیسپرز براساس سرعت گروه<sup>۱۴</sup> رسم شود، شناسایی مدها از روی این منحنی ممکن می‌شود. منحنی دیسپرز به خواص الاستیسته هر ماده وابسته است. این منحنی از حل عددی رابطه‌ای بین عدد موج و فرکانس، که

شده است که با سرعت بسیار بالایی امکان رسم منحنی دیسپرژن را ممکن می‌سازد؛ هرچند این روش محدودیت‌هایی نیز دارد [۹]. چنانچه با استفاده از معادله دیسپرژن تغییرات فرکانس برحسب عدد موج رسم شود، به آن منحنی طیف فرکانسی<sup>۲۱</sup> گفته می‌شود. در این منحنی به محل تقاطع منحنی با محور عمودی فرکانس قطع<sup>۲۲</sup> گفته می‌شود. در منحنی دیسپرژن نیز فرکانسی که در آن منحنی‌ها با محور عمودی مجانب می‌شوند، متناظر با این فرکانس قطع است. در حالت کلی امواج لمب به دو نوع مد متقارن ( $S_i$ ) و نامتقارن ( $A_i$ ) تقسیم می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۲ نمایش داده شده است، دو مد اولیه  $S_0$  و  $A_0$  در فرکانس‌های بالا به یک مجانب افقی متناظر با سرعت موج ریلی ( $C_R$ ) و سایر مدها به مجانبی افقی متناظر با سرعت موج عرضی ( $C_T$ ) میل می‌کنند. مد  $S_0$  در فرکانس‌های پایین تقریباً موازی محور افقی است. این امر بدین معناست که در این محدوده سرعت فاز با تغییرات فرکانس تغییر نمی‌کند و دیسپرژن حداقل است. از اینرو معمولاً برای بازرسی قطعات از امواج لمب در فرکانس‌های پایین استفاده می‌شود. در فرکانس‌های بالاتر علاوه بر غیرخطی بودن مدها، معمولاً چندین مد همزمان ایجاد می‌شود که سبب افزایش پیچیدگی بازرسی قطعات می‌شود. در نمودار دیسپرژن، محور افقی برحسب  $fd$  (فرکانس در ضخامت) است. با افزایش ضخامت در فرکانس ثابت تعداد مدهای ایجادشده افزایش می‌یابد و برای رسیدن به محدوده غیر دیسپرسیو باید فرکانس را کاهش داد. اما کاهش فرکانس منجر به کاهش تفکیک‌پذیری در شناسایی عیوب می‌شود. این امر یکی از دلایل محدودیت امواج لمب در شناسایی عیوب در ورق‌های با ضخامت بالا است. به‌تازگی تحقیقاتی در زمینه استفاده از مدهای غیرخطی امواج لمب برای بازرسی قطعات انجام شده است که بر افزایش دقت در استفاده از این مدها تأکید دارند [۱۰-۱۳].

### ۳-۲. روش‌های ارسال و دریافت امواج لمب

برای تولید و دریافت امواج لمب از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به پروب‌های فراصوتی<sup>۲۳</sup>، بلوره‌های پیزوالکتریک<sup>۲۴</sup>، فراصوت لیزری<sup>۲۵</sup> و تراگذارهای بین‌انگشتی<sup>۲۶</sup> اشاره کرد. در ادامه هر یک از این روش‌ها به اختصار تشریح می‌شوند.

#### ۲-۳-۱. پروب‌های فراصوتی

ساختمان یک پروب فراصوتی پیزوالکتریک شامل یک بلوره پیزوالکتریک، ماده پش‌بند<sup>۲۷</sup> و لایه تطابق<sup>۲۸</sup> است. پروب در یک زاویه تابش معین، مد خاصی از امواج لمب را در ورق ایجاد می‌کند. معمولاً موقعیت‌دهی پروب در زاویه معین توسط کفشک‌های گوه‌ای شکلی از جنس پرسپکس<sup>۲۹</sup> با زاویه ثابت یا متغیر صورت می‌گیرد. این تراگذارها، به دلیل دقت خوبی که دارند، برای تولید امواج لمب بسیار مناسب‌اند [۲]. در شکل ۳ نمونه‌ای از تراگذار تماسی زاویه متغیر نمایش داده شده است.



شکل ۳. تراگذار (پروب) تماسی زاویه متغیر

#### ۲-۳-۲. بلوره‌های پیزوالکتریک

در این روش المان‌های پیزوالکتریک به‌طور مستقیم روی سطح قطعه چسبانده می‌شوند. در نتیجه ارتعاش المان‌ها موج لمب در ورق ایجاد می‌شود. بلوره‌های به‌کار رفته در این حالت معمولاً از نوع تیتانات زیرکونات سرب<sup>۳۰</sup> هستند [۱۴]. این بلوره‌ها محدوده فرکانسی گسترده، امپدانس

اکوستیکی کم و قیمت پایینی دارند. مشکلی که در این روش وجود دارد، ایجاد همزمان چندین مد به طور همزمان است. همچنین، در دمای بالا بلوره از خود رفتارهای غیرخطی نشان می‌دهد، هرچند این مشکل با استفاده از پیزوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف قابل حل است [۱۵]. در شکل ۴ انواع متداول بلوره‌های پیزوالکتریک نمایش داده شده است.

### ۲-۳-۳. فراصوت لیزری

ارسال امواج توسط امواج لیزر و دریافت امواج توسط تداخل‌سنج لیزری<sup>۳۱</sup> یکی از روش‌های غیرتماسی برای ارسال و دریافت امواج لمب است. به علت کنترل‌پذیری این روش، امکان تولید موج با باند فرکانسی پهن یا باریک وجود دارد. این روش به طور مؤثر برای سطوح غیرمنظم، هندسه‌های پیچیده یا محیط‌های سخت، که امکان تماس مستقیم تراگذار با قطعه کار وجود ندارد، استفاده می‌شود [۲]. در شکل ۵ مجموعه تجهیزات مورد استفاده برای ارسال و دریافت امواج فراصوتی، توسط روش فراصوت لیزری نمایش داده شده است.

### ۲-۳-۴. تراگذارهای بین‌انگشتی

این نوع تراگذار متشکل از یک ماده نازک پیزوالکتریک پلی وینیل فلوراید<sup>۳۲</sup> و الکترودهایی با چینش مشخص است. با طراحی دقیق الکترودها و تنظیم فاصله بین الکترودها، یک مد خاص موج لمب با پهنای باند و طول موج دلخواه را می‌توان تولید کرد. این تراگذارها به راحتی شکل گرفته و خود را با انحنای سطح هماهنگ می‌کنند. در بیشتر مطالعات انجام‌شده، این تراگذارها به علت مدول الاستیسیته کم و رفتار ویسکوالاستیک، فقط به عنوان گیرنده استفاده شده‌اند [۱۸]. در شکل ۶ نمونه‌ای از این تراگذار نمایش داده شده است. پلی وینیل فلوراید به طور مشخص به فاکتورهای محیطی به خصوص دما حساس

است و به همین علت اغلب به عنوان دماسنج نیز از آن استفاده می‌شود.

### ۲-۴. کاربردهای امواج لمب

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد امواج لمب، این امواج در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. عمده‌ترین کاربرد امواج لمب شناسایی موقعیت و مشخصات عیوب در قطعات است. با شناسایی بیشتر ویژگی‌های امواج لمب، کاربردهای جدیدتری نیز برای آنها تعریف شده است. در همین راستا می‌توان کاربردهای جدید زیر را برای امواج لمب برشمرد.

#### ۲-۴-۱. بازرسی خوردگی در خطوط انتقال نفت و گاز

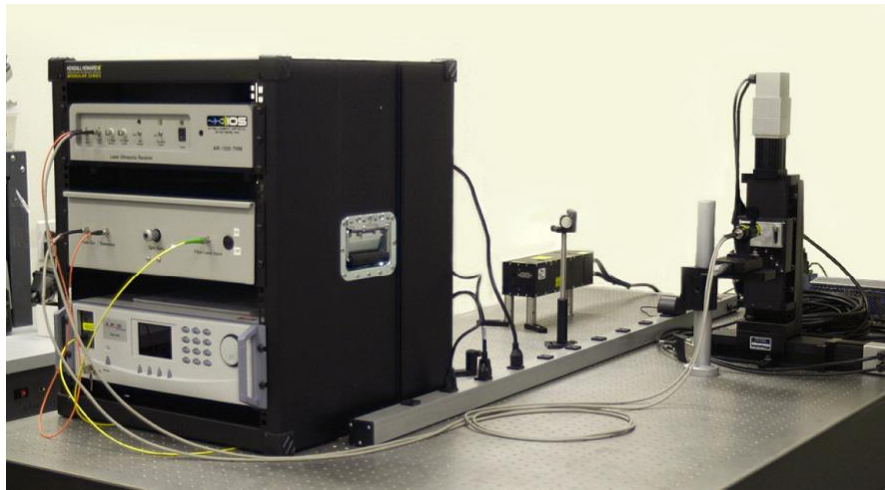
در این کاربرد از ویژگی استهلاک کم امواج لمب در فواصل طولانی استفاده می‌شود. در این روش از تغییر خواص موج، از جمله سرعت فاز آن که در اثر تغییر ضخامت تغییر می‌کند، برای شناسایی اندازه عیب استفاده می‌شود. همچنین از روی زمان طی مسافت موج بازتاب‌شده از عیب، موقعیت عیب شناسایی می‌شود. دو روش توموگرافی<sup>۳۳</sup> [۱۹] و زمان پرواز<sup>۳۴</sup> برای شناسایی خوردگی در خطوط انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. در شکل ۷ تجهیزات مورد استفاده برای بازرسی لوله‌ها با استفاده از امواج هدایت‌شده، نمایش داده شده است.

#### ۲-۴-۲. پایش سلامت ساختار<sup>۳۵</sup>

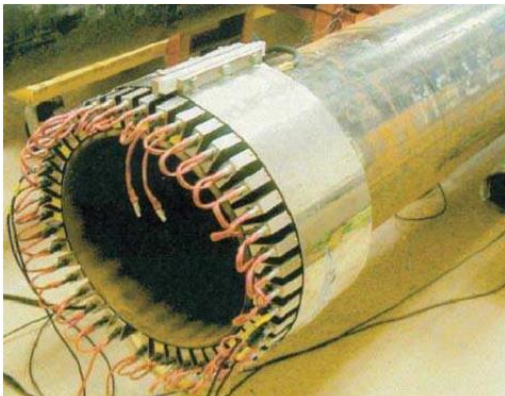
در این روش با اتصال دائمی المان‌های تیتانات زیرکونات سرب به بخش‌های مختلف سیستم و ایجاد شبکه‌ای از حسگرها، در حین فعالیت سیستم آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. این شیوه به خصوص در سیستم‌های هوافضا، که وجود هرگونه عیب خطرات جبران‌ناپذیری را ممکن است باعث شود، پرکاربرد است [۲۰]. در شکل ۸ نمونه‌ای از روش پایش سلامت ساختار نمایش داده شده است.



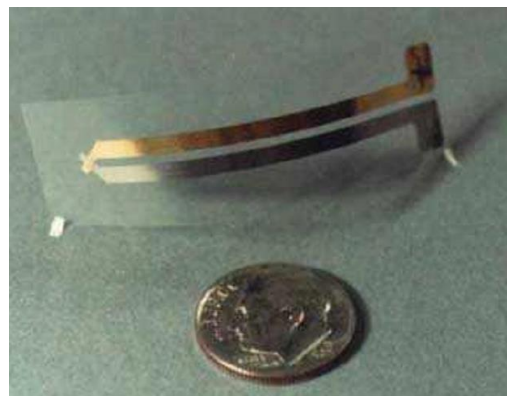
شکل ۴. بلوره‌های پیزوالکتریک مورد استفاده در ارزیابی غیرمخرب [۱۶]



شکل ۵. تجهیزات مورد استفاده در روش فراصوت لیزری [۱۷]



شکل ۷. بازرسی به روش زمان پرواز با استفاده از کمریند تراگذار [۲]



شکل ۶. تراگذار از جنس پلی وینیل فلوراید با الکتروود بین‌انگشتی [۲]

امواج حجمی غیرعملی است و یا نتایج خوبی ندارد. با استفاده از امواج لمب می‌توان ورق‌های کامپوزیتی بزرگ را بازرسی کرد [۴].

۲-۴-۳. بازرسی ساختارهای کامپوزیتی  
در ساختارهای کامپوزیتی با توجه به ساختار چندلایه‌ای، استهلاک موج بسیار بالاست. به همین دلیل بازرسی توسط

## ۲-۴-۴. تعیین ثوابت الاستیسته

از جمله کاربردهای امواج لمب تعیین ثوابت الاستیسته در مواد مختلف است. در این روش به وسیله تعیین رابطه بین سرعت گروه صفر<sup>۳۶</sup> و ثوابت الاستیسته، این مقادیر مشخص می‌شوند. علاوه بر این با بررسی سرعت گروه صفر، ضخامت ورق با دقت بالایی تعیین می‌شود [۲۲].

## ۲-۴-۵. استفاده از امواج لمب در حسگرها

با توجه به حساسیت امواج لمب به تغییرات ضخامت و عوامل محیطی، از این امواج می‌توان در ساخت حسگرها استفاده کرد. از آن جمله می‌توان به حسگر دما [۲۳]، حسگر فشار [۲۴]، حسگرهای تعیین خواص سیالات از جمله چگالی [۲۵]، غلظت [۲۶-۲۷]، خواص گازها (نوع گاز [۲۸])، جریان گاز [۲۹]، حسگر تعیین سختی [۳۰] و حسگر تعیین خواص سطح [۳۱] اشاره کرد. عملکرد این حسگرها بسیار ساده است. سرعت و استهلاک انتشار موج لمب که در زیر لایه جامد منتشر می‌شود، تحت تأثیر حالت لایه سطحی قرار می‌گیرد. تغییر در حالت سطح به علت جذب مولکول‌ها یا بارگذاری ناشی از سیال، توسط افت صوتی، انحراف فاز و فرکانس نوسان با استفاده از یک سیستم نوسان‌نما اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۹ حسگر تشخیص گاز هیدروژن با استفاده از امواج لمب نمایش داده شده است. این حسگر متشکل از یک زیرلایه از جنس آلومینیوم است که توسط یک ماده حساس به هیدروژن از جنس پالادیم پوشش داده شده است. واکنش هیدروژن با پالادیم سبب تغییر در حجم و چگالی پالادیم شده که این امر باعث تغییر در خواص انتشاری (دامنه و تغییرات فاز) موج لمب می‌شود.

## ۳. پژوهش در زمینه امواج لمب

با توجه به گستردگی مفاهیم مرتبط با امواج لمب، تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. این پژوهش‌ها را می‌توان در دسته‌های کلی تئوری،

تجربی، اجزای محدود و پردازش سیگنال دسته‌بندی کرد. گفتنی است برخی از پژوهش‌ها در چندین دسته‌بندی قرار می‌گیرند.

## ۳-۱. مطالعه تئوری امواج لمب

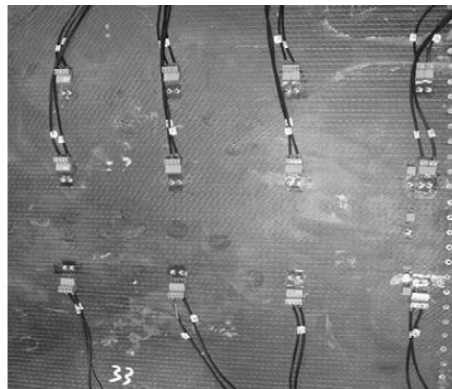
با توجه به قدمت شناسایی امواج لمب، پژوهش‌های نظری پایه در زمینه امواج لمب در قالب چند کتاب به چاپ رسیده است که از آن جمله می‌توان به آثار نویسندگانی چون گرف<sup>۳۷</sup> [۳۲]، ویکترو<sup>۳۸</sup> [۳۳]، رز<sup>۳۹</sup> [۴-۳] و آخنباخ<sup>۴۰</sup> [۳۴] اشاره کرد. لازم به ذکر است که با توجه به پیچیدگی ماهیت امواج لمب، بررسی تمامی ابعاد آنها از لحاظ تئوری کار دشواری است. علاوه بر این روش‌های عددی زیادی نیز ابداع شده‌اند که مطالعه امواج لمب را ساده‌تر می‌کنند. از اینرو پژوهش‌های نظری محدودی در این زمینه صورت گرفته که برخی از آنها شامل مطالعه پراکندگی [۳۵]، بررسی تئوری منحنی دیسپرز و مشخصات آن از جمله سرعت گروه و فاز [۳۶] و تعیین خواص الاستیک [۱۱] ورق است.

## ۳-۲. مطالعه امواج لمب به روش اجزای محدود

با ابداع روش اجزای محدود امکان بررسی بسیاری از مسائل پیچیده فراهم شده است. امواج لمب نیز با توجه با ابعاد گسترده و پیچیده خود از این امر مستثنا نبوده و محققان زیادی از این روش برای شناخت ویژگی‌های امواج لمب استفاده کرده‌اند. در بیشتر کارهای انجام‌شده، استفاده از این روش به همراه بررسی تئوری یا تجربی مسئله است تا علاوه بر تصدیق فرایند شبیه‌سازی، انعطاف‌پذیری مطالعه نیز افزایش یابد. در بسیاری از موارد نیز استفاده از شبیه‌سازی به انتخاب دقیق پارامترها برای آزمون تجربی کمک می‌کند. نرم‌افزارهای متعددی در زمینه شبیه‌سازی به کار می‌روند که از میان آنها سه نرم‌افزار آباکوس<sup>۴۱</sup>، کامسل<sup>۴۲</sup> و انسیس<sup>۴۳</sup> از استقبال بیشتری برخوردار بوده‌اند. هر یک از این نرم‌افزارها در زمینه خاصی دارای نقاط قوت

هستند و با استفاده درست از آنها جواب‌های مناسبی به دست می‌آید. اصول کلی نرم‌افزار انسیس براساس برنامه‌نویسی است و معمولاً برای انجام تحلیل‌های سفارشی نیاز به کدنویسی دارد. این موضوع سبب دشواری کار با آن برای کاربران سایر نرم‌افزارها می‌شود. با این حال، به علت همین ویژگی، انعطاف‌پذیری و سفارشی‌سازی تحلیل‌های المان محدود توسط آن افزایش می‌یابد. نرم‌افزار کامسل یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده در حیطهٔ امواج فراصوتی است. در این نرم‌افزارها، ماژول‌های مورد نیاز برای انتشار و دریافت امواج در نظر گرفته شده است. به همین دلیل نیازی به انجام عملیات پیچیده برای انجام تحلیل نیست. همچنین این نرم‌افزار کتابخانهٔ مناسبی برای مواد مختلف از جمله مواد پیزوالکتریک، که کاربرد گسترده‌ای در تحریک و دریافت امواج دارند، را در اختیار دارد. نرم‌افزار اباکوس نیز یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد است. ماژول‌های این نرم‌افزار به نحوی تهیه شده است که تقریباً برای هر نوع تحلیلی مناسب است. این نرم‌افزار حتی

بدون نیاز به کدنویسی از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است و تنها در مواردی خاص نیاز به کدنویسی دارد. یکی از مشکلات بیشتر نرم‌افزارهای المان محدود، مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده است. در برخی از نرم‌افزارها امکان انتقال از نرم‌افزارهای مدل‌سازی فراهم شده است، اما با این حال، این حالت در هندسه‌های پیچیده با خطای زیادی همراه است. با توجه به اینکه شرکت تولیدکننده نرم‌افزار اباکوس و نرم‌افزارهای مدل‌سازی معروفی چون کتیا<sup>۴۴</sup> و سالیدورکس<sup>۴۵</sup> یکی است، رابطی برای انتقال از نرم‌افزار مدل‌سازی به نرم‌افزار المان محدود وجود ندارد. وجود چنین رابطی سبب انتقال کاملاً بدون عیب مدل‌ها خواهد شد. هر یک از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی با زبان برنامه‌نویسی مشخصی قابل شخصی‌سازی یا کد نویسی هستند. برای مثال نرم‌افزار اباکوس از زبان فرترن<sup>۴۶</sup> برای نوشتن برنامه‌های شخصی استفاده می‌کند. لذا در هر یک از نرم‌افزارهای فوق برای تحلیل‌های پیچیده نیاز به دانش برنامه‌نویسی در حد قابل قبولی است.



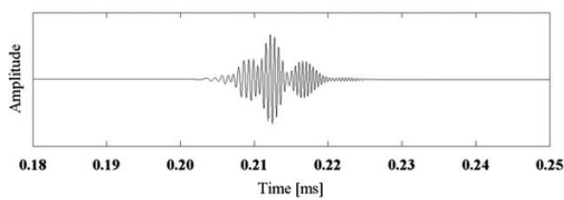
شکل ۸. چیدمان بلوره‌های پیزوالکتریک در روش پایش سلامت ساختار [۲۱]



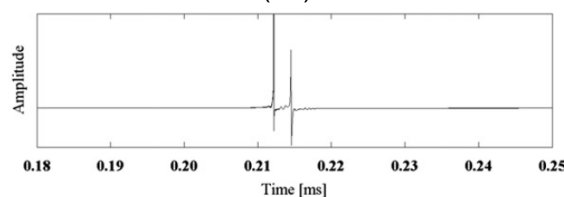
شکل ۹. حسگر تشخیص گاز هیدروژن با استفاده از امواج لمب [۲۸]



حوزه زمان یا فرکانس عمل می‌کنند. در این میان می‌توان به روش‌های متنوع واپیچش<sup>۴۹</sup> [۴۵]، استفاده از تبدیل فوریه سریع دوبعدی<sup>۵۰</sup> [۴۶]، تبدیل موجک<sup>۵۱</sup> [۴۷] و روش معکوس زمانی<sup>۵۲</sup> [۴۸] اشاره کرد. در روش واپیچش اساس کار این است که سیگنال دریافتی نهایی ترکیبی از سیگنال ناشی از نمونه و سیگنال ناشی از اثر سیستم به‌علاوه نوفه است. با داشتن سیگنال رفرنس (سیگنال ناشی از سیستم) می‌توان به سیگنال ناشی از قطعه کار دست یافت. واپیچش به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد؛ یکی از این روش‌ها فیلتر وینر<sup>۵۳</sup> است که برای سیگنال‌های فراصوتی جواب قابل قبولی بدست می‌دهد. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از عملکرد روش واپیچش در جداسازی سیگنال‌های امواج لمب نمایش داده شده است [۴۵].



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. تفکیک سیگنال‌های درهم رفته ناشی از دو عیب مجاور با روش واپیچش؛ (الف) سیگنال اصلی، (ب) سیگنال پردازش‌شده

در روش تبدیل فوریه سریع دوبعدی از سیگنال در مقیاس زمانی، که از یک سری نقاط با فاصله یکسان در امتداد یک ورق به‌دست آمده است، استفاده می‌شود. براساس این سیگنال‌ها یک نمودار سه‌بعدی براساس دامنه، فرکانس و عدد موج به‌دست می‌آید. براساس این نمودار سه‌بعدی امکان اندازه‌گیری دامنه‌های مختلف فراهم می‌شود. از این طریق با شناسایی دامنه‌های تبدیلی، نه تنها امکان

بررسی امواج لمب به روش اجزای محدود را می‌توان به چهار بخش انتشار موج در مواد مختلف (کامپوزیتی [۳۷]، لانه‌زنبوری<sup>۴۷</sup> [۳۸] و جز این‌ها) بررسی رفتار موج در برخورد با موانع مختلف از جمله عیوب (هندسه‌های مختلف عیب) [۳۹] و بخش‌های مختلف قطعات، مطالعه انتشار در هندسه‌های پیچیده (ورق با تغییرات ضخامت) [۴۰] و مطالعه ویژگی‌های امواج لمب (سرعت گروه، فاز، دیسپرزین و جز این‌ها [۴۱]) تقسیم کرد.

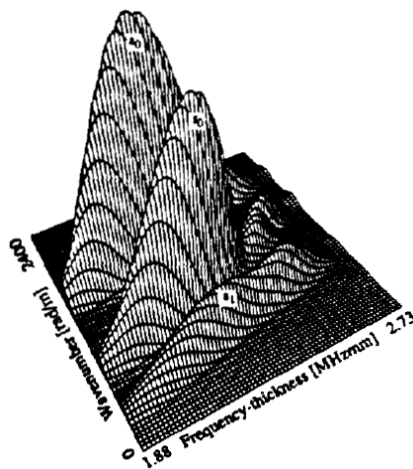
### ۳-۳. مطالعه تجربی امواج لمب

با توجه به قدمت استفاده از امواج لمب، پیشرفت‌های بسیاری در زمینه انجام آزمون‌های غیرمخرب<sup>۴۸</sup> توسط این امواج صورت گرفته است. با این حال با توجه به افزایش روبه رشد نیاز صنایع، نیاز به روش‌های جدیدتر انجام آزمایش همچنان احساس می‌شود. از این جهت بخش گسترده‌ای از پژوهش‌های جاری به بررسی نحوه انجام بازرسی توسط امواج لمب در شرایط خاص صنعتی اختصاص یافته است. از جمله از این موارد می‌توان به بازرسی قطعات با استهلاک بالا (کامپوزیت‌ها) [۴۲-۴۳] و توسعه روش‌های جدید ارسال و دریافت امواج لمب [۴۴] اشاره کرد. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، امواج لمب کاربردهای گسترده‌ای دارند. هرچند بسیاری از این کاربردها به سطح قابل قبولی رسیده و صنعتی شده‌اند، اما تحقیقات در زمینه‌های مذکور همچنان ادامه دارد.

### ۳-۴. پردازش سیگنال در امواج لمب

سیگنال‌های امواج لمب به‌علت پدیده دیسپرزین و نیز امکان ایجاد چندین مد به‌طور همزمان پیچیده‌اند. علاوه بر این اگر در قطعه عیبی وجود داشته باشد، به‌علت پدیده تغییر مد، پیچیدگی سیگنال دوجندان خواهد شد. به‌همین دلیل، همواره نیازمند روش‌های پردازش سیگنال برای کاهش پیچیدگی نتایج هستیم. روش‌های متعددی برای پردازش سیگنال‌های حاصل از امواج لمب توسعه داده شده‌اند که در

شناسایی عیوب، که امکان تعیین اندازه آنها نیز ایجاد می‌شود [۴۶]. در شکل ۱۱ نمودار حاصل از این روش که در آن دامنه سه مد  $S_0$  و  $A_0$ ،  $S_1$  تفکیک شده، نمایش داده شده است.

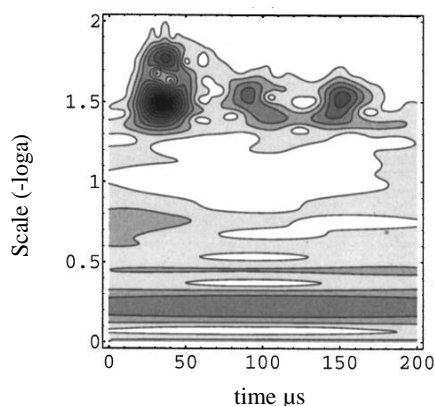


شکل ۱۱. تعیین دامنه سه مد  $S_0$  و  $A_0$ ،  $S_1$  با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع دوبعدی [۴۶]

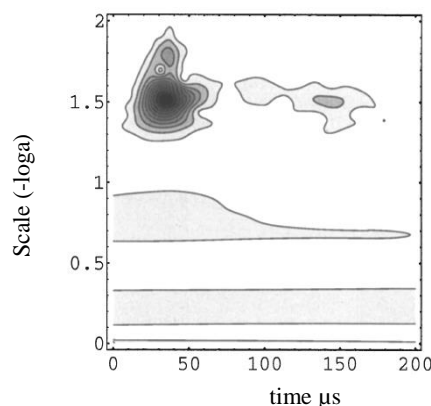
در تبدیل سنتی فوریه یک نمودار طیفی مستقل از زمان ایجاد می‌شود. هرچند بسیاری از فرایندهای ارتعاشی، رفتارهای غیرایستا از خود نشان می‌دهند که توسط این آنالیز قابل بررسی نیستند. در تبدیل موجک به جای تجزیه سیگنال برای جستجوی هارمونیک‌ها، سیگنال به توابع محلی که موجک نامیده می‌شود، شکسته می‌شود. در حقیقت، تبدیل موجک یک تبدیل خطی است که یک تابع

زمانی موجود را به انطباقاتی از توابع اولیه که از آنالیز موجک استخراج شده‌اند، تجزیه می‌کند. از این تبدیل می‌توان برای شناسایی عیوب (خطا) استفاده کرد. در شکل ۱۲ جدایش لایه‌ها در یک ورق کامپوزیتی توسط تبدیل موج نمایش داده است [۴۷].

بسیاری از روش‌های عیب‌یابی توسط امواج لمب، نیاز به اطلاعاتی درباره قطعه سالم دارد. معمولاً دستیابی به این اطلاعات سبب پیچیدگی آزمون خواهد شد. به همین علت روش‌های بدون نیاز به اطلاعات قطعه سالم مورد توجه گرفته است. یکی از این روش‌ها، روش معکوس زمانی است. در این روش با توجه به عدم نیاز به اطلاعات پایه‌ای، خطای ناشی از تغییرات شرایط محیطی و عملکردی نسبت به قطعه سالم نیز به وجود نمی‌آید. مطابق شکل ۱۳ پیزوالکتریک A فرستنده و پیزوالکتریک B گیرنده است. سیگنال از A به B دو مسیر مستقیم و پراکنده شده را طی می‌کند. سیگنال‌ها پس از رسیدن به B در مقیاس زمان معکوس شده و مجدداً به سمت A ارسال می‌شوند. سیگنال حاصل دارای مؤلفه‌هایی است که هر یک معرف یکی از مسیرهای طی شده توسط موج هستند. از سیگنال بازسازی شده در پیزوالکتریک A می‌توان برای فرایند متمرکزسازی مصنوعی یا تصویرسازی از قطعه استفاده کرد [۴۸].

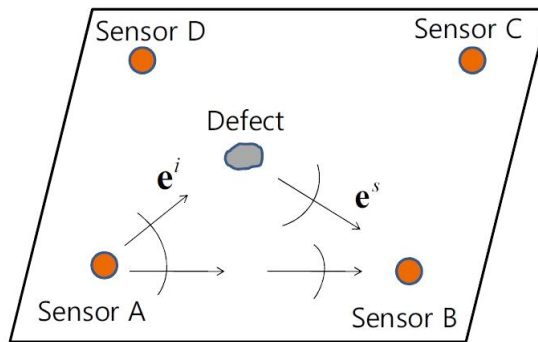


(ب)



(الف)

شکل ۱۲. اعمال تبدیل موجک روی امواج لمب در یک ورق کامپوزیتی؛ (الف) ورق بدون عیب، (ب) ورق با عیب جدایش لایه‌ها [۴۷]



شکل ۱۳. مسیرهای حرکت موج در روش معکوس زمانی [۴۸]

#### ۴. جمع‌بندی

فراوانی در زمینه کاربرد صنعتی و پژوهشی این امواج صورت گرفته است. در این راستا از ابزارهای مناسبی چون روش اجزای محدود، مطالعات تئوری و پردازش سیگنال برای بهبود نتایج استفاده شده است. استفاده از این ابزارها منجر به روشن شدن ابعاد گسترده‌ای از امواج لمب و افزایش کاربردهای آنها شده است.

امواج لمب با توجه ویژگی‌های منحصر به فرد خود ابزار مناسبی برای بازرسی هندسه‌های ورق‌هستند و به همین دلیل در صنایع مختلف کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. این امواج با توجه به ماهیت پیچیده خود نیاز به رعایت ملاحظات فراوانی در کاربردهای عملی دارند. علاوه بر این، با توجه به گسترش نیاز صنایع مختلف پیشرفت‌های

#### ۵. مأخذ

- [1] Lamb, H., "On waves in an elastic plate," Proc. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. A Math. Phys. character, 1917, pp. 114-128.
- [2] Su, Z. L. Ye. "Identification of damage using lamb waves: from fundamentals to applications." Vol. 48, Springer, 2009.
- [3] Rose, J. L., *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University, 2004.
- [4] Rose, J. L., *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*, Cambridge University, 2014.
- [5] Lowe, M., "Disperse", Imperial College of London, Department of Mechanical Engineering, NDT Lab, 1997.
- [6] "PACshare Dispersion Curves", Physical Acoustics Corp.
- [7] "Vallen dispersion Curve." Vallen Systeme GmbH.
- [8] Bocchini, P., A. Marzani, E. Viola. "Graphical user interface for guided acoustic waves." *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 25, No. 3, 2010, pp. 202-210.
- [9] Honarvar, F., E. Enjilela, A. N. Sinclair. "An alternative method for plotting dispersion curves." *Ultrasonics*, Vol. 49, No. 1, 2009, pp. 15-18.
- [10] Lin, W., L. Fan, C. Gan, B. Xu, Z. Zhu. "Study on measurement of dispersive characteristics of higher order mode Lamb waves." *Ultrasonics*, Vol. 44, No. 0, 2006, pp. 911-915.
- [11] Deng, M.-X. J. Yang. "Characterization of elastic anisotropy of a solid plate using nonlinear Lamb wave approach." *J. Sound Vib.*, Vol. 308, No. 1, 2007, pp. 201-211.

- [12] Lin, W., X. Li. "High sensitive evaluation fatigue of plate using high mode Lamb wave." *Appl. Acoust.*, Vol. 74, No. 8, 2013, pp. 1018-1021.
- [13] Matsuda, N., S. Biwa. "Frequency Dependence of Second-Harmonic Generation in Lamb Waves." *J. Nondestruct. Eval.*, 2014, pp. 1-9.
- [14] Badcock, R. A., E. A. Birt. "The use of 0-3 piezocomposite embedded Lamb wave sensors for detection of damage in advanced fibre composites." *Smart Mater. Struct.*, Vol. 9, No. 3, 2000, p. 291.
- [15] Discalea, F. L., H. Matt, I. Bartoli, S. Coccia, G. Park, C. Farrar. "Health monitoring of UAV wing skin-to-spar joints using guided waves and macro fiber composite transducers." *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 18, No. 4, 2007, pp. 373-388.
- [16] "Piezoelectric Ceramic Elements", <http://www.prowave.com.tw/english/index.htm> (accessed August 30, 2016)
- [17] "Laser Ultrasonics", <http://www.intopsys.com/laserultrasonics> (accessed August 30, 2016)
- [18] Monkhouse, R. S. C., P. D. Wilcox, P. Cawley. "Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures." *Ultrasonics*, Vol. 35, No. 7, 1997, pp. 489-498.
- [19] Leonard, K. R., M. K. Hinders. "Lamb wave tomography of pipe-like structures." *Ultrasonics*, Vol. 43, No. 7, 2005, pp. 574-583.
- [20] Balageas, D., C.-P. Fritzen, A. Güemes, "Structural health monitoring." Vol. 493, Wiley Online Library, 2006.
- [21] Lei, Q., Y. Shenfang, W. Qiang, S. Yajie, Y. Weiwei. "Design and experiment of PZT network-based structural health monitoring scanning system." *Chinese J. Aeronaut.*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 505-512.
- [22] Clorennec, D., C. Prada, D. Royer. "Local and noncontact measurements of bulk acoustic wave velocities in thin isotropic plates and shells using zero group velocity Lamb modes." *J. Appl. Phys.*, Vol. 101, No. 3, 2007, p. 34908.
- [23] Marzani, A., S. Salamone. "Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors." *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 30, No. 0, 2012, pp. 204-217.
- [24] Anderås, E., L. Arapan, I. Katardjiev, V. Yantchev. "Thin Film Plate Wave Resonant Sensor for Pressure and Gravimetric Measurements." *Procedia Eng.*, Vol. 25, 2011, pp. 571-574.
- [25] Chen, Z., T. Han, X. Ji, H. Guo, W. Shi. "Lamb wave sensors array for nonviscous liquid sensing." *Sci. China Ser. G Physics, Mech. Astron.*, Vol. 49, No. 4, 2006, pp. 461-472.
- [26] Prasad, V. S. K., K. Balasubramaniam, E. Kannan, K. L. Geisinger. "Viscosity measurements of melts at high temperatures using ultrasonic guided waves." *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 207, No. 1, 2008, pp. 315-320.
- [27] Faustmann, H., M. Münch, G. Lindner, M. Schmitt, M. Springer. "Measurement of the properties of liquids based on the dispersion of lamb waves in an acoustic waveguide." *Phys. Procedia*, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 959-964.

- [28] Song, H.-D., S. H. Cho, I. Jeon, C.-D. Kee. "A sensing medium exchangeable hydrogen sensor using Lamb waves." *Sensors Actuators B Chem.*, Vol. 162, No. 1, 2012, pp. 348-352.
- [29] Zhou, L., J.-F. Manceau, F. Bastien. "Interaction between gas flow and a Lamb waves based microsensor." *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 181, 2012, pp. 1-5.
- [30] Korde, N., T. Kundu. "Material hardness and ageing measurement using guided ultrasonic waves." *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 2, 2013, pp. 506-510.
- [31] Deng, M. "Characterization of surface properties of a solid plate using nonlinear Lamb wave approach." *Ultrasonics*, Vol. 44, 2006, pp. 1157-1162.
- [32] Graff, K. F., *Wave motion in elastic solids*, Courier Dover, 1975.
- [33] Viktorov, I. A. "Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications." Vol. 147, Plenum press New York, 1967.
- [34] Achenbach, J., *Wave propagation in elastic solids*, Elsevier, 1984.
- [35] Cho, Y., J. L. Rose, "An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect." *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 37, No. 30, 2000, pp. 4103-4124.
- [36] Rhee, S.-H., J.-K. Lee, J.-J. Lee. "The group velocity variation of Lamb wave in fiber reinforced composite plate." *Ultrasonics*, Vol. 47, No. 1, 2007, pp. 55-63.
- [37] Rheinforth, M., N. Kosmann, D. Sauer, G. Busse, K. Schulte. "Lamb waves for non-contact fatigue state evaluation of composites under various mechanical loading conditions." *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 43, No. 8, 2012, pp. 1203-1211.
- [38] Hosseini, S. M. H., U. Gabbert. "Numerical simulation of the Lamb wave propagation in honeycomb sandwich panels: a parametric study." *Compos. Struct.*, Vol. 97, 2013, pp. 189-201.
- [39] Masserey, B., C. Raemy, P. Fromme. "High-frequency guided ultrasonic waves for hidden defect detection in multi-layered aircraft structures." *Ultrasonics*, 2014.
- [40] Leduc, D., B. Morvan, A.-C. Hladky, P. Pareige, J. L. Izbicki. "Lamb wave propagation in a plate with a grooved surface with several spatial periodicities." *Ultrasonics*, Vol. 44, 2006, pp. 1359-1363.
- [41] Ramadas, C., K. Balasubramaniam, A. Hood, M. Joshi, C. V Krishnamurthy. "Modelling of attenuation of Lamb waves using Rayleigh damping: Numerical and experimental studies." *Compos. Struct.*, Vol. 93, No. 8, 2011, pp. 2020-2025.
- [42] Lasn, K., A. Klauson, F. Chati, D. Décultot. "Experimental determination of elastic constants of an orthotropic composite plate by using lamb waves." *Mech. Compos. Mater.*, Vol. 47, No. 4, 2011, pp. 435-446.
- [43] Leleux, A., P. Micheau, M. Castaings. "Long range detection of defects in composite plates using Lamb waves generated and detected by ultrasonic phased array probes." *J. Nondestruct. Eval.*, Vol. 32, No. 2, 2013, pp. 200-214.
- [44] Olsson III, R. H., K. Hattar, S. J. Homeijer, M. Wiwi, M. Eichenfield, D. W. Branch, M. S. Baker, J. Nguyen, B. Clark, T. Bauer. "A high electromechanical coupling coefficient SH0 Lamb

wave lithium niobate micromechanical resonator and a method for fabrication.” *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 209, 2014, pp. 183-190.

- [45] Mirahmadi, S. J., F. Honarvar. “Application of signal processing techniques to ultrasonic testing of plates by S0 Lamb wave mode.” *NDT E Int.*, Vol. 44, No. 1, 2011, pp. 131-137.
- [46] Alleyne, D. N., P. Cawley. “The interaction of Lamb waves with defects.” *Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. IEEE Trans.*, Vol. 39, No. 3, 1992, pp. 381-397.
- [47] Staszewski, W. J., S. G. Pierce, K. Worden, W. R. Philp, G. R. Tomlinson, B. Culshaw. “Wavelet signal processing for enhanced Lamb-wave defect detection in composite plates using optical fiber detection.” *Opt. Eng.*, Vol. 36, No. 7, 1997, pp. 1877-1888.
- [48] Jeong, H., J.-S. Lee, S.-M. Bae. “Defect detection and localization in plates using a lamb wave time reversal technique.” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 3, 2011, pp. 427-434.

## پی نوشت

- 
- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. dispersion</li><li>2. nondestructive evaluation</li><li>3. Bulk wave</li><li>4. Rayleigh waves</li><li>5. surface waves</li><li>6. Lamb waves</li><li>7. plate waves</li><li>8. Horace Lamb</li><li>9. Lord Rayleigh</li><li>10. Osborne and Hart</li><li>11. Firestone and Ling</li><li>12. guided waves</li><li>13. mode conversion</li><li>14. group velocity</li><li>15. به معادله دیسپرزین معادله فرکانس یا معادله مشخصه نیز گفته می شود.</li><li>16. Desperse<sup>®</sup></li><li>17. Pac Share<sup>®</sup></li><li>18. Vallen<sup>®</sup></li><li>19. GUIGUW<sup>®</sup></li><li>20. semi analytical finite element method (SAFE)</li><li>21. frequency spectrum</li><li>22. cutoff frequency</li><li>23. ultrasonic transducers (probe)</li><li>24. piezoelectric elements</li><li>25. laser ultrasonics</li><li>26. interdigital transducer (IDT)</li><li>27. backing material</li><li>28. matching layer</li><li>29. perspex</li><li>30. Lead Zirconate Titanate (PZT)</li><li>31. laser interferometer</li><li>32. PVDF</li></ol> | <ol style="list-style-type: none"><li>33. tomography</li><li>34. time of flight (ToF)</li><li>35. structural health monitoring (SHM)</li><li>36. zero group velocity (ZGV)</li><li>37. Graff</li><li>38. Viktorov</li><li>39. Rose</li><li>40. Achenbach</li><li>41. Abaqus<sup>®</sup></li><li>42. Comsol<sup>®</sup></li><li>43. ANSYS<sup>®</sup></li><li>44. CATIA<sup>®</sup></li><li>45. Solid works<sup>®</sup></li><li>46. Fortran<sup>®</sup></li><li>47. honeycomb sandwich panels</li><li>48. nondestructive test</li><li>49. deconvolution</li><li>50. 2D fast Fourier transform (2D-FFT)</li><li>51. wavelet transform</li><li>52. time reversal method</li><li>53. Wiener filter</li></ol> |
|---|--|