اولتراسوند درمانی

اولتراسوند بطور خاص نـوعی الکتروتراپـی محسـوب نمـی شـود، چراکه با وجود داشتن منشأ الکتریکی، نوعی لرزش مکانیکی اسـت. در برخی از متون از اولتراسوند به عنوان میکروماساژ یاد شده است چراکه باعث لرزش مکانیکی بافت‌ها می‌شود.

در حالی که اولتراسوند به عنـوان "میکروماسـاژ" شناخته می‌شود فرکانس آن در واقع بسیار بـالاتر از "ماساژ" عادی ارائه شده توسـط دسـت انسـان است بنابراین این قیاس نامتناسب است.

در این فصل ابتدا به ماهیت اولتراسوند و سپس به ماهیت تولیـد آن می‌پردازیم. همچنین توجه ویژه‌ای به رفتار یک موج صوتی در درون بافت‌ها خواهیم داشت. اثرات فیزیولوژیـک و درمـانی این روش و همچنین برخی از کاربردهای آن مثل فونوفورزیس نیز مورد بحث قرار خواهند گرفت. در ادامـه، اصـول کـاربردی توضیح داده می‌شود و سپس متغیرهای دوزِ درمانی و خطرات محتمل و موارد منع استفاده مورد بحث قـرار مـی‌گیرنـد. ایـن فصل با مروری کلی بر کاربردهای تشخیصی اولتراسوند و استفاده از آن برای ارزیابی دستگاه اسکلتی عضلانی بـدن بـه اتمـام می‌رسد.

اولتراسوند به لرزش‌های مکانیکی اطلاق می‌شود که اساساً امواج صوتی بوده ولی از فرکانس بالاتری برخـوردار هسـتند. این امواج بالاتر از محدوده‌ی شنوایی انسان بوده و به همین دلیل به آن‌ها اولتراسوند یا فراصـوت گفتـه مـی‌شـود. لـرزش در فرکانس حدود ۲۰ هرتز به صدا تبدیل می‌شود. به لرزش‌های زیر ۲۰ هرتز فروصوت گفته می‌شود که به جای شـنیده شـدن، می‌توان آن را لمس کرد. فرکانس‌هایی در محدوده‌ی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز به عنوان امواج صوتی شناخته می‌شوند چراکـه گوش انسان می‌تواند آن‌ها را بشنود. حد بالای محدودیت فرکـانس شنوایی انسان بسـیار متفـاوت اسـت. ایـن محـدودیت در کودکـان سطح بالاتری داشته (حدود ۲۰ کیلوهرتز) ولی در سنین بالاتر افت پیدا می‌کند (معمولاً ۱۴ کیلوهرتز). اکثر فرکانس‌هایی که در حرف زدن و موسیقی شنیده می‌شوند بین ۳۰ تا ۴۰۰۰ هرتز قرار دارنـد.

نوزادان معمولاً صداهایی با فرکانس نزدیک به ۲۰ کیلوهرتز را می‌شنوند. این حد بالای شنوایی با افزایش سن افت پیدا کرده و تا سن ۳۵ سالگی به حدود ۱۵ کیلوهرتز می‌رسد.

اولتراسوند به لرزش‌هایی با فرکانس بالاتر از محدوده‌ی شنوایی گفته می‌شود ولی تعدادی از فرکانس‌های چند مگـاهرتزی آن به صورت درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرکانس‌های مختلفی در طیف ۰/۵ تا ۵ مگـاهرتز (جـدول ۱-۱) اسـتفاده‌هـای

درمانی دارند. اصطلاحات "صوت[1]" و "صدا[2]" معنی مشابهی داشته ولی معمولاً صدا بـه فرکـانس‌هـای قابـل شـنیدن اطـلاق می‌شود.

جدول۱-۱: فرکانس و طول موج اولتراسوند با سرعت ۱۵۰۰متر بر ثانیه

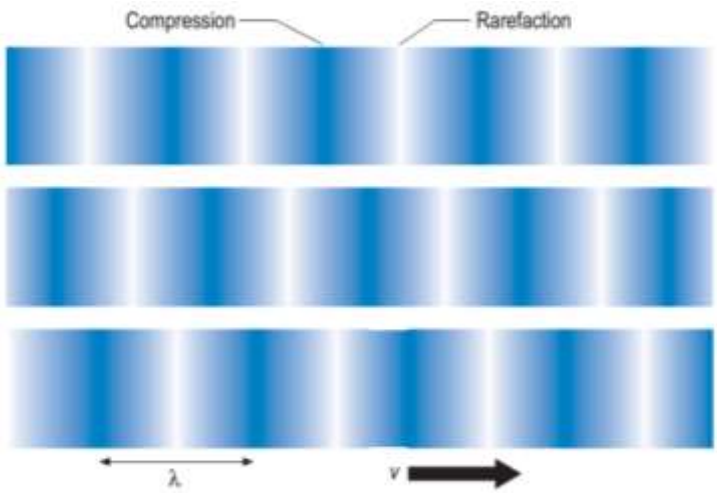
Frequency (MHz)	Wavelength (mm)	Period (µs)
0.5	3.0	2
0.75	2.0	1.33
0.87	1.72	1.15
1.5	1.0	0.66
2.0	0.75	0.5
3.0	0.5	0.35
5.0	0.3	0.2

ماهیت امواج سونیک

امواج صوتی یک سری از انقباضات و انبساطات مکـانیکی در جهـت انتقـال مـوج (کـه در اینجـا امـواج طـولی نامیـده می‌شوند) می‌باشند. (شکل۹-۱) این امواج در جامدات، مایعات و گازها ظاهر می‌شوند و ناشـی از فشـرده شـدن و رهـا شـدن منظم مولکول‌هاست. انقباضات نوسانی به فاصله‌های یکسانی رخ‌داده و اغتشاش حاصله با یک سرعت ثابت بسته به نـوع مـاده منتشر می‌شود(منتقل می‌شود). مسیر این امواج دریک ماده به‌طور طبیعی نامرئی است چراکه میزان انقباضـات خیلـی کوچـک اسـت. زمانی هم که قابل دیدن باشند به خاطر اینکه ارتعاشات سـریع‌تـر از ثبت توسط چشم رخ می‌دهند به‌صورت محوشده مـی‌باشـند. وقتـی نخ یک ساز زهی کشیده مـی‌شـود حرکتـی کـه باعـث ایجـاد صـدا می‌شود به‌صورت نامحسوس دیده می‌شود. مـوج صـوتی کـه در هـوا منتقـل مـی‌شـود دیـده نمـی‌شـود چراکـه هـوا شـفاف (transparent) است. یک نکته مهم اینکه صوت یک ارتعاش ماده است و مولکول‌ها در موقعیت خودشان مرتعش مـی‌شـوند و جایی حرکت نمی‌کنند(جز در مورد ساز زهی که حرکت رخ می‌دهد). انرژی به‌واسطه فشار مولکول‌ها بـه اطرافشـان در یـک حالت نوسانی منتقل می‌شود.

اگر بتوان به یک مولکول در محیط پرچمی متصل کرد، می‌توان دید که پرچم در اثر موج صوتی به جلو و عقب نوسان می‌کند، امّا مرکز این نوسانات یک نقطه‌ی ثابت است.

1- Sound
2- Sonic



شکل ۱-۱: موج صوتی در حال عبور از یک ماده.دیاگرام موقعیت موج را در سه لحظه نشان می دهد.

معادله موج

$$V = f.\lambda$$

برای هر موجی یک ارتباط ثابت بین سرعت موج، فرکانس و طول موج آن وجود دارد. در آب و بافت نرم مثل عضله و بافت چربی امواج صوتی بدون در نظر گرفتن فرکانس‌شان با سرعت حدود ۱۵۰۰ متر در ثانیه منتقل می‌شوند. یعنی اینکه فرکانس و طول موج رابطه معکوسی باهم خواهند داشت. امواج صوتی در موادی که مولکول‌هایشان نزدیک یکدیگرند سرعت بیشتری دارند. سرعت بیشتر در جامدات و مایعات نسبت به گازها. سرعت موج در هوا ۳۴۰ در استخوان ۲۸۰۰ و در استیل ۵۸۵۰ متر در ثانیه است.

جذب موج[1]

وقتی‌که موج صوتی از یک ماده‌ای عبور می‌کند انرژی آن به‌تدریج از بین می‌رود، برخی اوقات انرژی آن سریع جذب می‌شود و گاهاً بدون هدر رفت عبور می‌کند. مولکول‌های هر ماده‌ای در یک حرکت ثابت تصادفی هستند. میزان آشفتگی (agitation) مولکول‌ها به‌صورت مقدار اندازه‌گیری می‌شود. هرچه حرکت مولکولی بیشتر، گرما یا حرکت حرارتی بیشتر.

حرکت گرمایی تا حدی نوسانی است، برای مثال کل مولکول ممکن است جابه‌جا شود یا به عقب و جلو بچرخد و یا به گونه‌ای نوسانی تغییر شکل دهد و این اتفاق در فرکانس‌های متفاوت بسیاری ممکن است رخ دهد. حرکت همچنین شامل حرکت خطی است که مولکول‌ها به صورت ناگهانی با هم برخورد کرده و در نتیجه تغییر مسیر می‌دهند و مسیری زیگ‌زاگی را دنبال می‌کنند.

1- wave absorption

وقتی‌که مولکول‌ها به هم برخورد می‌کنند انرژی از یکی به دیگری منتقل می‌شود یکسری از مولکول‌ها دارای نوسان با شدت و فرکانس بالاتر و یکسری دیگر نوسان با شدت و فرکانس کمتری خواهند بود. این تبادل انرژی مولکولی مستمر، پایه و اساس انرژی گرمایی یکشی است.

وقتی‌که ارتعاش صوتی بر یک ماده‌ای اعمال می‌شود بر حرکات موجود سوار شده و به آن اضافه می‌شود. نتیجه اینکه انرژی موج صوتی منظم به‌صورت تصادفی درآمده و با برخورد مولکول‌ها به هم منتشر می‌شود. بدین ترتیب انرژی صوتی به‌تدریج تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. سرعت این تغییر حالت انرژی بستگی به هم ماهیت ماده یعنی مسیری که مولکول‌ها نوسان داشته و حرکت می‌کنند و هم فرکانس موج صوت دارد. بنابراین سرعت جذب این امواج در مواد مختلف و در فرکانس‌های مختلف متفاوت خواهد بود.

تولید اولتراسوند درمانی

صوت و مافوق صوت با ارتعاش مکانیکی یک ماده واسطه (جامد، مایع، گاز) تولید می‌شود. برای تولید امواج اولتراسوند درمانی (و تشخیصی) فرکانس نوسان مکانیکی در دامنه بین ۱ تا ۳ مگاهرتز لازم است.

کریستال‌های پیزوالکتریک (Piezoelectrical crystals) جامدات کریستالی هستند که دارای خواص ویژه بوده و در پاسخ به ولتاژ بکار رفته ضخامتشان تغییر پیدا می‌کند. اگر یک ولتاژ متناوب بر یک کریستال پیزوالکتریک اعمال شود ضخامت آن در یک حالت نوسانی تغییر خواهد کرد. به‌عبارت‌دیگر کریستال با فرکانس ولتاژ متناوب مرتعش خواهد شد. ضخامت دقیق کریستال فرکانس طبیعی یا بهترین فرکانس نوسانی را مشخص خواهد کرد. با برش در ضخامت کریستالها سعی می‌شود ارتعاشی با فرکانس مشخص ایجاد شود.

در زندگی روزمره، زمانی که اشیا مرتعش می‌شوند به صورت معمول فرکانس ارتعاش صوتی یا زیرصوت است، پس امواج صوتی یا فروصوت تولید می‌شوند، امّا فراصوت (اولتراسوند) به ندرت ایجاد می‌شود.

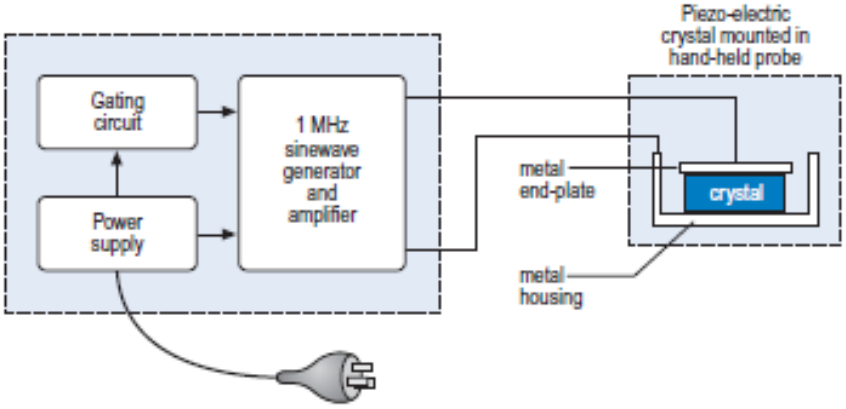
انواع زیادی از کریستالها برای تولید اولتراسوند درمانی قابل استفاده است. اما بیشترین مورد استفاده‌شده کوارتز است. از مواد سرامیکی مصنوعی نیز مثل تیتانات باریم و تیتانات زیرکونات باریم استفاده می‌شود.

تمامی دستگاه‌های تولید اولتراسوند درمانی یک پروب دستی با یک سری درمانی دارند که کریستال پیزوالکتریک داخل آن جای دارد. (شکل۱. ۲) ارتعاشات کریستال پیزوالکتریک از کریستال به پوشش فلزی منتقل و از آنجا به هر جامد یا مایع دیگر انتقال داده می‌شود. اگر سر پروب در تماس با یک جامد یا مایع نباشد انرژی کمی به هوا منتقل خواهد شد و بدین ترتیب تمرکز انرژی اولتراسوند در سر پروب ،کریستال را تخریب خواهد کرد. به همین خاطر دستگاه‌های اولتراسوند امروزی مجهز به یک حس‌گر هشدار برای قطع جریان در مواردی که تماس با یک ماده متراکم وجود ندارد، می‌باشند.

از دیگر قسمت‌های مهم دستگاه اولتراسوند مدار منبـع تغذیـه بـرای فـراهم سـاختن انـرژی الکتریکـی بـرای دسـتگاه، یـک نوسان‌ساز ولتاژ برای بکار انداختن مبدل و یک کنترل‌کننده جریان که می‌تواند نوسان‌ساز را قطع و وصل کند تا یک برون ده منقطع (pulsed) به دست آید، می‌باشند.

کنترل‌کننده شدت در مدار نوسان‌ساز، دامنه(آمپلیتود) ولتاژ متناوب را کنترل می‌کنـد بـدین ترتیـب بزرگـی ارتعـاش مکانیکی کریستال و به‌تبع آن دامنه و انرژی موج صوتی را کنترل می‌نماید. دستگاه‌های اولتراسوند یـک نمایشـگر دارنـد کـه میزان شدت برون ده را نشان مـی‌دهنـد. شـدت عبـارت اسـت از انرژی که از واحد سطح در واحد زمان عمود بر پرتو صـوتی عبـور می‌کند. بر اساس وات بر سانتی‌متر مربـع($W\ cm^{-2}$) انـدازه‌گیـری می‌شود. برخی دستگاه‌ها فقط بر اساس وات نشان می‌دهند.

قدرت به معنای نرخ تولید انرژی است و برحسب وات (W) اندازه گیری می‌شود. انرژی برحسب ژول سنجیده می‌شود و یک وات به معنای یک ژول بر ثانیه است ($J\ s^{-1}$).



شکل ۱-۲: اجزای مولد اولتراسوند درمانی

جریان مدار نوسان‌ساز را به‌طور خودکار می‌توان قطع و وصل کرد تا یک برون ده منقطع(پالس دار) تولید کرد، به‌طور معمول نسبت پالس‌ها از ۱:۱ تا ۱۰:۱ است. در نسبت ۱:۱ توان متوسط نصف حداکثر توان است. در نسبت ۱۰:۱ توان متوسـط یـک یازدهم توان حداکثر است.

شدت برون ده نمایش داده‌شده اغلب اوقـات نشـان‌دهنـده واقعی شدت برون ده نیست. برای اینکه عـدد نمـایش داده‌شـده به‌واسطه ولتاژ بکار رفته روی کریستال تعیین مـی‌شـود. بـه‌طـور معمول دستگاه‌های اولتراسوند توسط کارخانه کالیبره مـی‌شـوند ولی ممکن است در طی زمان کالیبراسیون تغییـر پیـدا کنـد. در

انـدازه‌گیـری و نمـایش ولتـاژ اعمـال‌شـده بـه یـک کریسـتال پیزوالکتریـک بسـیار آسـان اسـت. بـرای سنجش شدت خروجـی واقعـی نیازمنـد دسـتگاهی خارجی هستیم که بتواند به صورت مسـتقیم شـدت پرتوی فراصوت را اندازه‌بگیرد.

صورت شکستن کریستال یا هر آسیب دیگر به آن کالیبراسیون به‌طور واضحی تغییـر پیـدا خواهـد کـرد. کریسـتال بـه‌طـور محکمی به فلز پوشاننده پروب درمانی چسبانده شده است. ممکن است محل اتصال آسیب ببیند.

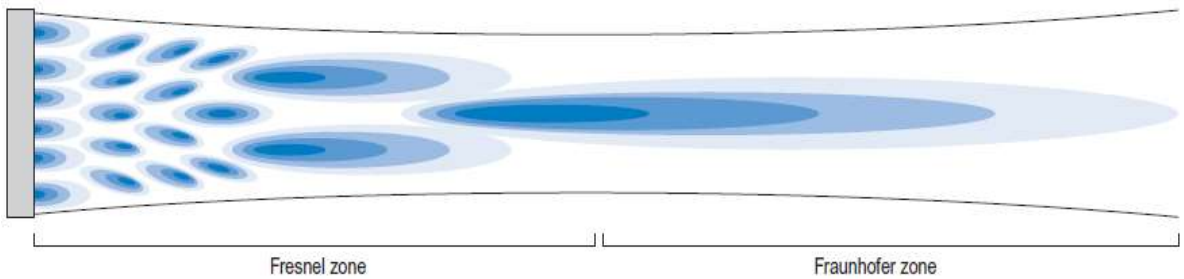
کالیبراسیون مکرر دستگاه اولتراسوند ضرورت دارد. کمیته بین‌المللی الکتروتکنیک به تصویب رسانده که شدت برون ده نبایست بیشتر از ۲۰± نسبت به مقدار نمایش داده‌شده در دستگاه باشد. در تضاد با این مسئله بیشتر نظرسنجی‌ها در مورد این دستگاه مورد استفاده توسط فیزیوتراپیست ها نشان‌دهنده سخت بودن حفظ این سطح از عملکرد می‌باشد. در سال ۲۰۰۰ از ۸۳ دستگاه مورد استفاده ۳۹٪در داخل محدوده استاندارد نبودند(Artho et al. , 2002). این نشان‌دهنده این است که در تثبیت دوزاژ درمانی مؤثر به‌عنوان دوز واقعی در دستگاه‌های کالیبره نشده مشکلات زیادی وجود دارد.

پرتو اولتراسوند[1]

صفحه فلزی پروب درمانی روبه‌جلو و رو به عقب حرکت کرده تا اینکه جریانی از امواج به هم فشرده تولید شوند که پرتو صوتی را شکل می‌دهند. به خاطر اینکه طول موج این امواج خیلی کوچک‌تر از سطح مبدل (سر پروب درمانی) است، پرتو صوتی تقریباً به‌صورت استوانه‌ای بوده و در همان قطر مبدل می‌باشد (Williams, 1987). کوچک‌ترین پروب های درمانی حداقل ۳-۲ سانتیمتر قطر دارند درحالی که طبق جدول ۱. ۱ طول امواج در حد چند میلی‌متر است.

برای اصوات قابل سمع با طول‌موج بسیار بیشتر از منبع تولیدکننده‌ی آنها، حدود ۱.۳۴ متر از C میانی، امواج صوتی در تمامی جهات منتشر می‌گردند، چنان که صوت را در تمامی نواحی هم-فاصله از منبع، می‌توان به صورت یکسان شنید.

این پرتو اولتراسوند که از مبدل ساطع می‌شود، حتی در محیط همگن(homogenous) نیز یکنواخت نخواهد بود. امواجی که از نقاط مختلف سطح مبدل ساطع می‌شوند به‌طرف یک نقطه مشترک در فضا در قدام مبدل طی مسیر می‌کنند، بنابراین فاز خود را از دست می‌دهند. برخی امواج حذف می‌شوند برخی دیگر تقویت می‌شوند تا اینکه نتیجه خالص به‌صورت یک الگوی خیلی نامنظم از امواج صوتی در ناحیه نزدیک سطح مبدل که near field یا Fresnel zone نامیده می‌شود به وجود می‌آید. (شکل۱. ۳) به‌طور متوسط در بخش مرکزی سطح مقطع پرتو، انرژی بیشتری وجود دارد. بعدازاین ناحیه، far field یا Fraunhofer zone قرار دارد که امواج منظم‌تر می‌شوند.



شکل۳.۱ تنوع در شدت به تناسب با فاصله از سطح مبدل اولتراسوند درمانی. سایه تیرهتر نشان دهنده شدت بالاتر می باشد.

1- ultrasound beam

طول near field بستگی دارد به

۱- اندازه سطح مبدل. ارتباط مستقیم با مربع شعاع مبدل دارد. ۲- طول موج. ارتباط معکوس باهم دارند.

Length of Fresnel zone = r^2/λ

برای مثال با قطر اپلیکاتور ۳ سانتیمتر با فرکانس ۱ مگاهرتز در آب یا بافت نرم طول ناحیه نزدیک ۱۵ سانتیمتر خواهد بـود. جدول ۹. ۲ مثال‌های دیگری را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲: طول ناحیه نزدیک(فرزنل) به سانتی متر برای مبدلهای با فرکانسهای مختلف

Transducer diameter (cm)	Frequency (MHz) 0.75	1	1.5	3
2	5 cm	6.7 cm	10 cm	20 cm
3	11 cm	15 cm	23 cm	45 cm
5	31 cm	41 cm	63 cm	125 cm

BNR(beam non-uniformity ratio)

این نسبت به خاطر نامنظم بودنِ شدت در پرتو اولتراسوند مهم می‌باشد. اولتراسوند درمانی برای اهداف بالینی از ناحیـه نزدیک استفاده می‌کند. این نامنظم بودن ناحیه نزدیک با حرکت سر پروب درمـانی از بـین مـی‌رود. BNR واقعـی تجهیـزات درمانی بین ۸ تا ۱۴ می‌باشد. در یک دستگاه ایدئال حدود ۵ تا ۶ یا پایین‌تر می‌باشد. حتی در این سطح نیز با شدت متوسـط ۳وات بر سانتی‌متر مربع حداکثر شدت (peak spatial intensity) بین ۱۵ تا ۱۶وات بر سانتی‌متر مربع خواهد.

غیریکنواخت بودن ناحیه نزدیک به این معنی است که شدت را نمی‌توان با یک روش ساده بیان کرد چراکه میزان آن از یـک نقطه به یک نقطه دیگر در پرتو اولتراسونیک متفاوت است. در عوض اصطلاحات spatial peak intensity یا spatial average intensityمصطلح شده است. اگر برون ده پالس دار شده باشد مـی‌تـوان از اصـطلاح temporal average یـا temporal peak استفاده کرد.

بنابراین به چهار روش می‌توان شدت را بیان کرد:

1- Spatial average temporal average (SATA)
2- Spatial peak temporal average (SPTA)
3- Spatial peak temporal peak (SPTP)
4- Spatial average temporal peak (SATP)

به‌طور معمول از spatial average استفاده می‌شود ولی مهم است که مشخص شود که آیا این معیار، نشان‌دهنـده temporal average است یا temporal peak intensity .

خلاصه

یک پرتو اولتراسوند که از یک مبدل ساطع می‌شود دارای خصوصیات زیر می‌باشد:

- تقریباً استوانه‌ای شکل
- در ناحیه نزدیک خیلی نامنظم، در ناحیه دور یکنواخت‌تر
- ناحیه نزدیک با r^2/λ تعریف می‌شود و ناحیه درمانی محسوب می‌شود.
- BNR بیان‌کننده شدت حداکثر فضایی و بین ۵ تا ۶ یا کمتر می‌باشد.
- شدت فضایی کلی به‌واسطه شدت متوسط فضایی توصیف می‌شود.
- شدت‌های پالس دار را می‌توان با شدت حداکثر زمانی و متوسط زمانی توصیف کرد.
- انتقال امواج صوتی
- مرزهای بین مواد واسطه‌ای

انتقال امواج صوتی

مرزهای بین مواد

امپدانس صوتی ماهیت ماده را نشان می‌دهد، یعنی میزان راحتی حرکت و جابه‌جایی مولکول‌ها نسبت به یکدیگر، پس تعجب‌آور نیست که سرعت امواج صوتی در آن محیط با امپدانس صوتی مرتبط باشد.

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، یک موج منتقل‌کننده انرژی است. امواج صوتی شامل حرکت ارتعاشی مولکول‌ها بوده و دارای سرعت مختصه در هر ماده‌ای هستند. سرعت، وابسته به تراکم و ارتجاعیت (elasticity) ماده واسطه می‌باشد و این‌ها باهمدیگر مشخص‌کننده امپدانس صوتی یک ماده واسطه خواهند بود.

انرژی که توسط یک موج حمل می‌شود به عواملی چون فرکانس (فرکانس بالاتر، انرژی بیشتر) و آمپلیتود (آمپلیتود بیشتر، انرژی بیشتر) بستگی دارد. بیشتر ماها تجربه کردیم وقتی‌که در دریا به حالت ایستاده قرار داریم هرچه امواج بلندتر و هرچه مکررتر باشد امکان تثبیت حالت ایستاده سخت‌تر خواهد بود.

وقتی‌که امواج صوتی به یک مرز می‌رسند، تغییرات متنوعی رخ می‌دهد:

- آن‌ها می‌بایست در یک ماده واسطه جدید با مشخصات سرعتی ویژه آن محیط منتقل شوند.
- فرکانس ثابت می‌ماند پس می‌بایست طول موج تغییر پیدا کند طول موج جدید قابل محاسبه با فرمول $V = f. \lambda$ می‌باشد.
- مقداری انرژی به عقب برمی‌گردد. میزان انرژی منعکس‌شده متناسب با اختلاف امپدانس صوتی مابین دو ماده است. این مسئله در مورد امواجی که عمود یا نزدیک به عمود به حد مرز برخورد می‌کنند صدق می‌کند.