





دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

شبیه سازی تاثیر القای امواج التراسونیک بر فرایند
اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار

استاد راهنما

دکتر یعقوب طادی بنی

استاد مشاور

دکتر حسین گلستانیان

پژوهشگر

محمد بهاروند

مهر ماه ۱۳۹۲



دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه آقای محمد بهاروند جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان: شبیه سازی تاثیر القای امواج التراسونیک بر فرایند اکستروژن در کانال های هممقطع زاویه دار در تاریخ ۱۳۹۲/۰۷/۱۶ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و نمره ۱۷/۹ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنما پایان نامه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه علمی استادیار امضا
۲. استاد مشاور پایان نامه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه علمی دانشیار امضا
۳. استاد داور پایان نامه دکتر احسان زمانی با مرتبه علمی استادیار امضا
۴. استاد داور پایان نامه دکتر هادی همایی بروجنی با مرتبه علمی استادیار امضا

دکتر بهزاد قاسمی
معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی
دانشکده فنی و مهندسی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تلمیذ بی ارادت، عاشق بی زر است و رونده بی معرفت، مرغ بی پر و عالم بی عمل، درخت بی بر و زاهد بی علم، خانه بی در.
سپاس پروردگار یگانه را به خاطر توفیق کسب دانش در کنار استادان گران قدر و دوستان صمیمی.

تقدیم به

پدر، مادر و خانواده
مهربان و همیشه بهاری ام

چکیده

فرایند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار^۱ به عنوان یک فرایند بسیار قوی جهت بهره‌مندی و ایجاد خواص مختلف در هنگام اکستروژن مواد در سال‌های اخیر مورد توجه دانشمندان و مهندسان قرار گرفته است. فرایند مذکور در واقع نوع خاصی از عملیات اکستروژن بوده و اصطلاحاً از جمله فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید^۲ می‌باشد که برای تحقق آن‌ها نیاز به اعمال نیروهای بسیار بزرگ می‌باشد. این فرایند یکی از روش‌های تولید مواد ریزساختار و نانوساختار است. از سوی دیگر یکی از مزایای اثبات شده ارتعاشات التراسونیک کمک به فرایندهای شکل‌دهی در قالب کاهش نیروی مورد نیاز فرایند، کاهش تنش سیلان، کاهش و حذف روانکارها و ... می‌باشد. در این پایان‌نامه سعی شده است تلفیقی از دو موضوع فوق به منظور بهره‌گیری از مجموعه امتیازات هر دو پروسه در کنار یکدیگر مورد ارزیابی قرار گیرد.

در فرایند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار همراه با نوسانات التراسونیک، بیلت^۳ تحت تاثیر نیروی فشاری، از دو کانال با مقاطع یکسان که با یکدیگر زاویه می‌سازند عبور داده می‌شود و این در حالی است که هم‌زمان قالب تحت ارتعاشات التراسونیک قرار می‌گیرد.

تاکنون تلاش‌های فراوانی به منظور تحلیل اثرات این‌گونه ارتعاشات در فرایندهای شکل‌دهی نظیر کشش عمیق، کشش سیم، فورج و اکستروژن انجام گرفته است. از آنجایی که پدیده نوسانات التراسونیک در سرعت‌های بالایی رخ می‌دهد، تجزیه و تحلیل دقیق و درک چگونگی مکانیزم اعمال آن‌ها در فرایندهای شکل‌دهی بر اساس یافته‌ها و مشاهدات تجربی بسیار مشکل می‌باشد. به همین دلیل روش‌های اجزای محدود در این زمینه به کار گرفته شده‌اند. در این پژوهش از نرم‌افزار تجاری ABAQUS به منظور تحلیل مساله استفاده شده است. در ابتدا مدلسازی فرایند معمولی انجام و صحت آن در قیاس با مراجع موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. کاهش نیروی متوسط اکستروژن به دلیل ارتعاشات التراسونیک در سرعت‌های اکستروژن کمتر از سرعت بحرانی از جمله نتایج به دست آمده است. افزایش دامنه ارتعاشات بر کاهش بیشتر این نیرو موثر است. همچنین کاهش تنش سیلان ماده مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: تغییرشکل پلاستیک شدید، اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار، ارتعاشات التراسونیک، سرعت بحرانی، فرکانس و دامنه ارتعاشات، روش المان محدود.

¹ Equal Channel Angular Extrusion

² Severe Plastic Deformation

³ Billet

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴	فهرست شکل‌ها
۷	فهرست جدول‌ها
۸	فهرست نمادها
۹	فصل اول - مقدمه
۱۰	۱-۱ مشخصات امواج التراسونیک
۱۱	۲-۱ خواص عمومی امواج التراسونیک
۱۲	۳-۱ انواع امواج التراسونیک
۱۲	۱-۳-۱ امواج طولی
۱۲	۲-۳-۱ امواج عرضی یا برشی
۱۳	۳-۳-۱ امواج سطحی
۱۴	۴-۱ مولدهای امواج التراسونیک
۱۴	۱-۴-۱ کریستال‌های پیزوالکتریک
۱۵	۲-۴-۱ خواص کریستال‌ها
۱۵	۳-۴-۱ کریستال‌های کوارتز
۱۶	۵-۱ تجهیزات تولید امواج التراسونیک
۱۶	۱-۵-۱ اجزای یک سیستم التراسونیک
۱۶	۲-۵-۱ ژنراتور التراسونیک
۱۷	۳-۵-۱ مبدل التراسونیک
۱۸	۴-۵-۱ متمرکزکننده انرژی التراسونیک
۱۹	۶-۱ کاربرد امواج التراسونیک
۲۰	۷-۱ روش تغییر شکل پلاستیک شدید، راهکاری برای تولید مواد نانوساختار
۲۱	۱-۷-۱ مفهوم تغییر شکل پلاستیک شدید
۲۱	۲-۷-۱ روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید
۲۲	۱-۲-۷-۱ فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مواد بالک
۲۳	۲-۲-۷-۱ فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای ورق‌ها
۲۵	۳-۲-۷-۱ فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله‌ها
۲۷	فصل دوم - اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار و ارتعاشات التراسونیک
۲۷	۱-۲ پیشگفتار
۲۷	۲-۲ فرایند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار
۲۹	۳-۲ معرفی مسیرهای مختلف فرایند ECAE
۳۰	۴-۲ محدودیت‌های فرایند ECAE

۳۰	۵-۲ فرمولاسیون فرایند ECAE
۳۲	۶-۲ مواد تحت آزمایش در فرایند ECAE
۳۲	۷-۲ ویژگی‌ها و خصوصیات فرایند ECAE
۳۲	۱-۷-۲ ساختار مواد
۳۳	۲-۷-۲ خواص مکانیکی
۳۳	۳-۷-۲ رفتار سوپرپلاستیک
۳۴	۷-۳ برخی نتایج تحلیل فرایند ECAE
۳۴	۱-۷-۳ اصطکاک در فرایند ECAE
۳۴	۲-۷-۳ زوایای ψ و ϕ در فرایند ECAE
۳۵	۳-۷-۳ شبیه سازی المان محدود فرایند ECAE
۳۷	۴-۷-۳ دما در فرایند ECAE
۳۷	۸-۲ ارتعاشات التراسونیک و فرایندهای شکل‌دهی
۴۲	۹-۲ بررسی اثر ارتعاشات التراسونیک بر نیروی اصطکاک
۴۴	۱۰-۲ ارتعاشات التراسونیک و مفهوم سرعت بحرانی
۴۵	فصل سوم - شبیه‌سازی اجزای محدود بوسیله نرم افزار ABAQUS و بررسی نتایج
۴۵	۱-۳ پیشگفتار
۴۵	۲-۳ مدل‌سازی فرایند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار
۴۶	۱-۲-۳ فرایند تجربی
۴۶	۲-۲-۳ شبیه‌سازی المان محدود فرایند
۵۱	۳-۳ نمایش و مقایسه نتایج
۵۱	۱-۳-۳ مقایسه تنش‌ها و کرنش‌ها
۵۲	۲-۳-۳ نیروی اکستروژن بر حسب جابه‌جایی
۵۴	۳-۳-۳ بررسی ارتباط سرعت اکستروژن و متوسط نیروی اکستروژن
۵۵	۴-۳-۳ بررسی رابطه میان دامنه ارتعاشات التراسونیک و متوسط نیروی اکستروژن
۶۱	۵-۳-۳ بررسی ارتباط دامنه ارتعاشات التراسونیک، متوسط نیروی اکستروژن و زاویه قالب
۶۷	۶-۳-۳ مقایسه تنش و کرنش پلاستیک در فرایندهای ECAE و UECAE در دامنه ارتعاشات و زوایای مختلف قالب
۷۲	۷-۳-۳ جدایش بیلت و قالب و کاهش نیروی اکستروژن در فرایند UECAE
۷۳	فصل چهارم - جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات
۷۳	۱-۴ جمع‌بندی نتایج
۷۴	۲-۴ پیشنهاداتی برای پروژه‌های آینده
۷۵	مقالات استخراج شده از این پایان‌نامه

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمایش محدوده فرکانس امواج صوتی ۱۰
- شکل ۲-۱: نمایش نحوه فشرده سازی مولکول های محیط توسط موج التراسونیک، دامنه و طول موج ۱۱
- شکل ۳-۱: امواج طولی در نوسان یک مجموعه پاندول ۱۲
- شکل ۴-۱: ارتعاشات کمپرسی ۱۲
- شکل ۵-۱: انتشار امواج عرضی ۱۳
- شکل ۶-۱: انتشار امواج سطحی در فولاد ۱۳
- شکل ۷-۱: امواج ورقه‌ای خمشی ۱۴
- شکل ۸-۱: امواج ورقه‌ای قرینه‌ای ۱۴
- شکل ۹-۱: تبدیل هم‌زمان انرژی الکتریکی و مکانیکی در پیزوالکتریک‌ها ۱۴
- شکل ۱۰-۱: تغییر شکل فیزیکی کریستال در اثر جریان الکتریکی ۱۵
- شکل ۱۱-۱: کریستال کوآرتز و برش‌های آن ۱۵
- شکل ۱۲-۱: ژنراتور التراسونیک ۱۶
- شکل ۱۳-۱: نمایش روش کار مبدل گازی ۱۷
- شکل ۱۴-۱: نمای داخلی مبدل با نیروی محرکه مایع ۱۷
- شکل ۱۵-۱: نمایش شمایی مبدل الکترومغناطیسی ۱۸
- شکل ۱۶-۱: اشکال مختلف میله‌های صوتی ۱۹
- شکل ۱۷-۱: دسته بندی کلی روش های تغییر شکل پلاستیک شدید بر اساس شکل محصول ۲۲
- شکل ۱۸-۱: فرایند پیچش با فشار بالا، از سمت راست به ترتیب: با سنبه چرخان، با قالب چرخان، نمونه تحت فرایند ۲۲
- شکل ۱۹-۱: شکل شماتیک فرایند فورج چند جهته ۲۳
- شکل ۲۰-۱: تصویر شماتیک فرایند اکستروژن - فشار تناوبی ۲۳
- شکل ۲۱-۱: تصویر شماتیک و مراحل فرایند پیوند نوردی انباشتی ۲۴
- شکل ۲۲-۱: شماتیک فرایند کنگره‌دار کردن و صاف کردن متوالی ۲۴
- شکل ۲۳-۱: سمت راست: مقایسه تفاوت دو روش CGP (بالا) و RCS (پایین) [۱۸]، سمت چپ: فرایند کنگره دار کردن دو مرحله ای ۲۵
- شکل ۲۴-۱: مراحل مختلف فرایند فشردن در کانال زاویه دار لوله ای موازی ۲۵
- شکل ۲۵-۱: شمای کلی و مراحل فرایند فشردن در کانال لوله‌ای ۲۶
- شکل ۱-۲: شماتیک فرایند ECAE ۲۸
- شکل ۲-۲: مسیرهای متداول در فرایند ECAE ۲۹

- شکل ۲-۳: فرایند ECAE برای ورق های ضخیم ۲۹
- شکل ۲-۴: نمونه آزمایشگاهی قالب فرایند ECAE ۳۰
- شکل ۲-۵: پارامترهای هندسی فرمولاسیون فرایند ECAE ۳۱
- شکل ۲-۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی قبل و پس از فرایند ECAP ۳۲
- شکل ۲-۷: تغییرات تنش تسلیم بر حسب اندازه دانه ۳۳
- شکل ۲-۸: شماتیک تحلیل المان محدود فرایند ECAE ۳۶
- شکل ۲-۹: نتایج تست کشش و فشار ساده در حالت با و بدون ارتعاشات التراسونیک ۳۸
- شکل ۲-۱۰: شماتیک فرایند تست فشار التراسونیک ۳۸
- شکل ۲-۱۱: نمودار جابه‌جایی بر حسب کاهش نیروی فشاری ۳۹
- شکل ۲-۱۲: نمودار جابه‌جایی بر حسب کاهش نیروی فشاری در دماهای مختلف ۴۰
- شکل ۲-۱۳: نیروی اصطکاک، سرعت ماده و قالب ۴۲
- شکل ۲-۱۴: تغییرات سرعت و نیروی اصطکاک در یک سیکل ۴۳
- شکل ۳-۱: نمودار تنش- کرنش به کار گرفته شده در ناحیه پلاستیک مدل‌سازی ۴۷
- شکل ۳-۲: تعیین خواص بیلت در نرم‌افزار ۴۸
- شکل ۳-۳: نمای فرایند در مدول Assembly ۴۸
- شکل ۳-۴: تعیین شرایط تماسی ۴۹
- شکل ۳-۵: شرایط مرزی در مدول Load ۴۹
- شکل ۳-۶: شبکه‌بندی مدل ۵۰
- شکل ۳-۷: حل مساله ۵۰
- شکل ۳-۸-۱: توزیع تنش فون میسز به دست آمده توسط کریشنایا و همکاران ۵۱
- شکل ۳-۸-۲: توزیع تنش فون میسز در مدل‌سازی ۵۱
- شکل ۳-۹-۱: توزیع کرنش پلاستیک معادل به دست آمده توسط کریشنایا و همکاران ۵۲
- شکل ۳-۹-۲: توزیع کرنش پلاستیک معادل در مدل‌سازی ۵۲
- شکل ۳-۱۰: مقایسه نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق و نتایج کریشنایا و همکاران ۵۳
- شکل ۳-۱۱: نمودار انرژی جنبشی و داخلی بر حسب زمان ۵۳
- شکل ۳-۱۲: ارتباط سرعت اکستروژن و متوسط نیروی اکستروژن ۵۵
- شکل ۳-۱۳: نوسان نیروی اکستروژن در حین اعمال ارتعاشات التراسونیک ۵۶
- شکل ۳-۱۴-۱: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($f=20\text{kHz}$ و $a=5\mu\text{m}$) ۵۷
- شکل ۳-۱۴-۲: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($f=20\text{kHz}$ و $a=10\mu\text{m}$) ۵۷
- شکل ۳-۱۴-۳: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($f=20\text{kHz}$ و $a=15\mu\text{m}$) ۵۷

- شکل ۳-۱۵-۱: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 5\mu m$ و $f = 30 kHz$)
- شکل ۳-۱۵-۲: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 10\mu m$ و $f = 30 kHz$)
- شکل ۳-۱۵-۳: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 15\mu m$ و $f = 30 kHz$)
- شکل ۳-۱۶-۱: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 5\mu m$ و $\phi = 90^\circ$)
- شکل ۳-۱۶-۲: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 10\mu m$ و $\phi = 90^\circ$)
- شکل ۳-۱۶-۳: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 15\mu m$ و $\phi = 90^\circ$)
- شکل ۳-۱۷-۱: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 5\mu m$ و $\phi = 120^\circ$)
- شکل ۳-۱۷-۲: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 10\mu m$ و $\phi = 120^\circ$)
- شکل ۳-۱۷-۳: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 15\mu m$ و $\phi = 120^\circ$)
- شکل ۳-۱۸-۱: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 15\mu m$ و $\phi = 135^\circ$)
- شکل ۳-۱۸-۲: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 10\mu m$ و $\phi = 135^\circ$)
- شکل ۳-۱۸-۳: نمودار نیروی اکستروژن بر حسب زمان ($a = 5\mu m$ و $\phi = 135^\circ$)
- شکل ۳-۱۹-۱: کانتور های تنش و کرنش در فرایند ECAE
- شکل ۳-۱۹-۲: کانتور های تنش و کرنش در فرایند UECAE
- شکل ۳-۲۰-۱: کانتور های تنش و کرنش در فرایند ECAE برای المان منتخب
- شکل ۳-۲۰-۲: کانتور های تنش و کرنش در فرایند UECAE برای المان منتخب
- شکل ۳-۲۱-۱: مقایسه تنش فون میسز در فرایند ECAE و UECAE ($\phi = 90^\circ$)
- شکل ۳-۲۱-۲: مقایسه تنش فون میسز در فرایند ECAE و UECAE ($\phi = 120^\circ$)
- شکل ۳-۲۱-۳: مقایسه تنش فون میسز در فرایند ECAE و UECAE ($\phi = 135^\circ$)
- شکل ۳-۲۲: نوسان نیروی اکستروژن در حین اعمال ارتعاشات التراسونیک

فهرست جدول‌ها

- ۵۵ جدول (۱-۳): سرعت بحرانی در دامنه‌های متفاوت و فرکانس ارتعاشات ۲۰ کیلوهرتز
- ۵۸ جدول (۲-۳): متوسط نیروی اکستروژن و درصد کاهش آن، فرکانس ارتعاشات ۲۰ کیلوهرتز
- ۵۸ جدول (۳-۳): متوسط نیروی اکستروژن و درصد کاهش آن، فرکانس ارتعاشات ۳۰ کیلوهرتز
- ۵۹ جدول (۴-۳): سرعت بحرانی در دامنه‌های متفاوت و فرکانس ارتعاشات ۳۰ کیلوهرتز
- ۶۵ جدول (۵-۳): متوسط نیروی اکستروژن در فرایند ECAE
- ۶۵ جدول (۶-۳): متوسط نیروی اکستروژن در فرایند UECAE و درصد کاهش آن نسبت به فرایند ECAE ($\phi = 90^\circ$)
- ۶۵ جدول (۷-۳): متوسط نیروی اکستروژن در فرایند UECAE و درصد کاهش آن نسبت به فرایند ECAE ($\phi = 120^\circ$)
- ۶۵ جدول (۸-۳): متوسط نیروی اکستروژن در فرایند UECAE و درصد کاهش آن نسبت به فرایند ECAE ($\phi = 135^\circ$)
- ۶۶ جدول (۹-۳): متوسط نیروی اکستروژن در زوایای مختلف قالب

فهرست نمادها

معنی	نماد
سرعت موج	C
فرکانس	f
طول موج	λ
دامنه ارتعاشات	a
کرنش برشی پلاستیک معادل	γ_N
زاویه بین کانال‌های قالب	ϕ
زاویه بیرونی قوس قالب	ψ
فشار	P
تنش تسلیم	σ_0
فرکانس دایروی ارتعاشات	ω
سرعت بحرانی	V_c
نیرو	f
مدول یانگ	E
نسبت پواسون	ν
تنش نرمال	σ
کرنش	ε

فصل اول

مقدمه

در قرون وسطی کارگران ماهری که برای کلیساها ناقوس می‌ساختند به صورت تجربی بعد از ضربه‌زدن به ناقوس از روی صدای آن به سلامت یا وجود عیب در آن پی می‌بردند. از این قانون کارگران راه‌آهن نیز استفاده می‌کردند. بدین ترتیب که با چکش ضرباتی به چرخ‌های واگن‌ها می‌زدند و از روی نت‌های صدا وجود عیب یا شل بودن چرخ‌ها را تشخیص می‌دادند. در ۱۹۱۲ بعد از غرق شدن کشتی تایتانیک نیروی دریایی سعی کرد از طریق ارسال امواج صوتی و دریافت اکوهای برگشتی راهی برای تشخیص محل دقیق کوه‌های یخی بیابد. آن‌ها از این طریق به شناسایی زیر دریایی‌ها در طول جنگ جهانی اول پرداختند. در جنگ جهانی دوم نیز با استفاده از همین روش کمیته تحقیق و تشخیص ضد زیردریایی تشکیل شد که در جنگ آتلانتیک کمک گسترده‌ای به ارتش آمریکا نمود.

در ۱۹۲۹ فیزیکدان روسی به نام سوکولف^۱ به دانش ارسال ارتعاشات تولیدی به درون فلزات پی برد. این کار بعدها توسط آلمان‌ها دنبال شد.

در ابتدا آزمایش التراسونیک^۲ فقط در صنعت هواپیمایی کاربرد داشت اما در سال ۱۹۵۰ در نیروگاه‌های برق بریتانیا برای آزمایش قطعات فولادی با ضخامت‌های بالا مورد استفاده قرار گرفت. بعد از جنگ جهانی دوم در ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای، صنعت نفت و هواپیمایی، آزمایش التراسونیک استفاده گسترده‌تری یافت. امروزه دستگاه‌های UT از نظر اندازه، کارایی و تنوع در کاربرد پیشرفت‌های چشمگیری نموده‌اند [۱].

با گذشت زمان امواج التراسونیک کاربردهای متنوعی یافتند و در سایر علوم نظیر مکانیک، الکترونیک، متالورژی، پزشکی و ... جایگاه ویژه‌ای را از آن خود نمودند. یکی از کاربردهای ویژه این امواج کمک به عملیات شکل‌دهی فلزات است. تاکنون نتایج تجربی و تحلیلی بسیاری در زمینه فرایندهای نظیر کشش و فشار ساده، کشش عمیق، کشش سیم، ورق کاری و ... به دست آمده‌اند که همگی موید فواید استفاده از امواج می‌باشند. خلاصه‌ای از این موارد عبارتند از:

- کاهش نیروی شکل‌دهی مورد نیاز فرایند و کاهش تنش سیلان.
- ارتقای کیفیت سطحی و تکرانسی محصول.
- کاهش و حذف کاربرد روان‌کارها در عملیات شکل‌دهی و در نتیجه کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش احتمال بروز واکنش‌های شیمیایی در حین فرایند [۲ و ۳].

¹ Sokolov

² Ultrasonic test, UT

از سوی دیگر فرایندهای نوظهوری که دارای ویژگی‌های منحصر به فرد در محصول و مراحل عملیات خود می‌باشند یا به عرصه علوم نوین نهاده‌اند. از جمله این موارد می‌توان به فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، SPD، اشاره نمود. در این روش‌ها با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی فلز بهبود چشمگیری می‌یابد. تحقیق در زمینه ارتباط ارتعاشات التراسونیک و فرایندهای مذکور می‌تواند برای اولین بار به عنوان یکی از موضوعات مهم پژوهشی مورد توجه قرار گیرد.

در این فصل ابتدا توضیحاتی در خصوص امواج التراسونیک، مشخصات، انواع، روش‌های تولید و کاربردهای آن‌ها ارائه شده و در ادامه فرایندهای SPD به شکل مختصر تشریح گردیده‌اند.

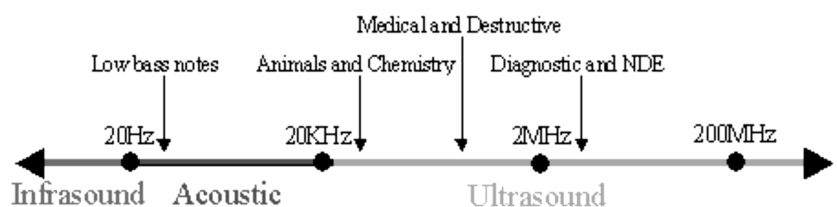
۱-۱ مشخصات امواج التراسونیک

امواج التراسونیک، دسته‌ای از امواج فشاری هستند که ماهیت مکانیکی دارند بنابراین در موادی (جامد، مایع و گاز) که خواص الاستیک از خود بروز دهند انتشار می‌یابند. این انتشار در مایعات و گازها به صورت طولی است ولی در جامدات حرکت ذرات به صورت عمود بر موج (یعنی به شکل موج عرضی) نیز روی می‌دهد. اصولاً امواج طولی سبب تغییر فشار لایه‌های مولکولی محیط و امواج عرضی سبب تغییر تنش برشی محیط می‌شوند [۴].

در یک محیط واسط، حرکت طولی موج صوتی به دلیل حرکت ارتعاشی مولکول‌های محیط به جلو و عقب، مانند یک فنر که کشیده شده و سپس رها گردیده، فازهای متناوبی از تراکم و انبساط ایجاد می‌کند بدون این که سبب حرکت این لایه‌ها شود. در نتیجه در نقطه‌ای که لایه‌های مولکولی ماده واسط فشرده شده‌اند، فشار بالاتر و در ناحیه کم‌تراکم فشار پایین‌تر از حد نرمال است.

طیف کلی امواج صوتی به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

- امواج صوتی با فرکانس کمتر از ۲۰ هرتز را امواج مادون صوت^۱ می‌نامند.
- امواج صوتی با فرکانس بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را امواج صوتی شنوایی می‌نامند.
- امواج صوتی با فرکانس بیش از ۲۰ کیلوهرتز را امواج ماورای صوت یا التراسوند^۲ می‌نامند. شکل ۱-۱ محدوده تعاریف فوق را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۱-۱: نمایش محدوده فرکانس امواج صوتی [۴].

بنابراین وجه تمایز امواج صوتی قابلیت شنوایی آن‌ها می‌باشد. انسان قادر است موج‌های صوتی با فرکانس ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ سیکل در ثانیه را بشنود. این امواج به دلیل خواصی که دارند کاربردهای متنوع و بعضاً جالبی

^۱ Subsonic

^۲ Ultrasound

دارند. امواج صوتی که کاربرد صنعتی دارند حداکثر ۱۰۰۰۰۰ سیکل در ثانیه است. موج التراسونیک با عبور یک جریان الکتریکی (معمولاً ۶۰ سیکل متناوب) از یک ژنراتور مناسب که مبدل^۱ نام دارد ایجاد می شود. در ادامه تعریف برخی از پارامترهای مرتبط با این امواج ارائه شده است.

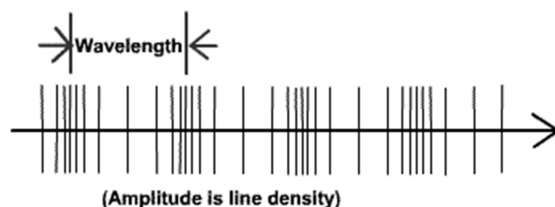
سرعت: نشان دهنده مسافت طی شده توسط موج در محیط واسطه در واحد زمان است و بر حسب cm/s نشان داده می شود. خصوصیتی مانند گرانش و سختی محیط بر سرعت تاثیر می گذارند.

فرکانس: نشان دهنده تعداد سیکل ها یا چرخه های موج صوتی در یک ثانیه است. همان گونه که پیش تر نیز گفته شد فرکانس امواج صوتی نوع کاربرد آن ها را تعیین می کند. مثلاً برای کاربردهای آنالیزی، تحقیقاتی و تشخیص های پزشکی بسامدهای بالای ۱۰۰ کیلوهرتز مناسب هستند.

طول موج: فاصله ای است که در آن یک چرخه کامل صوتی روی می دهد، که در یک موج صوتی، این مسافت دربرگیرنده فاصله بین دو ناحیه متوالی انبساط و یا تراکم است. معمولاً با استفاده از دو متغیر فرکانس و سرعت، می توان طول موج را به وسیله رابطه ۱-۱ محاسبه کرد.

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad 1-1$$

در رابطه فوق C نشان دهنده سرعت، f نشان دهنده فرکانس و λ طول موج است. طول موج امواج التراسونیک با حداقل فرکانس در اجسام جامد، ۲۰۰ میلی متر، در مایعات، ۶۰ میلی متر و در گازها ۱۶ میلی متر می باشد. این طول موج با حداکثر فرکانس در جامدات ۰/۰۰۱ میلی متر، در مایعات، ۰/۰۳۵ میلی متر و در گازها ۰/۰۰۰۶ میلی متر است.



شکل ۱-۲: نمایش نحوه فشرده سازی مولکول های محیط توسط موج التراسونیک، دامنه و طول موج [۴].

دامنه: به معنای میزان تغییرات فشار (مثبت یا منفی) در فازهای تراکم و انبساط است که موج صوتی ایجاد می کند و در واقع به معنای میزان بلندی یک صوت است. دامنه به صورت نیروی اعمال شده در یک سطح خاص به کار می رود و هرچه بزرگ تر باشد، میزان فشردگی لایه های محیط توسط موج صوتی بیشتر است. **شدت:** به معنای اندازه انرژی صوتی است که موج ایجاد می کند، یعنی مقدار انرژی حمل شده بر واحد سطح و در واحد زمان است. واحد معمول شدت، وات بر سانتی متر مربع است. شدت، متناسب با مربع دامنه است [۴]. امواج التراسونیک با فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز را در صنعت ارسال علامات در زیر دریا و مخابرات و امواج با فرکانس های ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز را در عملیات پزشکی، شیمیایی و تشخیص عیوب نظیر ترک ها به کار می برند.

۱-۲ خواص عمومی امواج التراسونیک

¹ Transducer

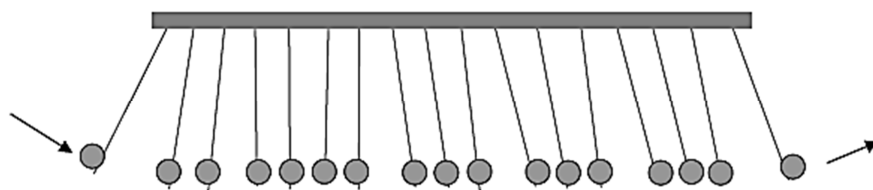
امواج التراسونیک در بسیاری از مواد نفوذ می‌کنند و قادرند تغییرات مهمی را در آن‌ها ایجاد کنند. در آزمایشگاه‌ها، برای زدایش مواد رسوبی روی قطعات، از ظروف التراسونیکی استفاده می‌گردد. در اماکن و سالن‌های مرتفع نظیر فرودگاه‌ها، که به علت ترافیک و تردد مستمر مسافران تمیزکاری سقف آن‌ها مشکل است، به منظور پیش‌گیری از بالا رفتن آلاینده‌های دودی و تیره شدن سقف، از امواج التراسونیک استفاده می‌شود. برای این منظور تا ارتفاع معینی از سقف، تحت پوشش پیوسته امواج قرار گرفته و در نتیجه برخورد امواج با مولکول‌های دود، مولکول‌ها به هم پیوند داده شده و موجب سقوط دوده‌های سنگین می‌شوند [۵].

۳-۱ انواع امواج التراسونیک

۱-۳-۱ امواج طولی^۱

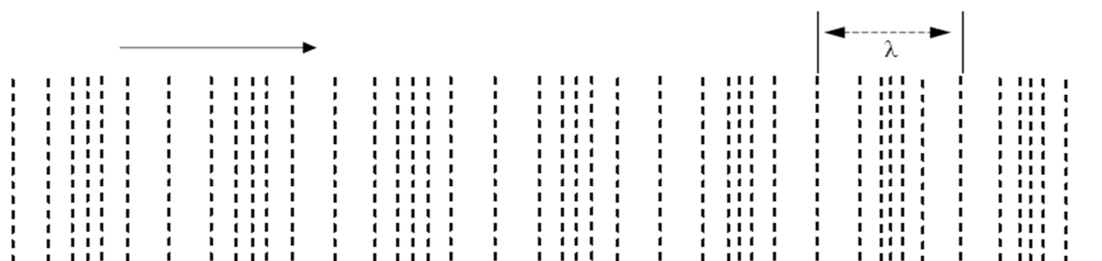
همان‌طور که در تعریف امواج گفته شد، ذرات یک ماده، در زمان ارتعاش، متناسب با جهت نیروی وارده در محدوده خاصیت الاستیکی خود، نوسان خواهند نمود. چنان‌چه جهت انتشار امواج با جهت ارتعاش ذرات یکسو باشد، امواج طولی تولید می‌گردد.

همچنین چون مواد دارای خواص انبساط و انقباض الاستیکی می‌باشند، انتشار امواج طولی به حالت‌های انبساطی و انقباضی نیز صورت می‌پذیرد. از این‌رو امواج طولی، با نام امواج فشاری^۲ نیز شناخته می‌شوند.



شکل ۳-۱: امواج طولی در نوسان یک مجموعه پاندول [۶].

همان‌گونه که در شکل ۳-۱ دیده می‌شود در یک حرکت پاندولی، نیروی ضربه از ساچمه اول به ساچمه دوم و به تناوب به ساچمه‌های بعدی منتقل شده و در نهایت اثر ضربه به صورت موج به آخرین ساچمه رسیده است. در شکل ۴-۱ نیز نوسان منظم ذرات یک ماده در حال ارتعاش فشاری دیده می‌شود که با فرایند انبساطی و انقباضی امواج را به سمت جلو هدایت می‌کنند [۶].



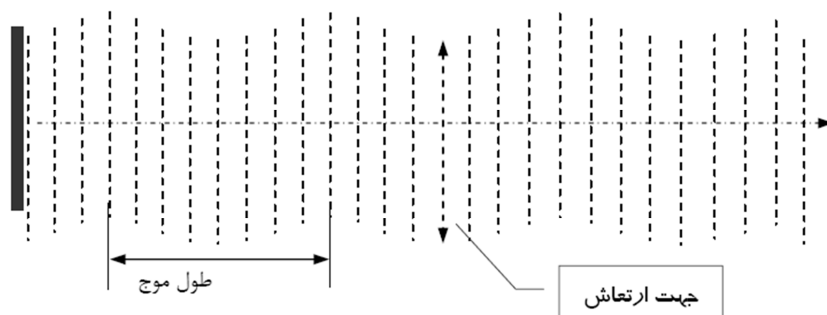
شکل ۴-۱: ارتعاشات فشاری [۶].

۱-۳-۲ امواج عرضی یا برشی^۱

^۱ Longitudinal waves

^۲ Compression wave

در نوع امواج عرضی جهت انتشار امواج عمود بر جهت ارتعاش ذرات می‌باشد. ساده‌ترین نمونه آن امواج دریا است. در شکل ۱-۵ وضعیت ارتعاش ذرات و جهت انتشار امواج عرضی دیده می‌شود. ذرات در جهتی عمود بر جهت حرکت امواج در نوسان هستند.



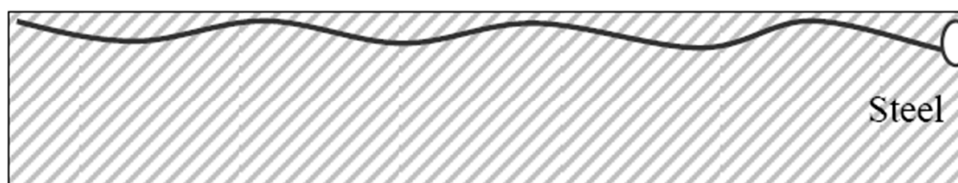
شکل ۱-۵: انتشار امواج عرضی [۶].

سرعت انتشار این امواج نصف سرعت انتشار امواج طولی بوده و به همین دلیل طول موج این امواج خیلی کوتاه‌تر از امواج طولی است. امواج عرضی در مایعات و گازها انتشار نمی‌یابند. زیرا قابلیت ارتجاعی این مواد با حرکت عرضی خیلی کم یا ضعیف یا صفر است [۶].

۱-۳-۳ امواج سطحی^۲

در شرایط خاصی، امواج التراسونیک با دامنه‌ای محدود در سطح جامدات انتشار می‌یابند که به امواج سطحی موسومند. این نوع امواج به لحاظ شکل انتشار، از قوانین امواج طولی و عرضی پیروی نمی‌کنند و شیوه انتشار آن‌ها متفاوت است. سرعت امواج سطحی 0.9 سرعت امواج عرضی می‌باشد. این امواج به دو نوع امواج سطحی ری‌لای^۳ و ورقه‌ای^۴ تقسیم بندی می‌شوند.

امواج دایره‌ای شکل که از برخورد تکه سنگی با آب، در سطح آن دیده می‌شوند، از نوع امواج سطحی ری‌لای هستند. عمق انتشار امواج ری‌لای، حدود یک برابر طول موج آن است. شکل ۱-۶ انتشار این نوع از امواج را در فولاد نشان می‌دهد.



شکل ۱-۶: انتشار امواج سطحی در فولاد [۶].

امواج ورقه‌ای به طور سطحی در یک لایه معینی از ضخامت، متناسب با طول موج و فرکانس به دو حالت خمشی و قرینه‌ای در جامدات انتشار می‌یابد.

¹ Transverse or shear waves

² Surface waves

³ Rayleigh surface wave

⁴ Lamb wave