

## به نام آنکه جان را فکرت آموخت



امام خمینی (ره): علم همراه تهذیبِ نفس است که انسان را به مقام انسانیت می رساند. هم در علم کوشا باشید و هم در عمل و هم در تهذیب اخلاق.



# التراسونیک پیشرفته و کاربرد آن در بازرسی غیر مخرب

محمود افشاری

کارشناس ارشد مهندسی جوش

سرشناسه	:	افشاری، محمود، ۱۳۶۵ -
عنوان و نام پدیدآور	:	التراسونیک پیشرفته و کاربرد آن در بازرسی غیرمخرب/ محمود افشاری.
مشخصات نشر	:	تهران: کتاب شهر علم، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	:	۲۱۵ص: مصور
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۹۵۵۶۳-۰-۶
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
موضوع	:	امواج ماورای صوت
موضوع	:	Ultrasonic waves
موضوع	:	امواج ماورای صوت -- کاربردهای صنعتی
موضوع	:	Ultrasonic waves -- Industrial applications
موضوع	:	امواج ماورای صوت -- اندازه گیری
موضوع	:	Ultrasonic Waves -- Measurement
رده بندی کنگره	:	۱۳۹۸ الف۷/الف/۷۴۴/۷۴۴
رده بندی دیویی	:	۶۲۰/۲۸
شماره کتابشناسی ملی	:	۵۶۰۶۰۶۸



عنوان کتاب: ..... التراسونیک پیشرفته و کاربرد آن در بازرسی غیرمخرب  
مولف: ..... محمود افشاری  
ناشر: ..... انتشارات کتاب شهر علم  
طرح روی جلد: ..... محسن عطاری  
صفحه آرایبی رایانه‌ای: ..... فرشته اشرفی  
ویراستار فنی: ..... احسان سلحشور راد  
ویراستار ادبی: ..... فرشته اشرفی  
شمارگان: ..... ۱۰۰۰ جلد  
نوبت چاپ: ..... اول  
قیمت: ..... ۵۲۰،۰۰۰ ریال

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

آدرس: تهران، خیابان انقلاب، خیابان دوازده فروردین، نبش کوچه بهشت آیین، پلاک ۷ طبقه ۲

تلفن: ۶۶۵۸۳۰۳۰

## درباره مؤلف

آقای محمود افشاری متولد سال ۱۳۶۵ در منطقه قهستان از بخش درمیان از توابع شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی است. وی مقاطع دبستان را در مدرسه شهید سندروس و راهنمایی و دبیرستان را در مدرسه شهید بهشتی بیرجند، فوق دیپلم را در رشته مکانیک از دانشگاه بیرجند، کارشناسی ناپیوسته را در دانشگاه زابل در رشته‌ی ساخت و تولید و کارشناسی ارشد را در رشته‌ی مهندسی مکانیک- مهندسی جوش در دانشگاه صنعتی امیر کبیر گذرانده است. پروژه کارشناسی ارشد وی بر روی طراحی و ساخت مخازن تحت فشار و راکتورهای پتروشیمی با استفاده از ورق روکش دار، با همکاری ماشین سازی اراک انجام شده و همزمان چندین پروژه در زمینه‌ی بازرسی های غیرمخرب در فازهای ۱۷ و ۱۸ پارس جنوبی، ذوب آهن اصفهان و صنایع وابسته به وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، به نتیجه رسانده است.

همزمان با کسوت شریف معلمی در هنرستان شهید دکتر چمران شهرستان قائنات، به تدریس در دانشگاه- های استان خراسان جنوبی نیز مشغول بوده و در کنار آن با تاسیس شرکت های اطلس کوشا در تهران و گروه ماشین سازی افرا در بیرجند در زمینه صنعت، و با تاسیس انتشارات کتاب شهر علم، پخش کتاب بانک کتاب شهر و موسسه‌ی آموزشی سفیران امیرکبیر در تهران، در زمینه فرهنگی نیز فعال بوده است. وی در زمینه راه اندازی کسب و کارهای کوچک، کم سرمایه و زود بازده صاحب سبک بوده و با راه اندازی تعاونی‌های دانش‌آموزی و دانشجویی کوچک در زمینه‌های صنعتی، آموزشی و کشاورزی، تا کنون برای بالغ بر ۱۰۰ نفر اشتغال مستقیم و غیر مستقیم ایجاد نموده است.

از سایر فعالیت‌های پژوهشی ایشان می‌توان به ۴ عنوان اختراع در زمینه ماشین‌آلات صنعتی، راهیابی به فینال مسابقات جایزه بزرگ اختراعات ایران در سال ۹۵، دیپلم افتخار المپیاد ملی مهارت در رشته‌ی ساخت و تولید تیمی در سال ۸۹، داوری جشنواره‌های جوان خوارزمی از سال ۸۹، سخنرانی در چند کنفرانس تخصصی ملی و بین المللی، مشاوره چندین عنوان پروژه مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد، چندین مقاله علمی تخصصی و سه عنوان کتاب در رشته‌ی مهندسی مکانیک اشاره نمود. وی هم اکنون دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران بوده و بر روی فرآیندهای ساخت افزایشی لیزری سوپرآلیاژهای پایه نیکل مشغول به تحقیق می‌باشد.

# فهرست مطالب

## فصل اول: مقدمه

۱	مقدمه
۲	۱- امواج صوتی و فراصوتی.....
۳	۲- مبانی آزمون فراصوت (التراسونیک).....
۵	۳- تاریخچه آزمون فراصوتی.....
۵	۴- تفاوت روش های پیشرفته التراسونیک با روش های معمولی.....

## فصل دوم: مبانی انتشار امواج مکانیکی

۱۰	موج و انتشار امواج
۱۱	انواع موج بر اساس شکل
۱۱	۱- موج عرضی.....
۱۲	۲- موج طولی.....
۱۳	۳- موج سطحی (ریلی).....
۱۴	۴- موج لائو.....
۱۵	۵- موج ورقی (لمب).....
۱۶	اصول بنیادین انتشار امواج
۱۶	۱- اصول حرکت نوسانی.....
۱۷	۲- تعاریف و اصطلاحات مربوط به حرکت موج.....
۲۰	۳- سرعت موج های رونده.....
۲۱	معادلات حرکت موج مکانیکی در ریسمان کشیده
۲۱	۱- محاسبه سرعت موج با استفاده از قانون دوم نیوتون.....
۲۲	۲- انرژی جنبشی منتقل شده در طول ریسمان.....
۲۳	۲-۱- انرژی پتانسیل کشسان.....
۲۳	۲-۲- انتقال انرژی.....
۲۳	۲-۳- آهنگ انتقال انرژی.....
۲۴	۳- معادله ی موج.....
۲۶	۴- برهم نهی موج ها.....
۲۷	۵- تداخل موج ها.....
۲۸	۶- بردار چرخشی (فازور).....

۲۹	موج های ایستاده
۳۱	۱- بازتاب امواج ایستاده
۳۱	۲- تشدید امواج ایستاده

## فصل سوم: خواص عمومی امواج التراسونیک

۳۴	خواص عمومی امواج التراسونیک
۳۴	۱- معادله سرعت انتشار امواج طولی و عرضی در یک ماده
۳۵	۲- بازتابش و شکست امواج
۳۵	۲-۱- تابش قائم موج به سطح
۳۶	۲-۲- ضرایب بازتابش و عبور توان (انرژی)
۳۷	۲-۳- برخورد زاویه ای امواج به مرز دو محیط
۳۷	۲-۴- قانون اسنل
۴۲	۲-۵- زاویه های بحرانی
۴۴	۲- بازتابش و شکست امواج عرضی از نوع SH
۴۵	۳- استهلاک

## فصل چهارم: خواص اختصاصی امواج التراسونیک

۴۸	خواص اختصاصی امواج التراسونیک
۵۰	۱- حرکت موج و معادله موج
۵۰	۲- امواج با انتشار یک بعدی
۵۱	۲-۱- امواج طولی (یک بعدی)
۵۷	۲-۲- موج عرضی (یک بعدی)
۶۲	۲-۳- اثر ناهمسانگردی بر انتشار موج صوتی
۶۶	۲-۴- انکسار دوگانه

## فصل پنجم: مناطق صوتی در میدان التراسونیک

۶۸	مناطق صوتی در میدان التراسونیک
۶۹	۱- منطقه ی مرده
۶۹	۲- منطقه ی نزدیک
۷۱	۳- منطقه ی دور
۷۲	۴- زاویه واگرایی

۷۴	روش های همگرا نمودن پرتو التراسونیک
۷۵	۱- میله متمرکز کننده .....
۷۵	۲- لنز اکوستیکی .....
۷۷	فاصله کانونی
۷۸	۱- اصول لنزهای اکوستیک .....
۷۹	۲- اندازه گیری فاصله کانونی .....

## فصل ششم: تجهیزات بازرسی التراسونیک

۸۴	تجهیزات بازرسی التراسونیک
۸۵	۱- پراب .....
۸۶	۱-۱- مواد تک بلور .....
۸۸	۲-۱- مواد پیزوسرامیکی .....
۸۹	۳-۱- مواد پلیمری .....
۹۰	۴-۱- مواد پیزو الکتریک کامپوزیتی .....
۹۱	۵-۱- انواع پراب از نظر کاربرد .....
۹۲	۲- روابط حاکم بر رفتار پراب های پیزو الکتریک .....
۹۲	۲-۱- اثر پیزوالکتریک .....
۹۲	۲-۲- نحوه تحریک ترانسدیوسر .....
۹۵	۳-۲- تاثیر زمان پالس .....
۹۶	۴-۲- پهنای باند .....
۹۸	۵-۲- فرکانس مرکزی .....
۹۹	صفحه نمایش خروجی
۱۰۰	۱- نمایش تصویری A .....
۱۰۱	۲- نمایش تصویری B .....
۱۰۴	۳- نمایش تصویری C .....

۱۰۶

کوپلنت ها

۱۰۷

بلوک های کالیبراسیون

## فصل هفتم: تکنیک های بازرسی التراسونیک

۱۱۰ تکنیک های رایج بازرسی در آزمون فراصوتی

۱۱۰ ..... ۱- روش انعکاسی (بازتابی).....

۱۱۱ ..... ۱-۱- روش بازتابی با پروب عمودی.....

۱۱۲ ..... ۲-۱- روش بازتابی با پروب زاویه ای.....

۱۱۴ ..... ۲- روش انتقالی (عبوری).....

۱۱۴ ..... ۱-۲- روش عبوری با پروب عمودی.....

۱۱۵ ..... ۲-۲- روش عبوری با پروب زاویه ای.....

۱۱۶ ..... ۲-۳- تکنیک های موج سطحی.....

۱۱۶ ..... ۲-۴- تکنیک ارسال-دریافت.....

۱۱۶ روش های بررسی عیب

۱۱۶ ..... ۱- سیستم بازرسی تماسی.....

۱۱۷ ..... ۲- سیستم بازرسی غوطه‌وری.....

۱۱۷ دستورالعمل تست

۱۱۸ کالیبراسیون

۱۲۳ تعیین هویت عیوب

۱۲۳ ..... ۱- روش منحنی دامنه-فاصله ( DAC ).....

۱۲۴ ..... ۲- روش التراسونیک پالس-پژواک.....

۱۲۷ ..... ۳- تعیین لبه های عیب.....

۱۲۷ ..... ۴-الگوهای روبش سطح جهت کشف عیب.....

۱۲۸ بازرسی التراسونیک غیر تماسی

۱۲۸ ..... ۱- التراسونیک کوپل شده با لیزر.....

۱۳۰ ..... ۲- التراسونیک کوپل شده با هوا.....

۱۳۱ ..... ۳- ترانسدیوسر صوتی - مغناطیسی (EMAT).....

۱۳۱ ..... ۳-۱- اصول علمی.....

۱۳۴ ..... ۳-۲- کاربردهای عملی روش EMAT در صنایع فضایی.....

۱۳۴ ..... ۳-۳- بازرسی قطعات با دمای بالا.....

- ۳-۴- تعیین عمر خستگی فولادها..... ۱۳۵
- ۳-۵- تعیین میزان تنش های پسماند در قطعات صنایع ریلی..... ۱۳۵
- ۳-۶- بررسی خوردگی..... ۱۳۶
- ۳-۷- مزایا و معایب EMAT..... ۱۳۷

## فصل هشتم: تکنیک بازرسی آرایه های فازی

- تکنیک آرایه های فازی ۱۴۰
- ۱- خصوصیات سیستم آرایه فازی..... ۱۴۱
- ۲- پراب آرایه فازی..... ۱۴۱
- ۲-۱- ساختار پراب سیستم آرایه فازی..... ۱۴۳
- ۲-۲- اصول عملکرد پراب های آرایه فازی..... ۱۴۵
- ۳- قابلیت ها و الگوهای اصلی کنترل سیستم آرایه فازی..... ۱۴۷
- ۳-۱- اسکن مستقیم الکترونیکی..... ۱۴۷
- ۳-۲- متمرکز کردن شعاع های التراسونیک..... ۱۴۷
- ۳-۳- هدایت الکترونیکی امواج التراسونیک..... ۱۴۹
- ۳-۴- اسکن مدور در تکنیک آرایه فازی..... ۱۵۰
- ۳-۵- ترکیب اسکن ها..... ۱۵۰
- ۴- کاربرد..... ۱۵۱

## فصل نهم: کاربردهای نوین فناوری التراسونیک

- اندازه گیری تنش پسماند در قطعات و سازه ها ۱۵۶
- ۱- مکانیزم ایجاد..... ۱۵۷
- ۲- عوامل موثر بر تنش پسماند..... ۱۶۰
- ۳- تنش پسماند در جوشکاری لوله ها..... ۱۶۱
- ۴- روش های رایج اندازه گیری تنش پسماند..... ۱۶۲
- ۴-۱- روش ایجاد سوراخ..... ۱۶۲
- ۴-۲- روش حلقه..... ۱۶۳
- ۴-۳- روش برداشت لایه..... ۱۶۴
- ۴-۴- روش مقطع زنی..... ۱۶۴
- ۴-۵- روش تحلیل فرورونده..... ۱۶۵
- ۵- اندازه گیری تنش پسماند به کمک التراسونیک..... ۱۶۵

۱۷۱	۵-۱- اندازه گیری تنش با استفاده از امواج طولی سطحی
۱۷۲	۵-۲- اندازه گیری تنش با موج عرضی
۱۷۴	تعیین اندازه عیب
۱۷۴	۱- روش زمان پرواز پراش (TOFD)
۱۷۹	۲- روش زمان ورود نسبی (RATT)
۱۸۰	۳- روش زمان ورود مطلق (AATT)
۱۸۱	تعیین موقعیت نشت در خطوط لوله
۱۸۱	۱- ابزارهای اولتراسونیک بازرسی فنی داخل خط لوله
۱۸۲	۲- ساختار سخت افزاری
۱۸۳	۳- ترکیب اندازه گیری های ضخامت دیواره و آشکارسازی ترک و شکاف
۱۸۵	کیفیت سنج فراصوتی برای محصولات کشاورزی
۱۸۵	۱- تعیین ویژگی های فراصوت
۱۸۷	۲- سامانه ی کیفیت سنج فراصوتی

۱۹۳

واژگان

۲۰۱

مراجع

## پیشگفتار

آزمون‌های غیرمخرب، به مجموعه روش‌هایی اطلاق می‌شود که برای آزمایش بدون تخریب و صدمه قطعات و سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توسعه سریع علم و فن آوری، آزمون‌های غیرمخرب در چند دهه اخیر و افزایش کاربری آنها در صنایع گوناگون، استفاده از این رشته تخصصی در ایران نیز رشد چشمگیری یافته است. مطرح شدن تخصص آزمون غیرمخرب در دانشگاه‌ها، تاسیس ده‌ها شرکت تخصصی، ارائه دوره‌های متعدد آموزشی، برگزاری سمینارها و کنفرانس‌های متعدد و چاپ صدها مقاله علمی در کنفرانس‌ها و مجلات داخلی و خارجی تنها شماری از فعالیت‌هایی است که در طول سالیان اخیر انجام شده است.

بر این اساس و با توجه به رشد فزاینده آزمون‌های غیرمخرب در دنیا و استفاده از جدیدترین تکنولوژی و علوم روز دنیا، سرعت پیشرفت این تکنولوژی‌ها بسیار زیاد است، بنابراین به روز بودن و آگاهی از این روش‌های نوین برای یک مهندس و یک بازرس، غیر قابل اجتناب است.

کتاب حاضر یک از صدها کتابی است که در مورد بازرسی غیر مخرب و علی‌الخصوص بازرسی به روش فراصوت (التراسونیک) نگاشته شده است، اما وجه تمایز این کتاب با سایر منابع، ارجاع به بروز ترین مقالات علمی چاپ شده در زمینه فناوری‌های پیشرفته‌ی التراسونیک و همچنین استفاده از دانش تجربی افراد صاحب نظر و صاحب سبک در این زمینه در کنار تجربه‌ی ده‌ها پروژه عملی انجام شده توسط نگارنده، است. قطعاً تسلط کامل بر بازرسی التراسونیک بخصوص مباحث پیشرفته‌ی آن، نیازمند داشتن دانش ریاضی و فیزیک قوی و انجام پروژه‌های عملی متعدد خواهد بود.

در مورد این کتاب، نگارنده نهایت سعی خود را داشته است که تا حد امکان معادل‌های فارسی مناسب برای کلمات و اصطلاحات علمی و فنی به کار برد. بدین منظور جهت آشنایی هر چه بیشتر خوانندگان با اصطلاحات تخصصی، از ترجمه‌ی متون موجود در تصاویر خودداری شده و کلیه‌ی اصطلاحات بکار رفته در این تصاویر، در بخش واژه‌نامه‌ی انتهای کتاب، ترجمه شده‌اند.

هرچند که نگارنده تمام سعی خود را برای ارایه‌ی اثری عاری از از نقص بکار برده‌است، اما قطعاً با توجه به گستردگی منابع مورد استفاده، باز هم مشکلاتی علمی، فنی و نگارشی در آن وجود خواهد داشت که خوانندگان محترم، با ارایه‌ی نظرات و پیشنهادات سازنده‌ی خود، باعث رفع نقایص موجود و بهبود هرچه بیشتر محتوای کتاب خواهند شد.

نگارنده بر خود لازم می‌داند از حمایت‌های بی دریغ آقایان دکتر ابراهیم حشمت دهکردی، دکتر محمد احمدی نجف آبادی و دکتر ایرج ستاریفر (اساتید گرانقدر دانشگاه پلی تکنیک تهران)، مهندس فضل‌الله معمار باشی که راهنمایی‌های ارزشمند این عزیزان چراغ راه نگارش این کتاب بوده است قدردانی نماید. همچنین از زحمات سرکار خانم راضیه اشرفی، خانم مهندس فرشته اشرفی، مهندس حسین افشاری، مهندس محسن عطاری، دکتر احسان سلحشور راد، جناب آقای ابراهیم کره‌یان و سایر عزیزانی که در امر تولید این اثر نقشی داشته‌اند، تشکر و قدر دانی نماید.

محمود افشاری

M.afshari@aut.ac.ir

تهران - بهار ۱۳۹۸

فصل اول

# مقدمه

## مقدمه

پیشرفت و گسترش صنایع مختلف، نیازمند تولید قطعات و تجهیزات مناسب است. ساخت و نگهداری این تجهیزات و خدمات، نیازمند کنترل کیفی برای سلامت و کیفیت محصولات تولید شده می‌باشد. تست‌های غیر مخرب<sup>۱</sup> (NDT) یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کنترل کیفی برای تعیین نقص در قطعات مختلف و نیز ارزیابی کیفیت محصولات است. آزمون‌های غیر مخرب، محققان و یا مهندسان را قادر می‌سازد که یکپارچگی سازه و ویژگی‌های مواد آن را مورد ارزیابی قرار دهند. استفاده از تکنیک‌های غیر مخرب و روش‌های آن، باعث صرفه‌جویی با ارزش و گارانتی کیفیت سیستم‌ها و محصولات مهندسی شده می‌گردد.

با بهره‌گیری از قوانین و اصول شناخته شده فیزیکی، شماری از روش‌های آزمون غیر مخرب نوین، ابداع شده است که اطلاعات مورد نیاز مرتبط با کیفیت مواد و قطعات را عرضه نموده و در عین حال، انجام آنها تغییری در قطعه یا نمونه تحت آزمون ایجاد نکرده و آن را معیوب نمی‌کند.

با استفاده از تجهیزات NDT می‌توان عیوب موجود در قطعات از جمله ترک و شکستگی داخلی و سطحی، تخلخل و حفره‌های داخلی و نیز هر گونه عیبی که در هنگام انجام کار در قطعه ایجاد می‌شود را شناسایی کرد. این روش‌ها علاوه بر شناسایی نقص‌ها، برای تعیین اندازه‌گیری ابعاد، جنس و ساختار شبکه کریستالی نیز به کار می‌روند. آزمون‌های غیر مخرب انواع مختلفی دارند و نوع آزمون مورد استفاده نسبت به شرایط و خواص فیزیکی مواد، متغیر است. مهمترین تکنیک‌های بازرسی غیر مخرب عبارتند از:

- آزمون چشمی<sup>۲</sup> (VT): در این روش تنها عیوب سطحی را می‌توان بررسی کرد.
  - آزمون مایع نافذ<sup>۳</sup> (PT): در این روش تنها عیوب سطحی و عیوبی که به سطح راه داشته باشند مشخص می‌شود.
  - آزمون ذرات مغناطیسی<sup>۴</sup> (MT): عیوب سطحی و زیر سطحی تا فاصله معینی از سطح را می‌توان با این روش بررسی کرد.
  - آزمون رادیوگرافی<sup>۵</sup> (RT): عیوب درون حجمی را بوسیله این روش بررسی می‌کنند.
  - آزمون فراصوتی<sup>۶</sup> (UT): در این روش عیوب درونی و صفحه ای بازرسی می‌شوند.
- روش‌های غیرمخرب می‌تواند بر حسب مورد، به تنهایی و یا توأما صورت گیرد. هر چند این روش‌ها با هم اختلاف دارند ولی عملاً کامل کننده یکدیگر می‌باشند. از مزایای روشن و بارز استفاده از آزمون‌های غیرمخرب، آشکارسازی عیوبی است که عدم شناسایی آن‌ها می‌تواند باعث شکست قطعه و در نتیجه ایجاد زیانهای مالی و احتمالاً جانی بسیار زیاد باشد.

### ۱- امواج صوتی و فراصوتی

صوت از شناخته‌ترین پدیده‌های طبیعی برای انسان است. نه تنها انسان بلکه حتی سایر موجودات نیز از این پدیده فیزیکی در فعالیتهای روزانه خود استفاده می‌کنند. صوت در اثر ارتعاش یک منبع صوتی تولید می‌شود. شناخته‌شده‌ترین صداها، اصواتی هستند که توسط تارهای صوتی انسان تولید شده و در هوا انتشار می‌یابند. تارهای

<sup>۱</sup>Non Destructive Testing (NDT)

<sup>۲</sup>Visual Test (VT)

<sup>۳</sup>Liquid Penetrant Test (PT)

<sup>۴</sup>Magnetic Particle Test (MT)

<sup>۵</sup>Radiographic Test (RT)

<sup>۶</sup>Ultrasonic Test (UT)

صوتی با ارتعاش خود هوای دهان (ذرات گاز) را به نوسان در می‌آورند و این نوسان‌ها به شکل امواج صوتی انتشار یافته و به شنونده می‌رسند.

وجود یک محیط مادی (ذرات ماده) لازمه انتشار امواج صوتی است، زیرا چیزی جز ارتعاش این ذرات مادی نیست. به همین دلیل در خلاء که ذرات مادی وجود ندارد، صوت انتشار نمی‌یابد. ارتعاش منبع، ذرات مجاور رابه نوسان در آورده و این ذرات نیز ذرات مجاور خود را مرتعش می‌سازند و ارتعاش ماده زنجیروار ادامه یافته و پیش می‌رود. انتقال این ارتعاشات از ذره‌ای به ذره دیگر در واقع همان موج صوتی است که در محیط منتشر می‌شود. به عبارت دیگر انتشار صوت، و به تبع آن فراصوت، انتقال انرژی در محیط به لحاظ نوسان ذرات ماده است. انسان می‌تواند صداهایی را که فرکانس آنها حدوداً بین ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز ( $Hz$ ) است رابا گوش خود بشنود. امواج فراصوتی امواج صوتی هستند که فرکانس آنها بالاتر از حد شنوای انسان یعنی ۲۰۰۰۰ هرتز است. فراصوت اولین بار در سال ۱۸۸۳ توسط گالتون کشف شد و در طی جنگ‌های جهانی اول و دوم به سرعت توسعه یافت. استفاده از فراصوت به روش‌های پالسی، که از روش‌های راداری اقتباس شده است، تا حد زیادی موجب توسعه کاربرد فراصوت در زمینه‌های مختلف، از جمله آزمون غیرمخرب مواد گردید. از دیگر زمینه‌های کاربرد فراصوت می‌توان معاینات پزشکی، اندازه‌گیری و کنترل، تمیز کردن و ماشینکاری قطعات را نام برد. امواج فراصوتی دارای مزایایی هستند که شماری از آنها عبارتند از:

- فراصوت دارای خواصی جهت‌دار است و هر چه فرکانس بیشتر باشد، این امواج جهت‌دارتر خواهند بود. این خاصیت از مهمترین عوامل به کارگیری امواج فراصوتی در مواردی چون تشخیص عیوب در قطعات و کاربردهای زیردرا است.
- در فرکانس‌های بالا، طول موج‌ها به نسبت کوتاه‌تر می‌شوند تا حدی که اندازه آنها مساوی و یا کوچکتر از ابعاد قطعاتی که موج در آن در حال انتشار است می‌گردد. این امر در اندازه‌گیری ضخامت‌های نازک و یا ایجاد قابلیت تفکیک بالا در عیب-یابی قطعات اهمیت می‌یابد.
- فراصوت صدایی ایجاد نمی‌کند و این امر در کاربردهای امواج با شدت زیاد مطلوب است. در این موارد هر چند به کارگیری فرکانس‌هایی که در محدوده شنوایی انسان هستند، می‌تواند موثرتر باشد، ولیکن سروصدای ایجاد شده غیر قابل تحمل بوده و حتی ممکن است موجب صدماتی گردد.

امواج فراصوتی با امواجی که بر روی سطح آب انتشار می‌یابند نیز شباهت دارند. اگر سنگی به داخل آب ساکن در یک حوض انداخته شود، امواجی دایره‌ای شکل در محل برخورد سنگ با آب ایجاد شده و به طرف دیواره‌های حوض حرکت می‌کنند. اگر برگی روی سطح آب باشد، این برگ در جای خود بالا و پایین می‌رود ولی لزوماً به طرف دیواره‌های حوض حرکت نمی‌کند. در امواج فراصوتی نیز ذرات ماده در نقطه تعادل خود نوسان کرده ولی با موج سفر نمی‌کنند. در واقع موج فراصوتی در اثر انتقال انرژی نوسان از ذره‌ای به ذره دیگر انتشار می‌یابد و ذرات ماده تنها در نقطه تعادل خود نوسان می‌کنند. پس در انتشار امواج فراصوتی انرژی از نقطه‌ای به نقطه دیگر انتقال می‌یابد ولی انتقال ماده وجود ندارد.

## ۲- مبانی آزمون فراصوت (التراسونیک)

آزمون آلتراسونیک یا فراصوت ( $UT$ ) یکی از روش‌های مهم در آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد. در این روش با تولید امواج مکانیکی و فرستادن آن امواج توسط ترانسدیوسر به داخل قطعات و گرفتن پالس‌های برگشتی از داخل قطعات می‌توان به عیوب داخلی قطعات پی برد. تشخیص، تعیین محل و ارزیابی ناپیوستگی‌ها امکان‌پذیر است زیرا سرعت صوت در یک ماده معمولاً ثابت است و اندازه‌گیری فاصله را مقدور می‌سازد. همچنین دامنه صوت برگشتی تقریباً با اندازه بازتاب دهنده نسبت دارد.

درجه انعکاس موج فراصوت، به میزان زیادی به حالت فیزیکی مواد تشکیل دهنده فصل مشترک و تا حدود کمتری به خواص فیزیکی ویژه ماده بستگی دارد. ترکها، حفره انقباضی، ترکیدگی ها، پوسته‌ها، حفرات و سایر ناپیوستگی هایی که می‌توانند فصل مشترک‌های انعکاسی ایجاد کنند، به راحتی قابل تشخیص هستند. آخال‌ها و سایر ناهمگنی‌ها نیز از طریق ایجاد انعکاس یا پراکندگی امواج التراسونیک یا با ایجاد برخی دیگر از اثرات قابل شناسایی بر امواج التراسونیک، قابل تشخیص هستند. این روش در مقایسه با سایر روش‌های غیرمخرب دارای مزایای زیر است:

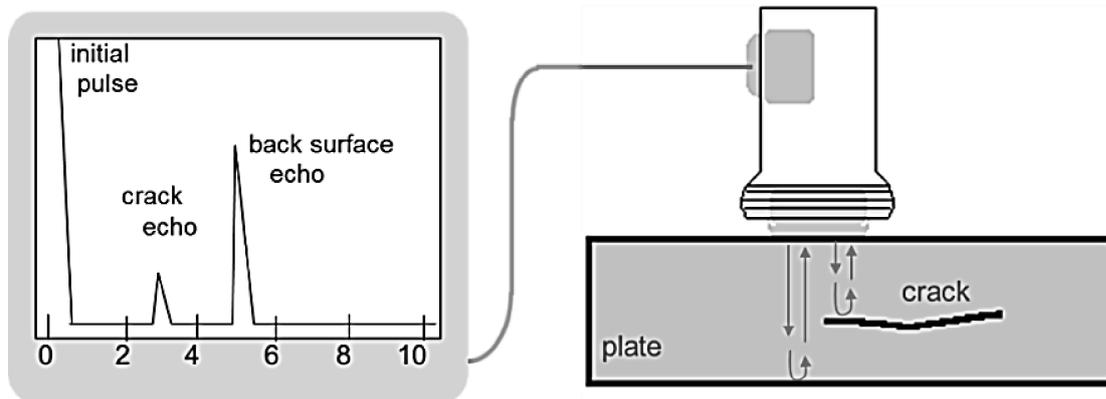
- ۱ - روشی مطمئن و بدون خطر جانبی و مسائل و مشکلات ایمنی در مقایسه با رادیوگرافی است.
- ۲ - عمق نفوذ آن در مقایسه با سایر روش‌ها بسیار زیاد است.
- ۳ - نیاز قابل توجهی به مواد مصرفی مانند مواد یا فیلم و غیره ندارد.
- ۴ - برای کلیه فلزات و غیرفلزات قابل استفاده است.
- ۵ - نتایج آزمون بلافاصله قابل دسترسی است.
- ۶ - حساسیت کنترل و توانایی یافتن عیب‌های کوچک در این روش حتی برای مقاطع ضخیم بسیار بالاست.
- ۷ - امکان عیب‌یابی به صورت کاملا خودکار و مکانیزه وجود دارد.
- ۸ - در ارزیابی محل عیب و دسترسی پیدا کردن به عیب از یک طرف قطعه و نیز تخمین اندازه و شکل آنها نسبتاً دقیق است.
- ۹ - تجهیزات آن سبک و قابل حمل است.

محدودیت‌های اصلی بازرسی فراصوت عبارتند از:

- ۱- کار و انجام عملیات نیازمند تکنسین‌های آموزش دیده و با تجربه است.
- ۲- قطعات جوشی با سطح زبر، با شکل بی‌نظم، بسیار کوچک یا نازک را نمی‌توان تشخیص داد، که شامل جوش‌های گوشه نیز می‌شود.
- ۳- ناپیوستگی‌های سطحی ممکن است تشخیص داده نشوند.
- ۴- اعمال کوپلنت بین ترانسدیوسر و جوش برای انتقال انرژی موج صوتی ضروری است.
- ۵- استانداردهای مرجع برای کالیبره کردن تجهیزات و ارزیابی اندازه عیب، لازم هستند.

آزمایش فراصوتی توسط موج منتشر شده از یک مبدل (بلور کوارتز) که مشابه یک موج صوتی ولی با گام و فرکانس بالاتری است، انجام می‌شود. موج‌های فراصوتی از داخل قطعه مورد آزمایش عبور داده شده و با هر گونه تغییر در تراکم داخلی قطعه، منعکس می‌شوند. این موج‌ها توسط یک مبدل (بلور کوارتز) که تحت جریان متناوب قرار داد) که به یک واحد جست و جوگر متصل شده، تولید می‌شوند. امواج منعکس شده (پژواک‌ها) به صورت برجستگی‌هایی نسبت به خط مبنا، بر روی صفحه نمایش دستگاه، ظاهر می‌شوند.

آزمون التراسونیک، یکی از آزمایش‌های نسبتاً پیشرفته در رده‌ی آزمایش‌های غیر مخرب می‌باشد. هنگامی که واحد جست و جوگر به قطعه مورد نظر متصل می‌شود، دو نوع پژواک بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شود. ضربه اول، انعکاس صدا از سطح رویی جسم که در تماس با دستگاه است، و ضربه دوم که مربوط به انعکاس موج از سطح مقابل است. فاصله بین این دو ضربه با دقت کالیبره می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که قطعه در شرایط مناسبی از نظر معایب و نواقص داخلی قرار دارد. هنگامی که یک عیب یا ترک داخلی توسط واحد جست و جو پیدا شود، تولید ضربه سوم می‌کند که بین ضربه اول و دوم بر روی صفحه نمایش ثبت می‌شود. بنابراین مشخص می‌شود که محل این عیب بین سطوح بالا و پایین قطعه (در داخل جسم) است. فاصله میان ضربه‌ها و ارتفاع نسبی آنها محل و میزان سختی (تراکم) عیب مزبور را مشخص می‌کند.



شکل ۱: پژواک‌های حاصل از انعکاس امواج التراسونیک از سطوح قطعه و ترک داخلی.

اکثر بازرسی‌های آلتراسونیک در فرکانس‌های بین ۰/۱ تا ۲۵ مگاهرتز انجام می‌گیرند که این محدوده بسیار بالاتر از محدوده شنوایی انسان (حدود  $20\text{ Hz}$  تا  $20\text{ KHz}$ ) می‌باشد. امواج التراسونیک از نوع ارتعاشات مکانیکی هستند. دامنه ارتعاشات در فلزاتی که تحت بازرسی آلتراسونیک قرار می‌گیرند، سبب ایجاد تنش‌هایی بسیار کمتر از حد الاستیک می‌شود، بنابراین از تأثیرات دائمی روی قطعه جلوگیری می‌شود.

### ۳- تاریخچه آزمون فراصوتی

اولین کاربرد فراصوت برای بازرسی مواد، به سال ۱۹۲۹ باز می‌گردد. دو محقق به نام‌های سوکولوف از روسیه و مالهاوزر از آلمان اولین کسانی بودند که از فراصوت برای بازرسی مواد استفاده کردند. آنها از امواج ممتد برای انجام آزمایشات خود استفاده نمودند. اولین دستگاه عیب‌یاب فراصوتی که در آن، همچون دستگاه‌های مدرن، از پالس-های فراصوتی استفاده شد، در سال ۱۹۴۰ توسط فایرستون به ثبت رسید. این دستگاه که رفلکتسکوپ نامیده شد، بسیاری از محدودیت‌های سیستم‌های قبلی را مرتفع نمود. اولین دستگاه فراصوتی صنعتی، در سال ۱۹۴۳ توسط شرکت اسپری و براساس دستگاه فایرستون، ساخته شد. این دستگاه برای انجام بازرسی فراصوتی به روش تماسی استفاده می‌گردد و منبع تولیدی موج به طور مستقیم بر روی قطعه قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۴۸، اولین سیستم آزمون فراصوتی که امکان آزمون را به روش غوطه‌وری فراهم می‌نمود (در روش غوطه‌وری، قطعه در داخل آب قرار می‌گیرد) توسط اردمن معرفی شد. آزمون فراصوتی در دهه ۱۹۴۰ که جنگ جهانی دوم در جریان بود، شاهد پیشرفت‌های قابل توجهی بود و از دهه ۱۹۵۰ تاکنون نیز بسط و توسعه آن با سرعت و به طور گسترده‌ای در جریان است.

### ۴- تفاوت روش‌های پیشرفته‌ی التراسونیک با روش‌های معمولی

در آزمون‌های معمولی التراسونیک، تشخیص عیب براساس بررسی پاسخ ماده به یکی از عوامل زیراست:

۱- زمان سیر موج

۲- میزان افت شدت موج

در حالی که در روش‌های پیشرفته از عوامل دیگری مثل موارد ذیل نیز استفاده می‌شود:

۱- تغییر سرعت موج (استفاده از خواص الاستیکی ماده)

۲- تفرق یا پراش موج

در آزمون معمولی التراسونیک برای اینکه بتوان از قانون انتشار امواج در محیط الاستیک به ساده‌ترین صورت استفاده نمود از تاثیر بسیاری از عوامل صرف نظر و شرایط ویژه‌ای برای ماده در نظر گرفته می‌شود، مثلاً ماده کاملاً ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود یعنی:

- همگن و همسانگرد است.
- دارای رفتار خطی می‌باشد.
- انتشار بدون تضعیف شدن موج صورت می‌گیرد.
- فرکانس تاثیری بر سرعت انتشار ندارد یعنی اجزای فرکانسی موج در اثر انتشار از هم جدا و به نوعی پخش نمی‌شوند.
- دما بر انتشار موج تاثیری ندارد.

در حالی که شرایط واقعی هیچ یک از فرض‌های در نظر گرفته شده صحیح نیست و ماده خواص الاستیکی پیچیده‌ای دارد. در ارزیابی التراسونیک ماده، هدف اولیه، درک واکنش بین موج و ماده و تعیین خواص ماده از روی اختلاف بین رفتار ماده واقعی با ماده ایده‌آل است. بنابراین فرض‌هایی در ماده ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند که با شرایط واقعی ماده کاملاً متفاوت است. عمده‌ی این فرضیات ایده‌آل سازی ماده عبارتند از:

- همسانگردی (*Isotropic*)
- همگن بودن (*Homogeneous*)
- خطی بودن (*Linear*)
- بدون تضعیف (*Attenuation-Free*)
- بدون پخش شدن (*Dispersion Free*)
- عدم وابستگی به درجه حرارت (*Temperature-Independent*)
- عاری از هر نوع عیب (*No Defects*)
- سطوح مرزی ایده‌آل (*Ideal Boundaries*)
- کاملاً مسطح و صاف (*Flat Smooth*)
- کاملاً به سطح محیط مجاور چسبیده (*Rigidly Bonded Interface*)
- بکارگیری انواع ساده موج (*Canonical Wave Types*)
- موج صفحه‌ای (*Plane Wave*)
- موج کروی (*Spherical Waves*)
- موج هارمونیک (*Harmonic*)

این درحالی است که در واقعیت، شرایطی که عملاً در ماده واقعی وجود دارد کاملاً متفاوت از شرایط ایده‌آل است. مهمترین ویژگی‌های ماده در شرایط واقعی عبارتند از:

- ناهمسانگرد (*Anisotropic*)
- بافت (*Texture*)
- دانه‌های ستونی (*Columnar Grains*)
- دانه‌های پیش آستنیتی (*Prior-Austenite Grains*)
- کامپوزیت (*Composites*)
- ناهمگن بودن (*Inhomogeneous*)
- چندکریستاله بودن (*Polycrystalline*)

- دو فاز بودن (*Two-Phase*)
- خلل و فرج (*Porous*)
- رفتار غیر خطی (*Nonlinear*)
  - رفتار ذاتی (پلاستیک) (*Intrinsic-Plastics*)
  - خسارات (مانند خستگی) (*Damage-Fatigue*)
- استهلاک موج (*Attenuative*)
  - هوا، آب، سیالات ویسکوز (*Viscous Couplants*)
  - پلیمرها
  - تخلخل (*Porosity*)
- دارای رفتار پخش شونده (*Dispersive*)
  - پخش شونده ذاتی (مانند پلیمرها)
  - پخش شونده هندسی (*Geometrical*)
- وابستگی به دما (*Temperature-Dependence*)
  - ایجاد رفتار غیر خطی (*Nonlinearity*)
  - تنش‌های پسماند (در کامپوزیت‌ها) (*Residual Stress*)
  - تبدیلات فازی (در فلزات) (*Phase Transformation*)
  - درصد رطوبت (در پلیمرها) (*Moisture Content*)
- عیوب داخلی قطعه (*Defects*)
  - ترک‌ها (*Cracks*)
  - ریزحفره‌ها (*Voids*)
  - عدم پیوستگی (*Misbond*)
  - جدایش لایه‌ای (*Delaminations*)
- مرزهای ناکامل دانه‌ها (*Imperfect Boundaries*)
  - مرز خشن (*Rough*)
  - مرز منحنی (*Curved*)
  - لغزش (*Slip*)
- استفاده از انواع پیچیده‌ی موج (*Complex Wave Types*)
  - رفع اثرات ناشی از قطع دنباله (*Apodization*) و دامنه‌ی موج (*Amplitude*)
  - تمرکز و کانونی کردن موج توسط تغییر فاز (*Focusing*)
  - ضربان دهی (*Impulse*)
  - انفجار فرکانسی (*Tone-Burst*)

در حالت واقعی، واکنش‌های بین موج و ماده با شرایط ایده‌آل کاملاً متفاوت است. عمده‌ی برهمکنش‌هایی که بین موج و ماده رخ می‌دهند شامل موارد زیر می‌شود که هر کدام از آنها در مباحث بازرسی التراسونیک پیشرفته مد نظر قرار می‌گیرند.

- ناهمسانگردی در گرایش موج (*Anisotropy-Orientation*)
- دوشقه شدن (*Birefringence-Polarization*)
- وضعیت وضعیتی کواشی (سه موجه شدن) (*Quasi-Mode*)

- جهت گیری فاز و دسته موج (*Phase and Group Direction*)
- اثر تنش‌های پسماند (*Residual Stress Effect*)
- نویز پراش غیر همگرا (*Incoherent Scattering Noise*)
  - ضعف (*Attenuation*)
  - پراکندگی (*Dispersion*)
- تولید هارمونیک (*Harmonic Generation*)
  - آکوستوالاستیسیته (*Acoust- Elasticity*)
  - بسته شدن ترک (*Crack-Closure*)
- جذب (*Absorption*)
  - ویسکوزیته (*Viscosity*)
  - آرام شدن (*Relaxation*)
  - انتقال حرارت (*Heat Conduction*)
  - پراش (*Scattering*)
  - ناهمگنی الاستیک (*Elastic Inhomogeneity*)
  - ناهمواری هندسی (*Geometrical Irregularity*)
- آرامش موج (*Relaxation*)
  - رزونانس (*Resonance*)
  - تغییر سرعت موج (*Wave Velocity*)
  - اعوجاج پالس (*Pulse Distortion*)
- تغییرات سرعت (*Velocity Change*)
  - انبساط حرارتی (*Thermal Expansion*)
- تبدیل وضعیت موج (*Mode Conversion*)
  - انعکاس (*Refraction*)
  - پراش (*Diffraction*)
  - تفرق (*Scattering*)
- توزیع پرتو (*Beam Spread*)
  - از دست دادن پراش (*Diffraction Loss*)
  - امواج لبه ای (*Edge Waves*)
  - اعوجاج طیف (*Spectral Distortion*)

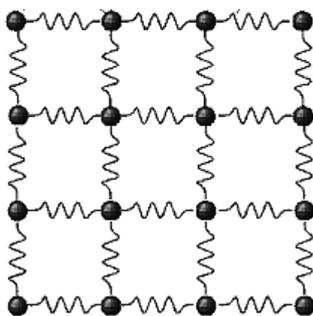
فصل دوم

# مبانی انتشار امواج مکانیکی

## موج و انتشار امواج

به هر آشفتگی در محیط که در فضا منتشر می‌شود و اغلب حامل انرژی است موج<sup>۱</sup> می‌گویند. امواج در حالت کلی به دو دسته مکانیکی و الکترومغناطیسی تقسیم بندی می‌شوند. موج های مکانیکی تنها در محیط های مادی تولید می شوند در صورتی که امواج الکترومغناطیسی علاوه بر محیط های مادی، از خلاء نیز عبور می کنند. برای تولید موج نیازمند چشمه موج است و جابه جایی موج در محیط را انتشار موج می نامند.

مواد از اتمها (یا مولکولها) ساخته شده‌اند. اتمها توسط نیروهای بین اتمی به یکدیگر متصل شده‌اند. نیروهای بین اتمی کشسان (الاستیک) هستند، بدین معنی که می‌توان تصور نمود که اتمها وزنه‌هایی هستند که توسط فنرهایی به یکدیگر متصل شده‌اند. مدل ساده‌ای از چنین ماده‌ای در شکل ۱ زیر نشان شده است.



شکل ۱- مدل اتمی فنر و وزنه.

حال اگر یکی از اتم‌های این ماده با اعمال نیرویی نسبت به موقعیت اولیه خود جابه‌جا شود، این اتم‌ها همانند وزنه مثال قبل شروع به نوسان خواهد کرد و به لحاظ ارتباطی که بین اتم‌ها وجود دارد باعث نوسان اتم‌های مجاور آن می‌گردد. با نوسان اتم‌های مجاور، حرکت ارتعاشی به سایر اتم‌ها منتقل شده و این انتقال نوسان (انرژی) زنجیروار ادامه می‌یابد. اگر تمامی اتم‌ها به صورت صلب به یکدیگر متصل شده بودند، تمامی آن‌ها با هم شروع به حرکت کرده و همواره در موقعیت حرکتی ثابتی قرار داشتند و یا به عبارت دیگر تمامی آن‌ها دارای فاز یکسانی بودند. اما از آنجا که اتم‌های ماده توسط نیروهای کشسان به یکدیگر متصل شده‌اند، زمان معینی برای انتقال ارتعاش از یک اتم به اتم دیگر لازم است و اتم‌های که دیرتر به حرکت در می‌آیند نسبت به اتم‌های اولیه دارای پس فاز هستند. امواج را بر اساس نوع آنها به سه دسته‌ی کلی می‌توان تقسیم نمود:

۱. موج های مکانیکی: امواج آب، امواج صوتی و امواج ارتعاشی زمین لرزه. همه این موج ها مکانیکی بوده و دو ویژگی دارند:

- همه‌ی آن‌ها از قانون دوم نیوتون پیروی می‌کنند (توسط قانون دوم نیوتون فرمول بندی می‌شوند).
- فقط در محیط‌های مادی منتشر می‌شوند.

۲. موج های الکترومغناطیسی: این موج ها ناشناخته تر هستند، مانند نور مرئی و فرابنفش، امواج رادیویی و تلویزیونی، امواج رادار و امواج X. این موج ها برای انتشار به محیط مادی نیاز ندارند و همه ی امواج الکترومغناطیسی با سرعت نور در خلا حرکت می‌کند.

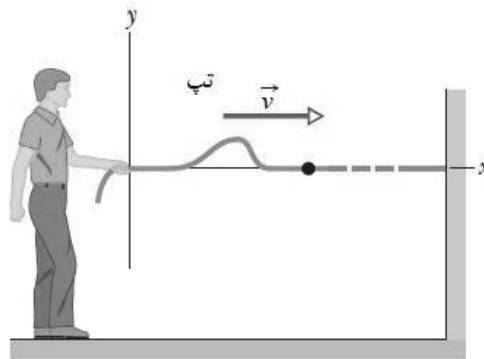
۳. موج های مادی: استفاده از این موج ها در تکنولوژی جدید مرسوم است، اما ناشناخته‌تر هستند. این موج ها با الکترون ها، پروتون ها و دیگر ذرات بنادی سرو کار دارد. چون این ذرات تشکیل دهنده مواد هستند، امواج ایجاد شده توسط آن ها موج های مادی نامیده می‌شود.

<sup>۱</sup>Wave

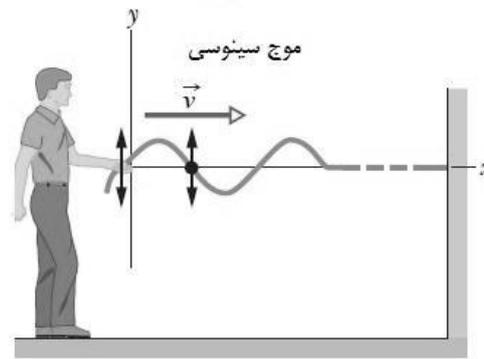
## انواع موج بر اساس شکل

### ۱- موج عرضی

یک روش دیگر برای مطالعه ی موج ها، بررسی شکل موج است. شکل ۲ موجی را نشان می دهد که در طول طناب به طرف راست حرکت می کند در حالی که خود طناب به بالا و پایین حرکت می کند. به چنین موج هایی که جهت حرکت ذرات محیط بر جهت حرکت موج عمودند موج عرضی گفته می شود.



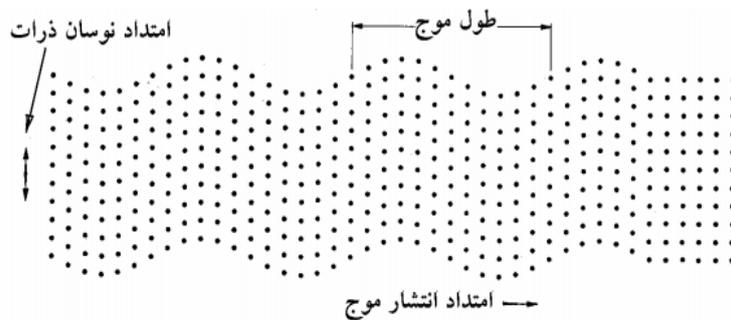
(a)



(b)

شکل ۲: (a) یک تپ در طول طناب کشیده حرکت می کند. (b) یک موج سینوسی عرضی در طول طناب.

در موج عرضی همیشه دو جهت وجود دارد که به صورت مستقل از هم برای جهت موج مورد استفاده قرار می گیرند. امواج عرضی که به آنها امواج برشی<sup>۱</sup> (SW) نیز گفته می شود امتداد نوسان ذرات ماده عمود بر جهت انتشار موج است.

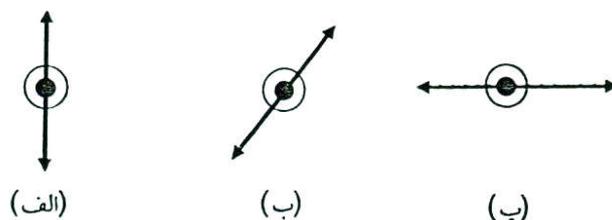


شکل ۳: جهت انتشار و امتداد نوسان در یک موج عرضی.

<sup>۱</sup>Transverse wave

<sup>۲</sup>Shear wave (SW)

اگر امتداد نوسان ذرات مطابق هریک از حالت های نشان داده شده در شکل ۴ نیز باشد، باز هم چنان موج عرضی خواهد بود، زیرا هنوز هم امتداد نوسان ذرات عمود بر جهت انتشار موج است.

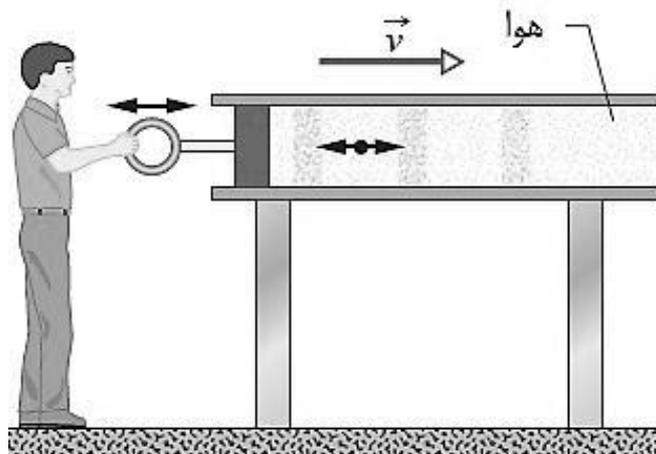


شکل ۴: موج های عرضی که در صفحات مختلفی پلاریزه شده اند.

موج عرضی در صفحاتی که عمود بر صفحه کاغذ بوده و زاویه های مختلفی با محور افقی می سازد می تواند انتشار یابد. هر یک از این صفحات یک صفحه پلاریزاسیون برای موج عرضی است و موج می تواند در صفحه های مختلفی پلاریزه شود. دو حالت نشان داده شده در شکل های ۴ (الف) و (پ) از اهمیت بیشتری برخوردارند. موج نشان داده شده در شکل ۴ (الف) که در آن امتداد نوسان ذرات در امتداد قائم است را موج برشی قائم (SV) و موج نشان داده شده در شکل ۴ (پ) که در آن امتداد نوسان ذرات در امتداد افق است را موج برشی افقی (SH) می نامند. این دو نوع موج عرضی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. مهمترین تفاوت آنها در چگونگی بازتابیده و شکسته شدن این امواج در برخورد با سطح مشترک دو محیط است که در بخش بعد مورد بحث قرار خواهند گرفت. در آزمون های غیرمخرب غالباً از امواج برشی قائم SV استفاده می شود و در حالت کلی اگر نوع موج عرضی مشخص نشده باشد، منظور موج SV است.

## ۲- موج طولی

شکل ۵، موج صوتی را نشان می دهد که در طول استوانه ی پر از هوا تولید شده است. با حرکت پیستون به طرف جلو و عقب یک حرکت هماهنگ ساده تولید می شود که در طول سیلندر به پیش می رود، چنین موج هایی که جهت حرکت ذرات محیط با جهت انتشار موج موازی باشد، موج طولی<sup>۳</sup> می نامند. لازم به ذکر است که هر دو موج عرضی و طولی، موج رونده نامیده می شوند. در انتشار موج طولی بخشی از ذرات فشرده شده و بخش های مجاور آن از هم باز می شوند و لذا به این نوع موج، موج فشاری نیز گفته می شود.



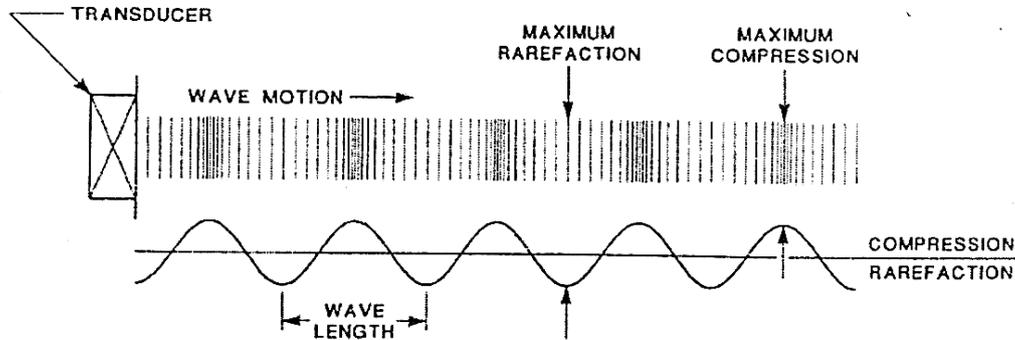
شکل ۵: یک موج صوتی که در طول استوانه تولید شده، یک موج طولی است.

<sup>۱</sup>Shear Vertical (SV)

<sup>۲</sup>Shear Horizontal (SH)

<sup>۳</sup>Longitudinal wave

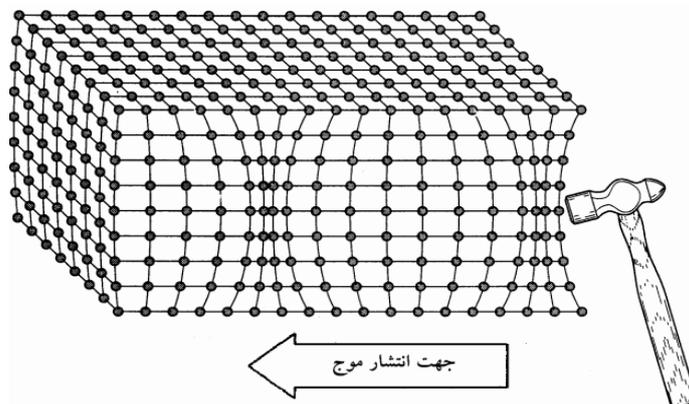
یک موج طولی به شکل فشردگی و فاصله گرفتن ذرات در محیط انتشار پیدا می کند مانند کشیدن و رها کردن یک نوار لاستیکی کشسان. در نقاطی که ذرات در آن متراکم و نزدیک هم هستند، فشار و چگالی ذرات در بیشترین حالت است و در نقاطی که پراکندگی و از هم فاصله گرفتن ذرات وجود دارد، فشار و چگالی در کم ترین حالت خود قرار دارند.



شکل ۶: موج طولی.

امواج طولی را امواج متراکم نیز می نامند. امواج صوتی، امواج سونامی، امواج فراصوت، موج های P زلزله، ارتعاش گاز، موج های داخل آب و .. نمونه هایی از امواج طولی اند. لازم به ذکر است که در گازها فقط امواج طولی منتشر می شوند.

امواج طولی به صورت تنش های نرمال کششی و فشاری در ماده منتشر می شوند درحالی که امواج عرضی از جنس تنش های برشی هستند. از آنجا که مایعات قابلیت تحمل تنش برشی را ندارند، امواج عرضی در مایعات نمی-توانند انتشار یابند. همان طور که گفته شد، در موج عرضی امتداد نوسان ذرات عمود بر جهت انتشار موج است. شکل ۷ چگونگی نوسان ذرات در هنگام انتشار این نوع موج را نشان می دهد.



شکل ۷: چگونگی نوسان ذرات در انتشار موج طولی.

### ۳- موج سطحی (ریلی)

به امواج طولی و عرضی، امواج حجمی نیز گفته می شود، زیرا این دو نوع موج در درون ماده می تواند انتشار یابد. انواع دیگری از امواج وجود دارند که در نتیجه وجود یک یا چند مرز در ماده ایجاد می شوند. این امواج، امواج سطحی<sup>۱</sup> هستند که در نتیجه وجود یک سطح آزاد ایجاد می شوند. موج سطحی بر روی سطح یک ماده جامد که در مجاورت با هواست انتشار می یابد.

<sup>۱</sup>Surface wave