به نام خدا

آکوستیک و سایکوآکوستیک

نویسندگان :

دیوید ام. هوارد - جیمی اِی. اس. آنگوس

مترجم :

مهندس علیرضا حیدری کایدان

انتشارات ارسطو

(چاپ و نشر ایران)

۱۴۰۱

نام کتاب : آکوستیک و سایکوآکوستیک
مؤلفان : دیوید ام. هوارد - جیمی اِی. اس. آنگوس
مترجم : مهندس علیرضا حیدری کایدان
ناشر : ارسطو (سامانه اطلاع رسانی چاپ و نشر ایران)
تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ : اول - ۱۴۰۱
چاپ : مدیران
قیمت : ۶۰۰۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :
https://chaponashr.ir/ketabresan
شابک : ۹-۰۴۴-۳۳۹-۶۲۲-۹۷۸
تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www. chaponashr. ir

تقدیم به فرزندانم، نیلوفر و جواد و پرنیان

و همهٔ جوانان جویای دانش در سرزمین ایران

به نام آنکه هستی را با کلام خود جان داد

دیباچه

آکوستیک علم صوت است. اگرچه قدمت امواج صوتی تقریباً به اندازه کیهان است، عموماً منشأ مطالعه علمی صوت را در یونان باستان می‌دانند. کلمهٔ "آکوستیک" از کلمهٔ یونانی ἀκουστός (akoustos)، "شنیده، شنیدنی" گرفته شده است، که به نوبهٔ خود مشتق از فعل ἀκούω (akouo)، "می‌شنوم" است. مترادف لاتین آن "Sonic" است که پس از آن اصطلاح سونیک مترادف آکوستیک و بعداً شاخه‌ای از آکوستیک گشت. فرکانس‌های بالاتر و پایین‌تر از محدودهٔ قابل شنیدن توسط انسان را به ترتیب "اولتراسونیک" و "اینفراسونیک یا ساب سونیک" می‌گویند.

آکوستیک شاخه‌ای از فیزیک است که به مطالعهٔ امواج مکانیکی حول محور تولید، انتشار و دریافت امواج مکانیکی و ارتعاشات در گازها، مایعات و جامدات می‌پردازد. کاربرد آکوستیک تقریباً در تمام جنبه‌های جامعهٔ مدرن وجود دارد که بارزترین آن صنایع صوتی و کنترل نویز و پزشکی است. آکوستیک توسط مؤسسهٔ استاندارد ملّی آمریکا بر اساس استاندارد ANSI/ASA S1.1-2013 به صورت ذیل تعریف شده است:

"(الف) علم صدا، از جمله تولید، انتقال، و اثرات آن، مانند اثرات بیولوژیکی و روانی. (ب) آن دسته از خصوصیات اتاق که با یکدیگر ویژگی آن را با توجه به اثرات شنوایی تعیین می‌کنند."

مطالعات زیادی برای شناسایی رابطهٔ بین آکوستیک و شناخت که به طور معمول به عنوان سایکوآکوستیک یا آکوستیک‌ذهنی شناخته می‌شود انجام شده است، که در آن چیزی که فرد می‌شنود ترکیبی از ادراک و جنبه‌های بیولوژیکی است. اطلاعاتی که با عبور امواج صوتی از گوش دریافت می‌شود، از طریق مغز درک و تفسیر می‌شود و بر ارتباط بین ذهن و آکوستیک تأکید می‌کند.

صدا مهم‌ترین ابزار ارتباطی طبیعی برای انسان است که با آن مفاهیم مورد نظر خود را به دیگران انتقال می‌دهد و از آنان دریافت می‌کند. ابزارهای انسان برای تولید و دریافت صدا به ترتیب اندام‌های گفتاری شامل حنجره، دهان، لبها و بینی و اندام‌های شنیداری یعنی گوش‌ها هستند. گفتار یکی از بارزترین ویژگی‌های رشد و فرهنگ انسان است. انسان با تولید صداهای مختلف کلمات را می‌سازد و با تغییر لحن و تُنِ صدا مفاهیم مختلف را درون آن القا می‌کند.

انسان با کمک ابزارهای دیگر شروع به تولید صداهای مختلف کرد و در گذر زمان و تکامل آنها سازهای امروزی را پدید آورد تا با آنها موسیقی یا صداهای دارای آهنگ و ریتم مشخص را ایجاد کند. این صداها می‌توانند برای افراد مختلف از نظر ذهنی دارای تفسیرهای گوناگونی باشند. موسیقی یکی از دست‌آوردهای بشری است که می‌توان آن را زبانی جهانی به شمار آورد. انسان با توجه به هدف و احساسی که می‌خواست بیان کند برای موسیقی قواعدی ایجاد کرد تا صداهایی هر چه خوشایندتر و هدفمندتر تولید کند. از این رو موسیقی و تئوری آن دارای اهمیّت فراوانی در بحث صدا است؛ لذا بخش عمده‌ای از این کتاب به تشریح ابعاد مختلف صدا از دیدگاه موسیقایی پرداخته است.

فصل یک کتاب به کلّیّات صوت و قوانین فیزیکی پرداخته و فصل دو به مبحث شنوایی و گوش اختصاص داده شده است. از آنجا که ممکن است همهٔ خوانندگان با تئوری موسیقی آشنا نباشند؛ لذا در ابتدای فصل سوّم- که به گونه‌ای ناگهانی وارد مباحث موسیقی شده است- پیش زمینه‌ای آورده‌ام تا خواننده در طی مطالعهٔ فصل‌های بعدی با دشواری مواجه نشود. فصل چهارم به مدل آکوستیکی سازهای موسیقی پرداخته و در ادامه به نحوهٔ تولید صدا توسط انسان اشاره شده است. فصل پنجم مباحث آکوستیک ذهنی مانند رنگ صدا و نحوهٔ ادراک صدا را مورد بررسی قرار داده است. فصل ششم به موضوع شنیدن موسیقی و طنین پرداخته و مباحث آکوستیک اتاق‌ها و پخش‌کننده‌های صدا را مورد بحث قرار داده است. فصل هفتم به ترکیب مباحث آکوستیکی و آکوستیک

ذهنی پرداخته است. در انتها چند ضمیمه برای ارجاع به نحوهٔ محاسبات آورده شده است. با توجه به رنگی نبودن عکس‌های کتاب اصلی و با توجه به اینکه عکس‌ها از نمونهٔ پی‌دی‌اف کتاب آورده شده‌اند، لازم دیدم تا هر جا که نیاز به روشن شدن بیشتر مطلب است از تصاویری رنگی برای کمک به درک هر چه بیشتر خواننده استفاده کرده و آنها را به متن اضافه کنم. در جای جای کتاب اصلی نکاتی در قاب‌هایی آورده شده است که گاهی بسیار بدیهی هستند؛ لذا بر آن اساس، هر جا لازم دیدم تا مطلبی را بیشتر روشن سازم یا اطلاعات بیشتری در اختیار خواننده قرار دهم، من نیز چنین کرده‌ام. نسخهٔ انگلیسی کتاب دارای اشکالات متنی (syntax) هست و در طی ترجمه، با بررسی دو مرجع دیگر که هر دو هندبوک صدا بودند، آنها را اصلاح کردم. همچنین نسخهٔ اصلی انگلیسی یک سی‌دی همراه خود دارد که به علت در دسترس نبودن از اشاره به ارجاعات آن خودداری کردم، ولی نبود آنها باعث نارسایی مطلب نشده است. به جای ضمیمهٔ مربوط به محتویات سی‌دی صوتی مطالبی را در خصوص فیلتر شانه‌ای به دلیل اهمیّت آن در موسیقی و گفتار گنجاندم.

به جای کلماتی که معادل فارسی مناسب و مورد تایید فرهنگستان زبان و ادب فارسی دارند، از همان‌ها استفاده شده است. در برخی کُتب از کلماتی مانند واخُنِش به جای کلمهٔ reverberation و شیوِش به جای کلمهٔ timbre استفاده کرده‌اند که به جای آنها از کلمات طنین و رنگ صدا استفاده کردم؛ چرا که برای هیچ یک از دو کلمهٔ واخُنش و شیوِش، نه در فرهنگستان و نه در منابع دیگر ریشهٔ معنادار ادبی و دلیل محکمی نیافتم. به جای کلمهٔ نَواک که به عنوان معادل pitch ترجمه شده است نیز مبنای درست و ادبی پیدا نکردم با این حال با توجه به اینکه این کلمه قبلاً در یکی از کتاب‌های اساتید موسیقی (جناب منصوری) آورده شده است لذا گاهی به آن اشاره کرده‌ام ولی در بیشتر موارد به جای آن از گام یا زیر و بمی استفاده کرده‌ام. به جای کلماتی که در تمام جهان بین دست‌اندرکاران علم و هنر مفهوم یگانه‌ای دارند مانند فرکانس نیازی به ترجمه

ندیدم؛ لذا از به کارگیری کلمهٔ بسامد خودداری کردم. کلماتی که کاربرد فنی و عام در کاربردهای روزمرهٔ صدا دارند مانند اِکوالایزر، از خود آنها استفاده کرده‌ام.

این کتاب برای کسانی که می‌خواهند دانش خود را در زمینهٔ صدا و خصوصاً آکوستیکِ موسیقی و آکوستیک‌ذهنی نحوهٔ ادراک صدا و موسیقی گسترش دهند مرجع بسیار خوبی است و از آنجا که چنین کتابی به زبان فارسی با این دیدگاه وجود نداشت اقدام به ترجمهٔ آن نمودم، امید است که مورد استفادهٔ علاقه‌مندان قرار گیرد. پیشاپیش می‌دانم همانند هر اثر دیگری آنچه فراهم شده خالی از ایراد و اشکال نیست و از کلیه عزیزان و دوستان و خصوصاً اساتید حوزه صدا و آکوستیک که احتمالاً از سر کنجکاوی این کتاب را مطالعه می‌نمایند تقاضا دارم تا اینجانب را از راهنماییهای خویش بی‌نصیب نگذارند.

در بارهٔ نویسندگان اصلی کتاب: دیوید ام. هاوارد، رئیس مؤسس بخش جدید الکترونیک در رویال هالووی، دانشگاه لندن است. علایق تحقیقاتی دیوید شامل تجزیه و تحلیل و ترکیب آواز، گفتار و موسیقی، استفاده از رایانه و برنامه‌ها برای آموزش آواز در زمان واقعی و تنظیم در آواز کاپلا است. دیوید درگیر پرونده های صوتی پزشکی نیز قانونی بوده است و به طور مرتب در رادیو و تلویزیون ظاهر می‌شود، از جمله به عنوان مجری برای برنامه‌های Voice و Castrato برای BBC4-TV .

جیمی ای اس. آنگوس استاد فناوری صوتی در دانشکده محاسبات، علوم و مهندسی در دانشگاه سالفورد است. او یکی از مبتکران اوّلین دورهٔ آموزشی فناوری موسیقی در سطح دانشگاهی در دانشگاه یورک در سال ۱۹۸۶ بود. او هم در زمینهٔ آکوستیک اتاق و گفتار، طراحی دیفیوزر، GPGPU در شبیه‌سازی آکوستیک، و پردازش سیگنال صوتی و کدنویسی تدریس و تحقیق می‌کند. او ساختارهای پخش‌کنندهٔ مدوله شده و جذبی را اختراع کرد و در سال ۲۰۰۴ جایزه AES Fellowship و جایزه یادبود پیتر بارنت IOA را دریافت کرد.

علیرضا حیدری کایدان

مهرماه ۱۴۰۱

فهرست مطالب

فصل اوّل: مقدمه‌ای بر صوت ۱۳

فصل دوّم: مقدمه‌ای بر شنوایی ۱۳۵

پیش زمینهٔ فصل سوّم ۲۱۹

فصل سوّم: نُت‌ها و هارمونی ۲۵۳

فصل چهارم: مدل آکوستیکی برای سازهای موسیقی ۳۲۷

فصل پنجم: شنیدن رنگ صدا و فریب دادن گوش ۴۴۹

فصل ششم: شنیدن موسیقی در محیط‌های مختلف ۵۳۴

فصل هفتم: کاربردها: آکوستیک و آکوستیک‌ذهنی ترکیب شده ۶۷۱

ضمیمهٔ A1 ۷۸۸

ضمیمهٔ A2 ۸۰۲

ضمیمهٔ A3 ۸۰۳

ضمیمهٔ A4 ۸۰۵

ضمیمهٔ A5 ۸۱۰

ضمیمهٔ A6 ۸۱۴

ضمیمهٔ A7 ۸۳۳

فصل یک

مقدمه‌ای بر صوت

۱,۱ امواج فشاری و انتقال صوت
۱,۱,۱ طبیعت امواج صوتی
۱,۱,۲ سرعت امواج صوتی
۱,۱,۳ سرعت صوت در هوا
۱,۱,۴ امواج عرضی یا متقاطع و دیگر انواع موج
۱,۱,۵ سرعت امواج عرضی
۱,۱,۶ امواج در میله ها و پنلها
۱,۱,۷ طول موج و فرکانس امواج صوتی
۱,۱,۸ عدد موج امواج صوتی
۱,۱,۹ رابطهٔ بین فشار، سرعت و امپدانس در امواج صوتی
۱,۲ شدت صوت، توان و اندازه فشار
۱,۲,۱ اندازهٔ شدّت صوت
۱,۲,۲ اندازهٔ توان صوت
۱,۲,۳ اندازهٔ فشار صوت
۱,۳ افزودن اصوات به یکدیگر
۱,۳,۱ اندازه هنگام افزودن امواج همبسته به یکدیگر
۱,۳,۲ اندازه هنگام افزودن امواج ناهمبسته به یکدیگر
۱,۳,۳ افزودن دسیبل‌ها به یکدیگر
۱,۴ قانون عکس مربع
۱,۴,۱ اثر لبه‌ها و مرزها
۱,۵ برهم کنش اصوات
۱,۵,۱ برهم نهی یا سوپرپوزیشن
۱,۵,۲ شکست یا انکسار صوت
۱,۵,۳ جذب صوت
۱,۵,۴ بازتابش صوت از سطوح سخت

۱,۵,۵ بازتابش صوت از سطوح محدود و نامحدود
۱,۵,۶ تداخل اصوات
۱,۵,۷ امواج ایستاده بر روی سطوح سخت (مُدها)
۱,۵,۸ امواج ایستاده بر روی سطوح دیگر
۱,۵,۹ خمش و تفرّق صوت
۱,۵,۱۰ پراکندگی یا پراکَنش صوت
۱,۶ دامنه‌های زمانی و فرکانسی
۱,۶,۱ نظریهٔ فوریه چیست؟
۱,۶,۲ طیف امواج صوتی متناوب یا تکرار شوندهٔ پشت سر هم
۱,۶,۳ اثر فاز
۱,۶,۴ طیف امواج صوتی نامتناوب یا غیر تکرار شوندهٔ پشت سر هم
۱,۷ تحلیل طیفی
۱,۷,۱ فیلترها و انواع فیلتر
۱,۷,۲ پاسخ‌های زمانی فیلترها
۱,۷,۳ پاسخ‌های زمانی سیستمهای آکوستیک
۱,۷,۴ نمایش‌های زمانی و فرکانسی اصوات
کتاب شناسی- فهرست منابع

فصل اوّل

۱ مقدمه‌ای بر صوت[۱] Introduction to Sound

صدا چیزی است که اغلب مردم آن را بدیهی می‌پندارند و آن را نادیده می‌گیرند. محیط ما پر از نوفه‌ها[۲] و سر و صداهایی است، که ما حتّی پیش از تولّد با آنها برخورد داریم.
صوت چیست و چگونه انتشار[۳] می‌یابد و چگونه می‌توان آن را اندازه‌گیری[۴] نمود؟ هدف از این فصل از کتاب معرفی مفاهیم پایهٔ صوت به خوانندگان است. این که صوت چگونه انتشار می‌یابد و مطالب مرتبط با این موضوع در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مطالب به ما کمک خواهد کرد تا طبیعت صوت و رفتار آن را در زمینه‌های[۵] آکوستیکی گوناگون بفهمیم و نیز اجازه می‌دهد تا عملکرد سازهای موسیقی و نحوهٔ برهم کُنش اصوات با شنوایی‌مان را درک کنیم.

۱,۱ امواج فشاری و انتقال صوت Pressure waves and sound transmission

در سطح فیزیکی، صوت به آسانی معادل اختلال، آشوب[۶] یا برهم‌خوردگی مکانیکی به وجود آمده در محیطی[۷] جامد، مایع یا محیطی مانند هوا و گازهای دیگر است. به هر جهت چنین توصیف ساده شده‌ای نمی‌تواند خیلی سودمند باشد؛ زیرا که هیچ اطلاعاتی در خصوص این که چگونه این اختلالات حرکت می‌کنند و یا هر خصوصیت دیگری از صوت غیر از ملزوماتی که محیط برای انتشار آن نیاز دارد، به دست نمی‌دهد.

---

۱ - مترجم: کلمهٔ **صوت** معنای وسیع‌تر و عام‌تری از **صدا** دارد و به جای کلمهٔ sound استفاده شده است، ولی **صدا** بیشتر برای اصوات در محدودهٔ شنوایی انسان یا audio کاربرد داشته و به معنای گفتار یا voice هم به کار برده می‌شود. لذا در این نوشتار برای مفاهیم کلی از صوت و برای گفتار و اصوات در محدودهٔ شنوایی از صدا استفاده می‌شود.

2 - noises
3 - propagates
4 - quantified
5 - contexts
6 - disturbance
7 - medium

آنچه که نیاز است توصیف دقیق‌تری است که بتواند برای پیشگویی رفتار صوت در زمینه‌های گوناگون به کار گرفته شود.

شکل ۱-۱- مدل توپ گلف و فنر از ماده‌ای که صوت را منتشر می‌کند.

۱,۱,۱ طبیعت امواج صوتی The nature of sound waves

مدل سادهٔ مکانیکی انتشار صوت درون بعضی از محیطهای فیزیکی که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است را در نظر بگیرید. این شکل مدل سادهٔ یک بعدی از محیطی فیزیکی مانند هوا را نشان می‌دهد؛ که آن را مدل توپ گلف و فنر می‌نامیم، زیرا از تعدادی وزنه، برای مثال توپهای گلف، که با فنر به یکدیگر متصل شده‌اند تشکیل شده است. توپهای گلف نشان دهندهٔ جرمهای نقطه‌ای مانند مولکول‌ها در مادهٔ واقعی هستند و فنرها نشان دهندهٔ نیروهای بین مولکولی بین آنها هستند. اگر یک توپ گلف در یکی از دو انتها به سمت بقیهٔ توپها فشار داده شود، آنگاه فنر رابط بین آن و توپ بعدی فشرده خواهد شد و به توپ بعدی در امتداد خودش فشار وارد خواهد کرد و به همین ترتیب بقیه نیز عمل خواهند کرد. به دلیل جرم توپهای گلف تأخیر زمانی‌ای قبل از شروع به حرکت کردن ناشی از فشار وارده توسط فنرهای ارتباط دهنده وجود دارد.

این بدین معنی است که زمانی طول خواهد کشید تا اختلال یا آشوب به وجود آمده توسط حرکت اولین توپ به آخرین توپ گلف در انتهای دیگر برسد. اگر توپ گلف در سر شروع کننده به مکان اولیهٔ خود بازگردانده شود تمام فرآیندی که پیشتر توضیح داده شد دوباره تکرار خواهد شد؛ به جز آنکه توپهای گلف این دفعه به جای آنکه فشار داده شوند کشیده خواهند شد و فنرها به جای آنکه فشرده شوند باز خواهند شد. در انتهای همهٔ اینها، سیستم به گونه‌ای خواهد شد که توپهای گلف همان فاصلهٔ متوسطی را خواهند داشت که قبل از فشار دادن یا کشیدن توپ گلف در یک سر این رشته داشتند.

ناحیه‌ای که توپها به یکدیگر فشرده می‌شوند به نام "ناحیهٔ تراکم[1] یا انقباض" و ناحیه‌ای که توپها از یکدیگر دور می‌شوند به نام "ناحیهٔ ترقیق[2] یا انبساط" شناخته شده‌اند و خود توپها محیط انتشار هستند. در یک محیط انتشار واقعی مانند هوا، اختلال به صورت طبیعی شامل یک فشردگی است که بلافاصله بعد از آن یک انبساط وجود دارد یا یک انبساط که بلافاصله بعد از آن یک فشردگی وجود دارد؛ که این توالی اجازه می‌دهد تا محیط به حالت طبیعی خود برگردد. عکسی از آنچه رخ می‌دهد در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. به دلیل روشی که اختلال حرکت می‌کند؛ فشرده شدن یا کشیده شدن توپهای گلف در جهت حرکت اختلال، این نوع انتشار به نام "موج طولی[3]" شناخته می‌شود. بنابر این امواج صوتی که از طریق یک سری انقباض و انبساط، معمولاً در محیطی مانند هوا رخ می‌دهند امواج طولی هستند.

۱،۱،۲ سرعت امواج صوتی The velocity of sound waves

سرعتی که اختلال یا آشوب، از هر نوعی، با آن سرعت در "رشته‌ای" از توپهای گلف به پیش می‌رود به دو چیز بستگی دارد:

- به جرم توپهای گلف: جرم، سرعت انتشار اختلال را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به دلیل اینکه توپِ با جرم بیشتر زمان بیشتری می‌گیرد تا شروع به حرکت کند یا متوقف شود. در مواد واقعی چگالی ماده، جرم مؤثر توپ گلف را تعیین می‌کند. چگالی بالاتر، جرم مؤثر بیشتری را ایجاد می‌کند و بنابر این انتشار بسیار آهسته‌تر حرکت خواهد نمود.

1 - compression(فشرده‌سازی یا افزایش چگالی)
2 - rarefaction(رقیق‌سازی یا کاهش چگالی)
3 - longitudinal wave

- قدرت فنرها: قدرت فنرهای اتصال دهندهٔ توپهای گلف به یکدیگر نیز سرعت انتشار اختلال را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا که فنر قوی‌تر قادر خواهد بود تا محکم‌تر به توپ گلف بعدی فشار وارد کند و بنابر این سریعتر به آن شتاب خواهد داد. در مواد واقعی قدرت فنرها معادل مدول الاستیک[1] یا ضریب کشسانی[2] ماده است که به نام "مُدول یانگ[3]" یا معیار یانگ ماده نیز شناخته شده است. ضریب کشسانی بالاتر در ماده به معنی فنر قوی‌تر است؛ بنابر این باعث سرعت بیشتر انتشار اختلال در محیط خواهد شد.

برای امواج طولی در جامدات، سرعت انتشار تنها به وسیلهٔ چگالی و معیار یانگ ماده تحت تأثیر قرار می‌گیرد و این سرعت را به آسانی از طریق معادلهٔ ۱-۱ می‌توان محاسبه نمود:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (۱-۱)$$

که در آن C سرعت بر حسب متر بر ثانیه $(m.S^{-1})$
و ρ چگالی ماده بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب $(Kg.m^{-3})$
و E معیار یانگ ماده بر حسب نیوتن بر مترمربع $(N.m^{-2})$ است.

1 - elastic modulus

۲- مترجم: **کِشسانی** یا **الاستیسیته** خاصیت ارتجاعی یا تغییرشکل بازگشت‌پذیر محیط و مواد است. ضریب کشسانی (E)یا همان elastic modulus برابر است با نسبت تنش بر کُرنش (تغییر شکل) ایجاد شده به واسطهٔ تنش وارده بر جسم در حالتی که جسم در ناحیه کشسان قرار گرفته باشد.

3 - Young's modulus

نکته:

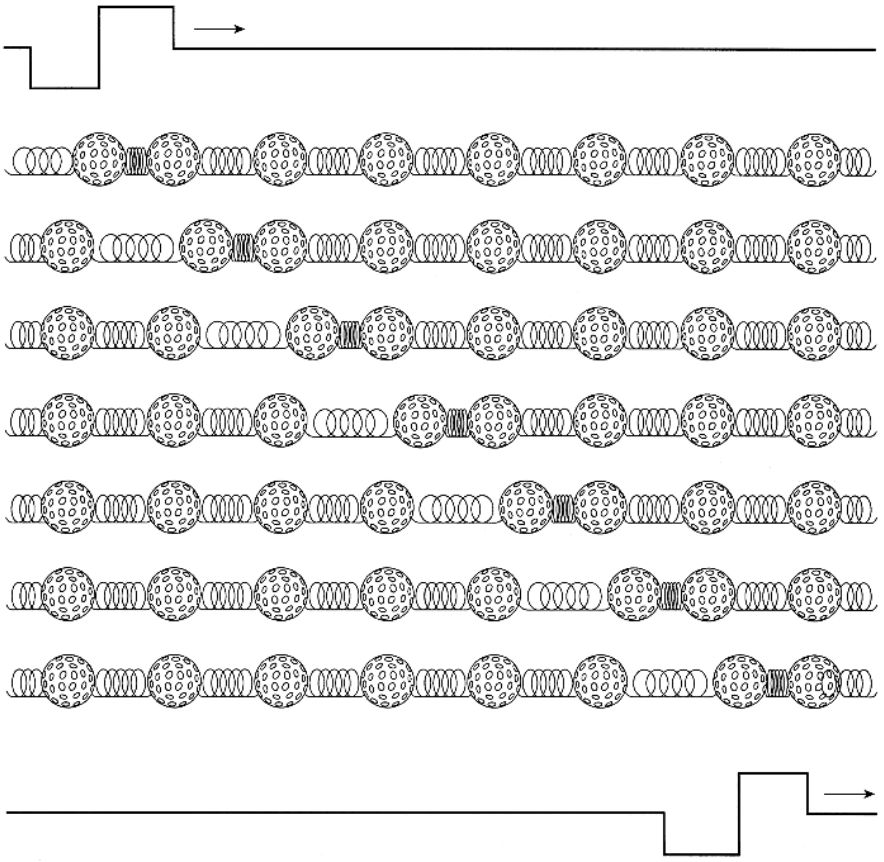
حرف C سمبل پذیرفته شده برای سرعت است، بله عجیب است، امّا حرف V برای چیزهای دیگری توسط فیزیکدانها استفاده شده است.

چگالی ρ، جرم در واحد حجم است. چگالی با واحد کیلوگرم بر مترمکعب ($Kg.m^{-3}$) اندازه‌گیری می شود.

واژه مُدول(Modulus) ، از واژه یونانی مُدوس (Modus) به معنای معیار اقتباس شده است.

تنش، نیروهای داخلی‌ای را نشان می دهد که ذرات یک مادهٔ پیوسته در مجاورت یکدیگر به هم وارد می‌کنند، در حالی که کُرنش معیاری برای اندازه‌گیری تغییرشکل مواد است. هر جسمی تحت فشار یا کشش تغییر شکل پیدا می‌کند.

مُدول یانگ (E) خاصیت ارتجاعی، کششی یا تمایل جسم به تغییر شکل در امتداد یک محور را، هنگامی که نیروهای مخالف در امتداد آن محور اعمال می‌شوند، توصیف می‌کند. مُدول یانگ به عنوان نسبت تنش کششی به تغییر شکل (کُرنش) کششی نیز تعریف می شود. اغلب به آن مُدول الاستیک گفته می‌شود. مُدول یانگِ بزرگتر به این معنی است که ماده خاصیت فنری (springiness) بیشتری دارد در نتیجه به نیروی بیشتری برای فشرده شدن نیاز دارد.



شکل ۲-۱ مدل سیستم توپ گلف و فنر و نحوهٔ انتشار در ماده

به هر جهت اگرچه چگالی یک مادهٔ جامد مستقل از جهت انتشار در آن مادهٔ جامد است امّا مدول یانگ ماده می‌تواند مستقل نباشد. برای مثال فلز برنج[1] معیار یانگی دارد که مستقل از جهت انتشار اختلال در آن است زیرا که فلزی همگن است در حالی که چوب معیار یانگی متفاوت دارد و بستگی به این دارد که معیار در جهت الیافِ (در امتداد ذرات) چوب اندازه‌گیری شده یا اندازه‌گیری در جهت عمود بر الیاف چوب انجام شده است. بنابر این فلز برنج اختلالات را با سرعتی که مستقل از جهت است منتشر می‌کند ولی سرعت

1 -brass

در چوب بستگی به این دارد که اختلال در امتداد الیاف چوب یا عمود بر آنها حرکت کند. برای روشن‌تر کردن این موضوع یک مثال را در نظر می‌گیریم. تغییر سرعت صوت در ماده‌ای مانند چوب می‌تواند بر آکوستیک سازهای موسیقی ساخته شده از چوب تأثیر بگذارد و پیامدهای خاصی برای محفظه‌های بلندگوها که اغلب با چوب طراحی و ساخته می‌شوند، داشته باشد. به طور کلی سازندگان بلندگو از چوبهای فرآوری شده‌ای مانند تخته چندلایی یا ام دی اف[1] که معیار یانگ مستقل از جهت دارند استفاده می‌کنند.

مثال ۱-۱

سرعت صوت را در فولاد و در چوب راش محاسبه کنید.

چگالی فولاد ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و مدول یانگ فولاد 2.1×10^{11} نیوتن بر مترمربع است، بنابر این سرعت صوت در فولاد بر حسب متر بر ثانیه برابر است با:

$$C_{steel} = \sqrt{\frac{2.1 \times 10^{11}}{7800}} = 5189 \text{ m/s}$$

چگالی چوب راش ۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و مدول یانگ آن در امتداد الیاف 14×10^{9} نیوتن بر مترمربع و در امتداد عمود بر الیاف 0.88×10^{9} نیوتن بر متر مربع است. این بدین معنی است که سرعت صوت در دو جهت متفاوت است و به صورت ذیل می‌باشد:

$$\sqrt{\frac{14 \times 10^{9}}{680}} = 4537 \text{ m/s} = C_{\text{beech wood along the grain}}$$

در جهت الیاف برابر با ۴۵۳۷ متر بر ثانیه

$$\sqrt{\frac{0.88 \times 10^{9}}{680}} = 1138 \text{ m/s} = C_{\text{beech wood across the grain}}$$

درجهت عمود بر الیاف ۱۱۳۸ متر بر ثانیه

بنابر این سرعت در جهت الیاف چوب راش ۴ برابر سریعتر از سرعت در جهت عمود بر الیاف است.

1 - MDF (medium density fiberboard)

۱,۱,۳ سرعت صوت در هوا The velocity of sound in air

تا اینجا سرعت صوت در جامدات در نظر گرفته شد. به هر جهت صوت معمولاً به عنوان چیزی در نظر گرفته می‌شود که درون هوا منتشر می‌شود و برای موسیقی، هوا محیطِ معمول برای انتشار صوت است. متأسفانه هوا معیار یانگ ندارد؛ بنا بر این معادلهٔ ۱-۱ را نمی‌توان به صورت مستقیم به کار برد، با اینکه همان مکانیسم یا ساز و کار برای انتشار صوت در هوا نیز وجود دارد. هوا حالتی فنر مانند دارد، همانگونه که هر کسی که انگشتش را جلوی خروجی پمپ دوچرخه گرفته باشد و دستهٔ پمپ را فشار داده باشد به شما می‌گوید که این حالت وجود دارد. پس وسیله‌ای برای دستیابی به چیزی معادل با معیار یانگ برای هوا نیاز است. این کار با در نظرگرفتن قانون گازهای آدیاباتیک[۱] یا بی-دررو که به صورت معادله ۱-۲ است قابل بررسی است.

$$P.V^{\gamma} = \text{constant} \qquad (۱-۲)$$

که در این معادله P فشار گاز بر حسب نیوتن بر مترمربع ($N.m^{-2}$) است

و V حجم گاز بر حسب مترمکعب (m^3) است

و توان γ ضریب ثابتی[۲] است که به نوع گاز بستگی دارد و برای هوا برابر با ۱,۴ است.

۱- مترجم: در علم ترمودینامیک، آدیاباتیک (adiabatic) یا **بی‌دررو** به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن انتقال حرارت و جرم بین سیستم ترمودینامیکی و محیط اطراف وجود نداشته باشد. در حقیقت در چنین فرآیندی تنها کار عامل انتقال انرژی بین سیستم و محیط محسوب می‌شود. زمانی که یک گاز ایده‌آل به‌صورت آدیاباتیک متراکم شود، فقط کار روی آن انجام شده و دمای آن نیز افزایش می‌یابد، از طرفی در فرآیند انبساط آدیاباتیک دمای گاز کاهش یافته و کار انجام می‌شود. برخی از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی در زمان بسیار کوتاهی انجام می‌شوند. با توجه به بالا بودن سرعت واکنش در این فرآیندها، سیستم فرصت انتقال حرارت به محیط اطراف را نخواهد داشت. از این رو فرآیندهای مذکور عمدتا به‌صورت آدیاباتیک رخ می‌دهند.

۲- مترجم: در فیزیک حرارت و ترمودینامیک، نسبت ظرفیت گرمایی γ که به عنوان **شاخص آدیاباتیک** یا نسبت گرماهای ویژه یا ضریب لاپلاس نیز شناخته می‌شود، برابر با نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (C_P) به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت (C_V) است. ظرفیت گرمایی یا ظرفیت حرارتی، ویژگی فیزیکی ماده است که به عنوان مقدار گرمایی که باید به یک جسم برای ایجاد یک واحد تغییر در دمای آن داده شود، تعریف می‌شود. واحد SI ظرفیت حرارتی ژول بر کلوین (J/K) است.

به این دلیل از معادلهٔ قانون گازهای بی‌دررو استفاده شده است که اختلالات به وجود آمده آنقدر سریع حرکت می‌کنند که فرصتی برای گرما وجود ندارد تا از طریق انقباض و انبساطهای درون هوا انتقال یابد.

معادلهٔ ۲-۱ رابطهٔ بین فشار و حجم یک گاز را به دست می‌دهد که می‌تواند برای تعیین قدرت فنر هوا[1] یا معادل معیار یانگ هوا به کار رود.

معیار یانگ برای هوا از معادلهٔ ۳-۱ به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$E_{gas} = \gamma.P \qquad (۱-۳)$$

نکته: فشار، نیرویی است بر حسب نیوتن، که توسط گاز به یک سطح وارد می‌شود. این فشار بدین دلیل ایجاد می‌شود که مولکولهای گاز به سطح برخورد می‌کنند. این فشار بر حسب نیوتن بر مترمربع ($N.m^{-2}$) اندازه‌گیری می‌شود. جرم مولکولی[2] گاز تقریباً برابر با جمع تعداد پروتونها و نوترونهای درون مولکول است که بر حسب گرم (g) بیان می‌شود. جرم مولکولی که بدین صورت تعریف می‌شود همیشه دارای تعداد ثابتی از مولکولها برابر با (6.022×10^{23}) در یک مول[3] (mol) است. این عدد را به عنوان آووگادرو[4] نیز می شناسند.

1 - air spring
2 - molecular mass

۳- مترجم: mole یا mol یکی از واحدهای شمارشی است. یک مول، طبق تعریف سنتی، مقداری از هر ماده است که تعداد ذرات بنیادی آن (مولکول یا اتم) برابر با تعداد اتم‌های موجود در ۱۲ گرم از کربن۱۲ است. این تعداد، عدد آووگادرو نامیده شده و برابر با **۶/۰۲۲۱۴۰۷۶×۱۰^۲۳** مولکول یا اتم است؛ در واقع مقداری از جسم که تعداد واحدهای بنیادی آن برابر با عدد آووگادرو باشد، یک مول است که واحدی از سیستم SI به شمار می‌رود.

4 - Avogadro

چگالی گاز از معادلهٔ ۴-۱ به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$\rho_{gas} = m/V = PM/RT \qquad (۱-۴)$$

که در آن m برابر با جرم گاز بر حسب کیلوگرم؛
و M برابر با جرم مولکولی گاز بر حسب کیلوگرم بر مول ($Kg\ mole^{-1}$)؛
و R ثابت جهانی گاز، برابر با ۸,۳۱ ژول بر درجه کلوین بر مول ($8.31\ J\ K^{-1}\ mole^{-1}$) است؛
و T دمای مطلق بر حسب کلوین (K) است.

معادلات ۳-۱ و ۴-۱ را می‌توان برای به دست آوردن سرعت صوت در گازها استفاده کرد که به صورت معادلهٔ ۵-۱ است:

$$C_{gas} = \sqrt{\frac{E_{gas}}{\rho_{gas}}} = \sqrt{\frac{\gamma.P}{(\frac{P.M}{R.T})}} = \sqrt{\frac{\gamma.R.T}{M}} \qquad (۱-۵)$$

معادلهٔ ۵-۱ مهم است زیرا که نشان می‌دهد سرعت صوت در گاز به وسیلهٔ فشار تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. در عوض سرعت صوت به صورت بسیار شدیدی توسط دمای مطلق گاز و وزن مولکولی گاز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابر این انتظار خواهیم داشت که سرعت صوت در گازی سبک مانند هلیم سریعتر از سرعت آن در گازی سنگین مانند دی اکسید کربن باشد و سرعت صوت در هوا مابین این دو قرار بگیرد. برای هوا می‌توانیم سرعت صوت را به صورت ذیل محاسبه کنیم:

مثال ۲-۱

سرعت صوت در هوای صفر و بیست درجه سانتیگراد را محاسبه کنید.
ترکیب هوا عبارتست از ۲۱٪ اکسیژن (O_2)، ۷۸٪ نیتروژن (N_2)، ۱٪ آرگون (Ar) و مقادیر بسیار کمی از گازهای دیگر؛ که به این ترتیب جرم مولکولی هوا برابر است با :

$M = (21\% \times 16 \times 2) + (78\% \times 14 \times 2) + (1\% \times 18\ M) = 2.87 \times 10^{-2}\ kg\ mole^{-1}$

$\gamma = 1.4$
$R = 8.31 \qquad J.\ K^{-1}.\ mole^{-1}$

که سرعت صوت در هوا را به صورت ذیل به دست می‌دهد.

$$C = \sqrt{\frac{1.4 \times 8.31 \times T}{2.87 \times 10^{-2}}}$$

$$C = 20.1\sqrt{T}$$

بنابر این سرعت صوت در هوا تنها به ریشه دوم دمای مطلق هوا بستگی دارد، که می‌توان آن را با افزودن ۲۷۳ به دما بر حسب درجه سانتیگراد به دست آورد. در نتیجه سرعت صوت در هوا در دمای صفر درجهٔ سانتیگراد و ۲۰ درجهٔ سانتیگراد برابر است با:

$$C_{0^\circ C} = 20.1\sqrt{273 + 0} = 332\ m/s$$

$$C_{20^\circ C} = 20.1\sqrt{273 + 20} = 344\ m/s$$

دلیل افزایش سرعت صوت به عنوان تابعی از دما، دو وجهی[1] است. اوّل اینکه همانگونه که در معادلهٔ ۴-۱ چگالی گاز ایده‌آل شرح داده شده است، همچنان که دما افزایش پیدا می‌کند حجم گاز نیز افزایش می‌یابد و به شرطی که فشار ثابت بماند چگالی کاهش می‌یابد. دوّم اینکه اگر فشار تغییر کند (افزایش یابد) اثر آن بر روی چگالی با افزایش در معیار یانگ مؤثر برای هوا جبران خواهد شد، همانگونه که به وسیلهٔ معادلهٔ ۳-۱ نشان داده شده است. در حقیقت فاکتور غالب دیگر غیر از دما که سرعت صوت را در گازها تحت تأثیر قرار می‌دهد وزن مولکولی است. اگر به جای هوا گاز دیگری برای مثال هلیم باشد، این سرعت به روشنی تفاوت خواهد داشت.

1 - twofold

امّا وزن مولکولی مؤثر نیز در حضور بخار آب می‌تواند تغییر کند، زیرا مولکولهای آب جایگزین مقداری از هوا می‌گردند و از آنجا که وزن کمتری دارند باعث می‌شود تا سرعت صوت در مقایسه با هوای خشک مقدار کمی افزایش پیدا کند.

اگرچه سرعت صوت در هوا متناسب با ریشهٔ دوّم دمای مطلق آن است می‌توانیم این تغییر را در محدودهٔ دمای معمول اطرافمان با معادله‌ای خطی تقریب بزنیم:

$$c < 331.3 + 0.6\,t \ \ \mathrm{m.s^{-1}} \qquad (۱-۶)$$

که در آن t دمای هوا بر حسب °C است.

بنابر این می‌توانیم ببینیم که به ازاء افزایش هر درجهٔ سانتیگراد در دمای محیط، سرعت صوت در حدود $0.6\ \mathrm{m.s^{-1}}$ افزایش پیدا می‌کند و این مسئله می‌تواند پیامدهای مهمی در نحوهٔ انتشار صوت داشته باشد. جدول ۱-۱ چگالی هوا، معیار یانگ و سرعت متناظر امواج طولی را برای مواد گوناگون در اختیار می‌گذارد.

جدول ۱-۱ معیار یانگ، چگالی و سرعت صوت در بعضی از مواد معمول

ماده **Material**	معیار یانگ $\mathbf{Nm^{-2}}$	چگالی $\mathbf{Kgm^{-3}}$	سرعت صوت $\mathbf{ms^{-1}}$
فولاد Steel	2.10×10^{11}	7800	5189
آلومینیوم Aluminum	6.90×1010	2720	5037
سرب Lead	1.70×10^{10}	11400	1221
شیشه Glass	6.00×10^{10}	2400	5000
بتون concrete	3.00×10^{10}	2400	3536
آب Water	2.30×10^{9}	1000	1517
هوا در ۲۰ درجه سانتیگراد	1.43×10^{5}	1.21	344
چوب راش در امتداد ذرات Beech wood (along the grain)	1.40×10^{10}	680	4537
چوب راش عمود بر امتداد ذرات Beech wood (across the grain)	8.80×10^{8}	680	1138

نکته: "سرعت فاز[1]" عبارت صحیح‌تری است برای آنچه ما آن را به آسانی سرعت می‌نامیم. سرعت فاز، سرعتی است که یک فرکانس تکی با آن سرعت در درون یک محیط سیر می‌کند. به این دلیل به آن سرعت فاز می‌گویند که نشان دهندهٔ این است که چقدر سریع بخشی از فاز موج سینوسی، برای مثال قله یا نقطهٔ گذر از صفر، درون محیط سیر می‌کند. این نام بدین دلیل به آن داده شده است که در محیطهای پراکنده کننده،[2] سرعت فاز با تغییر فرکانس تغییر می‌کند. این مسئله منجر به دو معیار سرعت می‌شود: یکی سرعت فاز برای هر فرکانس به تنهایی و دیگری سرعت گروه[3] برای پوش سیگنال[4] یا مجموعهٔ فرکانسهایی که درون موج وجود دارند.

۱,۱,۴ امواج عرضی و انواع دیگر موج Transverse and other types of wave

هنگامی که ماده‌ای داشته باشیم که مرزهای آن قابلیت حرکت داشته باشد، برای مثال سیم گیتار، میله یا سطح دریا، آنگاه دیگر امواجی غیر از امواج طولی رخ خواهند داد. ساده‌ترین نوع موج، غیر از موج طولی، موج عرضی‌ای است که بر روی یک سیم مرتعش گیتار رخ می‌دهد. در یک موج عرضی به جای فشار دادن و کشیدن به سمت یکدیگر، مانند توپهای گلف که پیشتر توضیح داده شد، حرکت از یک طرف به طرف دیگر در عرض رخ می‌دهد و این باعث اختلالی عرضی می‌گردد، که همانند نیروهای اعمال شده توسط فنرها به توپهای گلف که پیشتر شرح داده شد منتشر می‌شود.

---

1 - phase velocity

۲- مترجم: محیطهای پراکنده کننده یا dispersive medium محیطهایی هستند که وقتی موجی متشکل از فرکانسهای مختلف از درون آنها گذر می‌کند شکل موج را به هم می‌ریزند و محیطهای غیر پراکنده کننده non-dispersive medium تأثیری بر روی پوش سیگنال یا شکل موج نمی‌گذارند. از لحاظ فیزیکی dispersion به معنی از دست دادن انرژی از طریق جذب محیط است.

3 - group velocity

4 - envelope of the signal

این نوع از امواج را به عنوان **"امواج عرضی"** می‌شناسند و اغلب در ارتعاشات قسمتهایی از سازهای موسیقی مانند سیمها یا غشاءهای نازک یافت می‌شود.

۱,۱,۵ سرعت امواج عرضی The velocity of transverse waves

سرعت ارتعاشات امواج عرضی با عوامل دیگری غیر از خواص ماده نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای مثال، کشش ثابتِ[1] فنر، اثر بسیار زیادی بر روی شتاب توپهای گلف در مدل فنر و توپ گلف دارد. اگر کشش کم باشد، آنگاه نیرویی که توپهای گلف را به جای اوّلیهٔ خود باز می‌گرداند کمتر می‌شود و بنابر این موج بسیار آهسته‌تر از زمانی که کشش فنر بیشتر است منتشر خواهد شد. این موضوع به ما اجازه می‌دهد تا سرعت امواج عرضی را تنظیم کنیم، که در کوک کردن[2] سازهای موسیقی بسیار مفید است. به هر جهت ارتعاشات عرضی سیمها برای بسیاری از سازهای موسیقی اساساً مهم است؛ سرعت امواج عرضی در قطعه‌ای از سیم را می‌توان به وسیلهٔ معادلهٔ ۷-۱ به دست آورد:

$$C = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad (۱-۷)$$

که درآن μ برابر است با جرم در واحد طول بر حسب کیلوگرم بر متر ($Kg.m^{-1}$)

و T برابر است با کشش سیم بر حسب نیوتن (N)

اگرچه این معادله برای سیمی با فرض ضخامت بینهایت باریک به دست آمده است ولی برای اغلب سیمهایی که در عمل به کار برده می‌شوند قابل به کارگیری است. امّا این معادله تنها برای امواج عرضی خالص کاربرد دارد و نمی‌تواند برای مُدهای[3] دیگر ارتعاشات به کار گرفته شود. به هر جهت امواج عرضی شکل غالب ارتعاش برای سیمهای

1 - static spring tension
2 - tuning
3 - modes

نازک هستند. مهمترین خطا در معادلهٔ ۷-۱ به دلیل سفتی[1] ذاتی در مواد واقعی است که منجر به افزایش سرعت با افزایش فرکانس می‌شود. این اثر، کیفیّت[2] یا رنگ صدای سازهای موسیقی سیمی ضربه‌ای، مانند پیانو و گیتار را تغییر می‌دهد و برای سیمهای ضخیم‌تر این اثر قوی‌تر می‌شود. بنابر این معادلهٔ ۷-۱ را می‌توان برای اغلب منظورهای عملی به کار برد. حال اجازه دهید سرعت ارتعاشات عرضی بر روی یک سیم فولادی را حساب کنیم.

مثال ۳-۱

سرعت ارتعاش عرضی بر روی یک سیم فولادی که قطری برابر با ۰,۸ میلی‌متر و کششی برابر با ۶۲۷ نیوتن دارد را حساب کنید(این سیم می‌تواند سیم فولادی گیتار باشد).

جرم در واحد طول به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$\mu_{steel} = \rho_{steel} \times \pi \times r^2 = 7800 \times 3.14 \times (0.8 \times 10^{-3}/2)^2 = 3.92 \times 10^{-3}\ Kgm^{-1}$$

بنابر این سرعت موج عرضی برابر است با:

$$C_{steel\ transvers} = \sqrt{\frac{627}{3.92 \times 10^{-3}}} = 400\ ms^{-1}$$

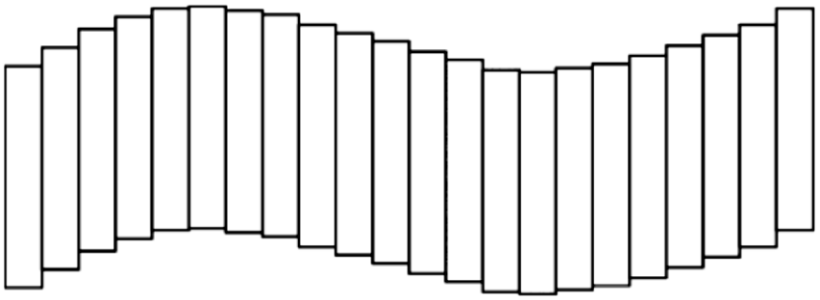
این سرعت به طور قابل توجهی آهسته‌تر از سرعت موج طولی در همان فولاد است. به طور کلی امواج عرضی بسیار آهسته تر از امواج طولی در مواد با جنس یکسان منتشر می‌شوند.

۱,۱,۶ امواج در میله‌ها و صفحات Waves in bars and panels

چندین موج مختلفِ ممکن در اجسام سه بعدی وجود دارد. برای مثال جهت‌های مختلفی از ارتعاش وجود دارد که علاوه بر این، بسته به اینکه سطح مقابل، ارتعاشی با

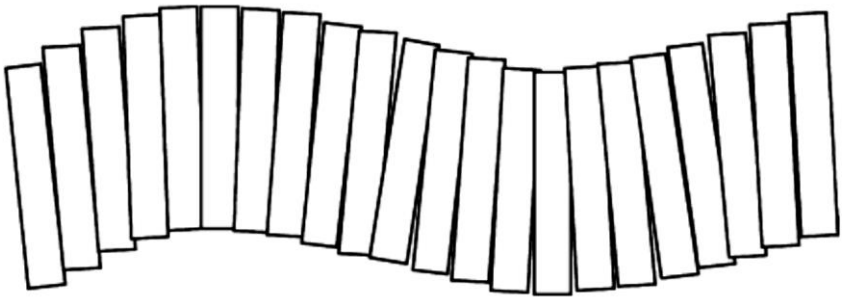
1 - stiffness
2 - timbre

حرکتی مشابه یا مخالف داشته باشد، مانند حرکت عرضی، پیچشی طولی[1] و غیره، اَشکال مختلفی خواهد داشت. همهٔ این روشهای مختلف حرکت دارای مقادیر ثابت فنری متفاوت هستند و هر یک از این ثابتها با عوامل مختلف خارجی، مانند شکل ماده، به صورتی متفاوت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این بدین معنی است که برای هر شکلی پیچیده‌تر از یک سیم نازک، سرعت انتشار مُدهای عرضی ارتعاش به شدّت پیچیده خواهد شد. این موضوع هنگامی مهم خواهد شد که عملکرد سازهای کوبه‌ای[2] را در نظر بگیریم. سه نوع موج اصلی در این ساختار وجود دارد: شبه-طولی[3]، برشی عرضی[4] و خمشی[5] (سینوسی یا بالا پایین رونده[6])؛ دوتای آخری در شکلهای ۳-۱ و ۴-۱ نشان داده شده است. موجهای دیگری نیز وجود دارد مانند امواج آکوستیک سطحی، همانند امواجی که بر سطح دریا و در زمان زلزله به وجود می‌آیند که ترکیبی از امواج عرضی و طولی هستند.



شکل ۳-۱ نمای یک موج برشی عرضی

1 - longitudinal torsional
2 - percussion instruments
3 - quasi-longitudinal
4 - transverse shear
5 - bending
6 - flexural



شکل ۴-۱ نمای یک موج خمشی (بالا پایین رونده)

امواج شبه-طولی quasi-longitudinal waves

امواج شبه-طولی امواجی هستند که به دلیل ضخامت محدود محیط انتشار منجر به بعضی از حرکتهای عرضی می‌گردند از این رو امواج شبه-طولی نامیده می‌شوند. در هر حال این حرکتهای عرضی کوچک بوده و برای امواج شبه-طولی در میله‌ها و ورقها[1]، چگالی و معیار یانگِ مواد، سرعت انتشار را به همان روش امواج طولی خالص تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابر این سرعت انتشار امواج شبه-طولی را می‌توان به آسانی از معادلهٔ ۱-۱ محاسبه نمود.

امواج برشی عرضی transverse shear waves

امواج برشی عرضی، امواجی هستند که دارای جابجایی عرضی (برشی) خالصی درون ماده جامد هستند. بسیار مفید خواهد بود که تعریف و یا توصیفی از "برش" داشته باشیم. برخلاف امواج عرضی ساده بر روی یک سیم نازک، امواج شبه-طولی به نیروی بازگرداننده ناشی از کشش متکی نیستند، بلکه به نیروی برشی جامدات متکی هستند. جامدات می‌توانند در مقابل تغییر شکل برشی استاتیک یا ثابت مقاومت کنند و این به

1 - plates

عنوان معیار برشی[۱] یا معیار صُلبیّت[۲] آنها شناخته می‌شود و به عنوان نسبت تنش برشی[۳] به کشش برشی[۴] (یا کُرنش برشی) تعریف شده است.

نکته: جابجایی برشی چیزی است که هنگام برش کاغذ با قیچی یا پاره کردن آن رخ می‌دهد. در این حالت شما نیرویی را در زاویهٔ عمود وارد می‌کنید که باعث می‌شود تا بخشی از ماده نسبت به بقیهٔ آن بلغزد یا برش بخورد.

معیار صُلبیّت یک ماده (G) با معیار یانگ از طریق نسبت پواسون (ν)[۵] در ارتباط است. این نسبت به عنوان نسبت اندازهٔ کشش عرضی[۶] به کشش طولی تعریف شده و معمولاً بین 0.25 برای جسمی مانند شیشه تا 0.5 برای جسمی مانند لاستیک سخت است.

این مسئله به این دلیل رخ می‌دهد که هنگام اعمال تنشی در جهت طولی (انقباض پواسون)[۷] تغییری در بُعد عرضی ایجاد می‌شود که در نتیجه آن کشش عرضی به وجود می‌آید. معادله‌ای که معیار برشی را به معیار یانگ مرتبط می‌سازد معادلهٔ ۸-۱ است:

$$G = \frac{E}{2(\nu+1)} \qquad (۱-۸)$$

که در آن (G) معیار برشی یا معیار صُلبیّت ماده بر حسب نیوتن بر مترمربع (Nm^{-2})
و (E) معیار یانگ ماده بر حسب نیوتن متر (Nm^{-2})
و (ν) نسبت پواسون[۸] ماده است.

---

1 - shear modulus
2 - modulus of rigidity
3 - shear stress
4 - shear strain
5 - Poisson ratio
6 - lateral strain
7 - Poisson contraction

۸- مترجم: نسبت پواسون تغییر شکل در مواد را در جهت عمود بر جهت نیروی اعمال شده اندازه‌گیری می‌کند. نسبت پواسون برابر است با نسبت تنش کششی شعاعی به تنش کششی محوری.

بنابر این برای امواج برشی عرضی، سرعت از طریق ذیل محاسبه می‌گردد:

$$C_{\text{transverse shear}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad (۱-۹)$$

که در آن (G) معیار برشی یا معیار صُلبیّت ماده بر حسب نیوتن بر مترمربع (Nm^{-2}) و ρ چگالی ماده بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب ($Kg.m^{-3}$)

این معادله مانند معادلهٔ پیشین برای امواج شبه-طولی، سرعت فازی را به دست می‌دهد که مستقل از فرکانس است. مقایسهٔ معادلات ۱-۱ و ۱-۹ نشان می‌دهد که نسبت سرعت دو موج را می‌توان به صورت ذیل به دست آورد:

$$\frac{C_{\text{transverse shear}}}{C_{\text{quasi longitudinal}}} = \sqrt{\frac{1}{2(\nu+1)}} \qquad (۱-۱۰)$$

بنابر این سرعت امواج برشی عرضی کمتر از سرعت امواج شبه- طولی است. معمولاً نسبت سرعتها برای مواد همگن در حدود 0.6 است. بسیار مشکل است تا با استفاده از اعمال نیروها یک موج برشی عرضی خالص را در یک صفحه ایجاد کرد، زیرا در عمل یک نیروی اعمال شده منجر به هر دو جابجایی عرضی و طولی می‌گردد. این کار باعث به وجود آمدن امواج خمشی (سینوسی) درون ورق یا صفحه می‌گردد.

امواج خمشی (سینوسی) Bending (flexural) waves

امواج خمشی (سینوسی) نه موج طولی خالص و نه موج عرضی خالص هستند، بلکه آنها ترکیبی از هر دو موج طولی و عرضی هستند. بررسی شکل ۴-۱ نشان می‌دهد که علاوه بر حرکت عرضی حرکت طولی نیز وجود دارد که در دو سطح به بیشینه مقدار خود می-رسد. همچنین حرکتهای طولی در دو طرف خط مرکزی میله، فاز مخالف دارند. علاوه بر مؤلفهٔ عرضی نتیجهٔ خالص این دو حرکت، چرخشی حول نقطهٔ وسط، صفحهٔ خنثی است.

از آنجا که در اصل هر دو نیروی برشی و چرخشی درگیر هستند، تحلیل رسمی این سیستم پیچیده است.

به هر جهت به شرط آنکه مشارکت نیروهای برشی در جابجایی عرضی در مقایسه با نیروهای خمشی کوچک باشد (یک اتفاق رایج)، سرعت موج خمشی[۱] در یک ورق نازک به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$V_{bending} = \sqrt{\omega}\left[\frac{D}{m}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۱-۱۱)$$

که در آن D میزان سفتی[۲] ورق یا صفحه بر حسب نیوتن متر (N.m)

و m جرم در واحد سطح بر حسب کیلوگرم بر مترمربع ($Kg.m^{-2}$) است.

و ω فرکانس بر حسب هرتز Hz است.

نکته: میزان سفتی ورق برابر است با:

$$D=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

که در آن D سفتی ورق بر حسب نیوتن متر (N.m) یا پاسکال مترمکعب ($Pa.m^3$) است

و h ضخامت ورق بر حسب متر (m)

و E مدول یانگ ماده بر حسب نیوتن بر مترمربع ($N.m^{-2}$)

و ν نسبت پواسون ماده است.

۱ - مترجم: سرعت موج خمشی به فرکانس وابسته است و در جسم جذب می‌شود.

۲ - مترجم: میزان سفتی ورق یا Flexural rigidity or bending stiffness در واقع از حاصل‌ضرب معیار یانگ E در ضریب ممان اینرسی I که به شکل جسم وابسته است به دست می‌آید یعنی: D = E.I

معادلهٔ ۱۱-۱ به طور قابل توجهی با معادلات مربوط به امواج شبه-طولی و امواج برشی عرضی متفاوت است. به طور خاص در این معادله سرعت به فرکانس وابسته است و با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

این وابستگی به فرکانس منجر به انتشار پراکندهٔ امواج با فرکانسهایی می‌شود که با سرعتهای مختلف در محیط حرکت می‌کنند. بنابر این در انتشار امواج خمشی شکل موج حفظ نخواهد شد. هر کسی می‌تواند این اثر را با با پرت کردن سنگی در حوض یخ زده و شنیدن صدای "ترق ترق[1]" ناشی از شکستن یخ تجربه کند. پراکندگی و ریشه چهارم از آنجا ناشی می‌شود که بر خلاف امواج شبه-طولی و برشی عرضی، مشتقات مکانی[2] در معادلهٔ موج به جای آنکه از مرتبه دوّم باشند، از مرتبه چهارم هستند؛ زیرا موج خمشی، ترکیبی مخلوط از موج شبه-طولی و برشی عرضی است.

فرض اصلی که پشت معادلهٔ ۱۱-۱ قرار دارد این است که مشارکت نیروی برشی در جابجایی عرضی کوچک است. اگر در طول موجهای بلند، قطر خمش نسبت به ضخامت ورق بزرگ باشد این فرض می‌تواند درست باشد. به هر حال اگر قطر خم مشابه با ضخامت ورق باشد این شرط دیگر برقرار نخواهد بود و موج منتشر شده به صورت مجانبی[3] به موج برشی عرضی نزدیک خواهد شد. این مسئله حد بالایی برای سرعت فاز موج خمشی به دست می‌دهد که برابر با موج برشی عرضی در مواد است. نسبت بین سهم برش و خمش در جابجایی عرضی به صورت تقریبی برابر است با:

$$\frac{\text{contributions}_{\text{shear}}}{\text{contributions}_{\text{bending}}} = \left(\frac{h}{\lambda_{bending}}\right)^2 \qquad (۱-۱۲)$$

1 - chirp
2 - spatial derivatives
3 - asymptotically

که در آن h ضخامت ورق بر حسب متر (m)

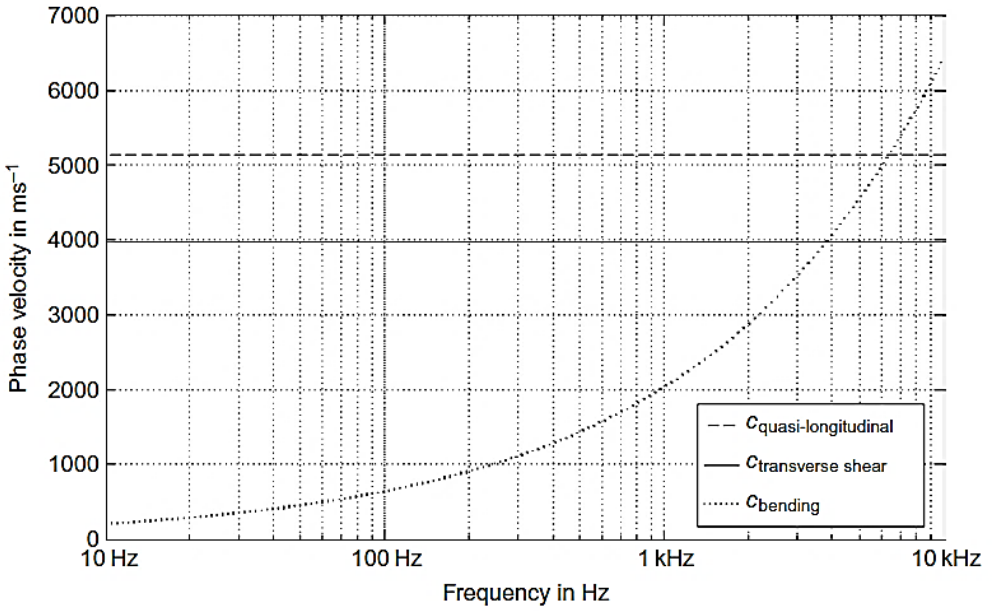
و $\lambda_{bending}$ طول موجِ، موج خمشی بر حسب متر (m) است.

از معادلهٔ ۱۲-۱ در می‌یابیم که سهم برشی، هنگامی که طول موجِ موج خمشی بزرگتر از ۶ برابر ضخامت باشد ($\lambda_{bending} > 6h$)، کمتر از ۳ درصد خواهد بود. پس حدّ بالایی از فرکانس وجود خواهد داشت.

شکل ۵-۱ مقایسه‌ای از سرعت انواع موجها را به عنوان تابعی از فرکانس در ورقی آلومینیومی با ضخامت ۶ میلی‌متر نشان می‌دهد. از شکل ۵-۱ می‌توانیم دریابیم که هر دو موج شبه- طولی و برشی عرضی در میله‌ها و ورقها، غیر- پراکنده شونده[1] هستند، از این رو سرعت فاز در آنها مستقل از فرکانس است. این بدین معنی است که این امواج همچنین سرعت گروهی مستقل از فرکانس دارند و در نتیجه شکل موج صوتی که شامل مؤلفه‌های فرکانسی زیادی است حفظ خواهد شد.

به هر حال امواج خمشی پراکنده شونده هستند و این بدان معنی است که سرعت فاز آنها به فرکانس بستگی دارد. این همچنین بدین معنی است که سرعت گروه در این امواج نیز وابسته به فرکانس است و در نتیجه شکل موج صوتی که شامل چندین مؤلفه فرکانسی باشد را حفظ نخواهند نمود.

1 - non-dispersive



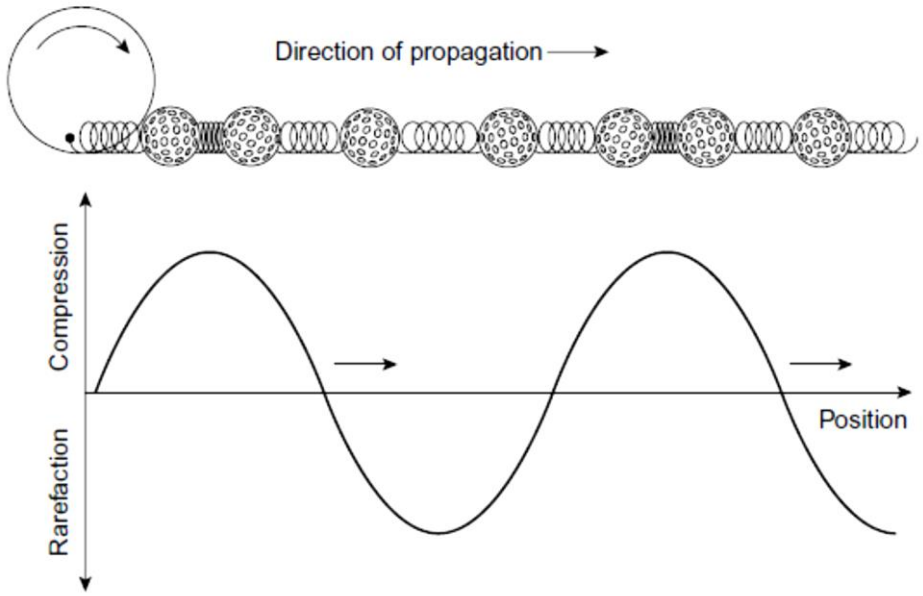
شکل ۵-۱ سرعت فاز بر حسب فرکانس برای انواع مختلف انتشار موج

۱,۱,۷ طول موج و فرکانس امواج صوتی The wavelength and frequency of sound waves

تا اینجا فقط انتشار یک اختلال تکی را درون مدل توپ گلف و فنر در نظر گرفتیم و دیدیم که در این حالت اختلال با سرعتی ثابت حرکت می‌کند و تنها به مشخصات فیزیکی محیط وابسته است. بدین ترتیب هر نوع اختلال دیگری، مانند یک اختلال دارای دوره‌های توالی یکسان و پیوسته (دوره‌ای) یا تناوبی،[1] نیز با سرعت ثابت حرکت خواهد کرد. شکل ۶-۱ مدل توپهای گلف و فنر را نشان می‌دهد که با یک پین به چرخی که با سرعتی ثابت می‌چرخد متصل شده است.

1 - periodic

این چرخ تغییرات فشاری به وجود می‌آورد که تابعی از زمان است و متناسب با سینوس زاویهٔ چرخش آن می‌باشد. این نوع تحریک را که موجی سینوسی تولید می‌کند **"تحریک سینوسی**[1]**"** می‌نامند. این مدل از این جهت مهم است که نشان دهندهٔ ساده‌ترین فرم تحریک دوره‌ای است. همانگونه که بعداً در این فصل خواهیم دید، شکل موجهای پیچیده‌تر را می‌توان همیشه بر حسب این فرم ساده‌تر امواج سینوسی توصیف نمود.

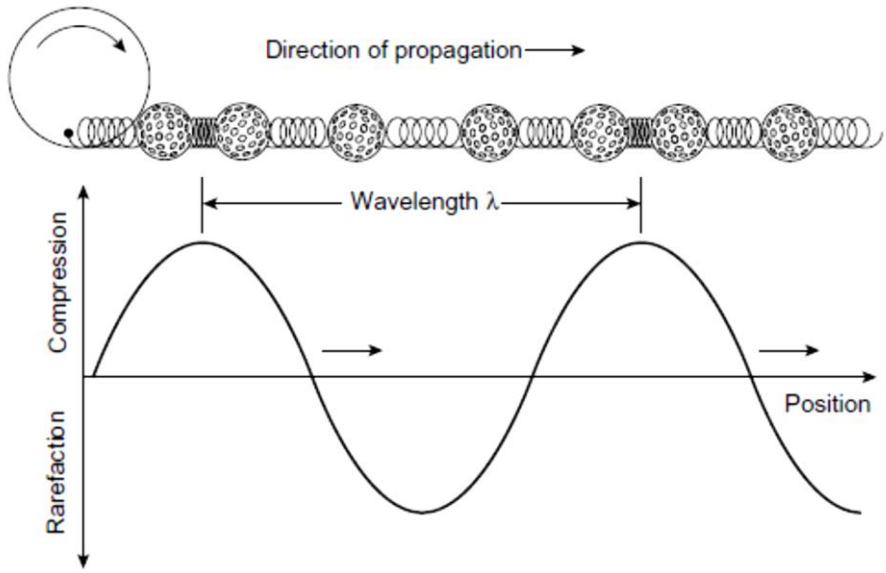


شکل ۶-۱ مدل توپ گلف و فنر یک موج سینوسی منتشر شونده در ماده

امواج سینوسی دارای سه مشخصه هستند: **دامنهٔ آنها، نرخ چرخش یا فرکانس، و نقطهٔ شروع یا فاز آنها.** فرکانس باید بر حسب واحد تعداد دوره در ثانیه باشد، که مبدأ شکل موج را بازتاب می‌دهد امّا اکنون بر حسب واحد معادل آن یعنی هرتز اندازه‌گیری می‌شود.

1 - sinusoidal excitation

این نوع از تحریک، اختلال سینوسی متحرکی را تولید می‌کند که درون سیستم پیش می‌رود، جایی که فشردگیها و بازشدگیها به صورت دوره‌ای هستند. از آنجا که موج سینوسی با سرعت مشخصی منتشر می‌شود، طول مشخصی را می‌توان به مسافت تکراری بین فشردگیها و بازشدگیها اختصاص داد، همانگونه که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱ طول موج یک موج سینوسی منتشر شونده

علاوه بر این به دلیل اینکه سرعت ثابت است، مسافت بین این دوره‌های تکراری موج سینوسی به صورت عکس با نرخ تکرار موج سینوسی در واحد زمان، که به نام "فرکانس" موج سینوسی شناخته می‌شود، متناسب است. مسافت بین دوره‌های تکراری، مقدار آکوستیکی مهمی است و "طول موج (λ)" نامیده می‌شود. از آنجا که طول موج و فرکانس به وسیلهٔ سرعت با یکدیگر در ارتباط هستند، امکان محاسبهٔ یکی با داشتن اطلاعات دوتای دیگر توسط معادلهٔ ۱۳-۱ ممکن است:

$$C = f.\lambda \qquad (۱-۱۳)$$

که در آن C سرعت بر حسب متر بر ثانیه ($m.s^{-1}$)

و f فرکانس صوت بر حسب هرتز است (1 Hz = 1 cycle per second)

و λ طول موج صوت در محیط انتشار بر حسب متر (m) است.

این معادله را می‌توان برای محاسبهٔ فرکانس با داشتن طول موج و محاسبهٔ طول موج با داشتن فرکانس و حتی محاسبهٔ سرعت صوت در محیط با داشتن فرکانس و طول موج به کار برد. این معادله برای هر دو نوع موج طولی و عرضی قابل استفاده است.

مثال ۴-۱

طول موج صوتی را که در هوایی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد منتشر می‌شود، برای فرکانس ۲۰ هرتز و ۲۰ کیلوهرتز حساب کنید.

برای هوای در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد سرعت C برابر است با ۳۴۴ متر بر ثانیه (مثال ۲-۱ را ببینید)؛ بنابر این طول موج در دو فرکانس داده شده برابر است با:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

که در نتیجه:

$$\lambda = \frac{344}{20} = 17.2 \text{ m for } 20 \text{ Hz}$$

و

$$\lambda = \frac{344}{20000} = 1.72 \text{ cm for } 20 \text{ KHz}$$

این دو فرکانس متناظر با دو حد نهایی محدودهٔ فرکانسی شنوایی انسان هستند؛ بنابر این می‌توان دید که گسترهٔ اندازهٔ طول موجها در محدودهٔ شنوایی بسیار بزرگ است!

در آکوستیک از طول موج به عنوان خط‌کشی برای اندازه‌گیری طول به جای متر، فوت[1] یا فرلانگ[2] استفاده می‌شود، زیرا بسیاری از اثرات اجسام واقعی مانند اتاقها و موانع بر روی امواج صوتی به طول موج وابسته است.

مثال ۵-۱

فرکانس صوتی را حساب کنید که دارای طول موج ۳۴ سانتی‌متر در هوای با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است.

فرکانس به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{344}{34} = 1012\ Hz$$

۱،۱،۸ عدد موج امواج صوتی The wavenumber of sound waves

گاهی مفید است تا از مقداری عددی به نام عدد موج که تشریح می‌کند چه میزان از فاز موج در یک مسافت مشخص تغییر می‌کند، استفاده کنیم. عدد موج نیز نوعی خط‌کش است که واحد آن بر حسب رادیان بر متر ($rad.m^{-1}$) است.

نکته: رادیان معیار اندازه‌گیری زاویه است و برابر با ۱۸۰/π یا ۵۷,۳ درجه است.

بیشتر اجسام فیزیکی قبل از تعامل با امواج صوتی، نیاز دارند تا حداقل تغییر فازی برابر با یک رادیان (در موج) در امتداد اندازه فیزیکی‌شان داشته باشند.

عدد موجِ یک موج صوتی به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$K = \frac{\omega}{c} \qquad (۱-۱۴)$$

1 - foot (واحدی است معادل با ۳۰,۴۸ سانتی‌متر)

2 -furlongs (واحدی است معادل با ۲۲۰ یارد یا ۶۶۰ فوت)

که در آن K عدد موج است بر حسب رادیان بر متر
و ω فرکانس زاویه‌ای[1] بر حسب رادیان بر ثانیه ($rad.s^{-1}$)
و c سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه ($m.s^{-1}$) است.

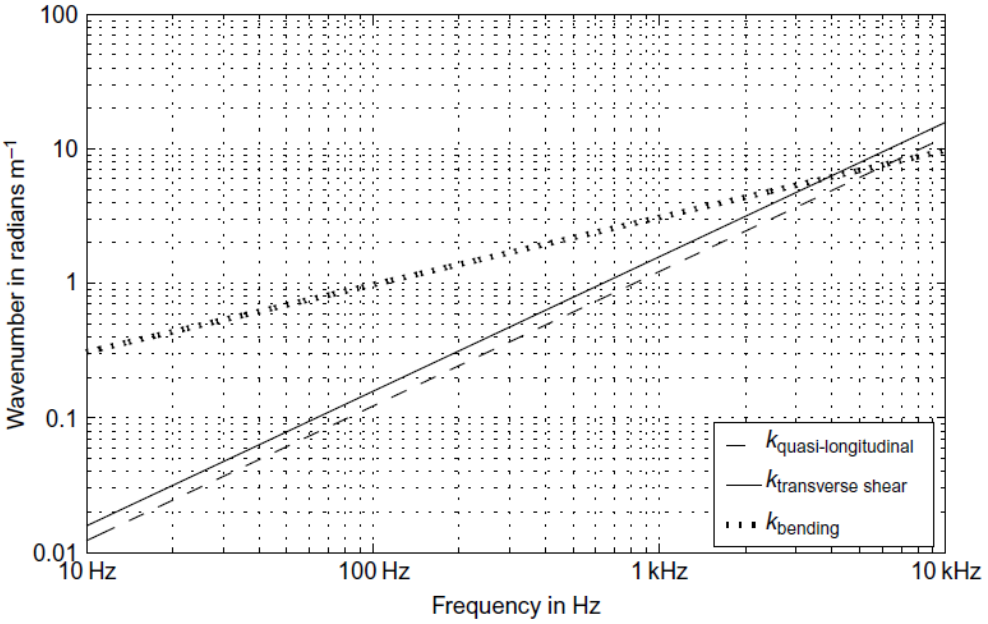
عدد موج مخصوصاً از آنجا سودمند است که هر گونه اثرات پراکنده کننده و تغییرات سرعت با فرکانس را دربر می‌گیرد، و برای مثال می‌تواند مستقیماً برای محاسبهٔ جنبه-های گوناگون انتشار موج در صفحات و تشعشعات آکوستیکی از آنها به کار گرفته شود. به عنوان نمونه معادلات عدد موج برای امواج عرضی و خمشی در ورقها به ترتیب به صورت ذیل است:

$$K_{\text{transverse shear}} = \omega \left[\frac{\rho}{G}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱-۱۵)$$

$$K_{\text{bending}} = \sqrt{\omega} \left[\frac{m}{D}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۱-۱۶)$$

دو نکته در معادلات ۱-۱۵ و ۱-۱۶ قابل توجه است. اوّلین نکته این است که عدد موجِ امواج برشی جانبی[2] متناسب با فرکانس است، درست همانگونه که از امواج غیر-پراکنده شونده انتظار می‌رود. شکل ۱-۸ منحنیهای پراکندگی انواع موج در ورق آلومینیومی را به همراه منحنی پراکندگی صوت در هوا نمایش می‌دهد. به هر جهت برای یک موج خمشی عدد موج تنها با ریشه دوّم فرکانس افزایش می‌یابد. در هر دو مورد ضریب با سرعت فاز نسبت معکوس دارد، لذا شیب کم حاکی از سرعت زیاد فاز است. اغلب ترسیم عدد موج بر حسب فرکانس زاویه‌ای در نمودار پراکندگی بسیار سودمند خواهد بود.

1 -angular frequency
2 -lateral shear waves



شکل ۸-۱ عدد موج بر حسب فرکانس برای انواع مختلف انتشار موج

۱,۱,۹ رابطه بین فشار، سرعت و امپدانس در امواج صوتی

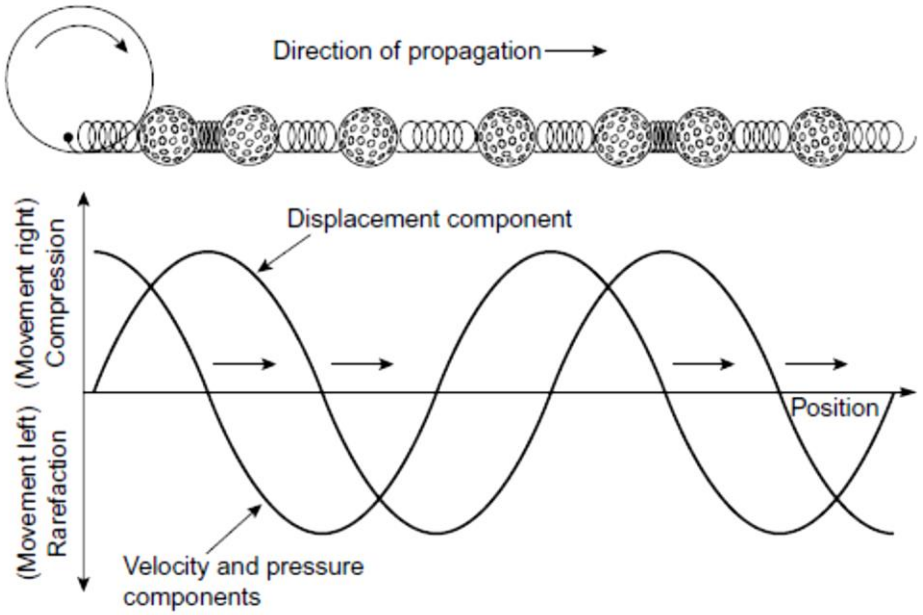
The relationship between pressure, velocity and impedance in sound waves

یکی دیگر از جنبه‌های موج انتشاری که باید در نظر گرفته شود، حرکت مولکولها در محیطی است که آن را حمل می‌کند. موج را می‌توان به صورت یک رشته از تراکم‌ها (انقباض) و بازشدگیها (انبساط) مشاهده کرد که درون محیط حرکت می‌کنند. نیروی مورد نیاز برای ایجاد جابجایی؛ یعنی ترکیبی از تراکم و شتاب، مؤلفهٔ فشار موجی را شکل می‌دهد.

به منظور شکل گیری انقباض و انبساطها، مولکولها باید به یکدیگر نزدیک شده و از یکدیگر دور شوند. حرکت متضمن سرعت است، پس باید مؤلفهٔ سرعتی وجود داشته باشد که متناظر با مؤلفهٔ جابجایی موج صوتی باشد.

این رفتار را می‌توان در مدل توپ گلف و فنر برای انتشار صوت که پیشتر شرح داده شد مشاهده کرد. به منظور اینکه توپهای گلف به همدیگر نزدیک شوند تا فشردگی به وجود آید، آنها باید سرعتی به سمت هم داشته باشند. این سرعت زمانی که فشردگی یا تراکم به بیشینه مقدار خود می‌رسد صفر خواهد شد، زیرا در این نقطه مولکولها ثابت خواهند بود. بعد از آن توپهای گلف با یک سرعتی شروع به حرکت کرده از هم دور می‌شوند تا به بیشترین حالت انبساط برسند. دوباره در حالتی که بیشترین فاصله را پیدا کردند سرعت به صفر می‌رسد. به دلیل اینرسی مولکولهای درگیر، سرعت به صورت آنی از یک جهت به جهت دیگر تغییر نمی‌کند، در عوض به آرامی از حالت ایستا به حالت متحرک شتاب گرفته و دوباره به آرامی به سکون می‌رسد. مؤلفهٔ سرعت بین تراکم و انبساط به بیشترین حد خود می‌رسد و برای یک مؤلفهٔ جابجایی موج سینوسی مؤلفهٔ سرعت متناظر کسینوسی است.

شکل ۹-۱ انتشار یک موج سینوسی درون مدل توپ گلف و فنر را به همراه طرح مؤلفه-های متناظر نشان می‌دهد. نیروی لازم برای شتاب دادن به مولکولها مؤلفهٔ فشاری موج را شکل می‌دهد. این مؤلفه متناظر با مؤلفهٔ سرعت موج منتشر شونده است و در نتیجه هم فاز با آن است. به این معنی که اگر مؤلفهٔ سرعت کسینوسی است پس مؤلفهٔ فشار نیز کسینوسی خواهد بود. شکل ۹-۱ انتشار یک موج سینوسی درون مدل توپ گلف و فنر را به همراه طرح مؤلفه‌های متناظر نشان می‌دهد. نیروی لازم برای شتاب دادن به مولکولها مؤلفهٔ فشاری موج را شکل می‌دهد. این مؤلفه متناظر با مؤلفهٔ سرعت موج منتشر شونده است و در نتیجه هم فاز با آن است. به این معنی که مؤلفهٔ سرعت کسینوسی است پس مؤلفهٔ فشار نیز کسینوسی خواهد بود. پس یک موج صوتی هم مؤلفهٔ فشار و هم مؤلفهٔ سرعتی دارد که با سرعت یکسان درون محیط حرکت می‌کنند.



شکل۹-۱ مؤلفه‌های فشار، سرعت و جابجایی یک موج سینوسی منتشر شونده در ماده

فشار هوا در همهٔ جهات به طور هم زمان عمل می‌کند لذا برای صوت می‌توان آن را کمّیّتی اسکالر و بدون جهت در نظر گرفت؛ بنابر این می‌توانیم در بارهٔ فشار در یک نقطه حرف بزنیم و نه به عنوان نیرویی که در یک جهت خاص عمل می‌کند. اشیاء از یک مکان به مکان دیگر حرکت می‌کنند لذا سرعت باید جهت داشته باشد. این مؤلفهٔ سرعت است که جهت موج صوتی را مشخص می‌کند.

مؤلفهٔ سرعت و فشار موج صوتی بر اساس چگالی و میزان فنری بودن[1] یا **الاستیسیته** محیط انتشار در ارتباط با یکدیگر هستند. در مقایسه در یک مقدار فشار یکسان، دامنهٔ[2] مؤلفهٔ سرعت در محیط انتشار با چگالی پایین‌تر و فنرهای ضعیف‌تر از دامنهٔ مؤلفهٔ سرعت در محیط انتشار با چگالی بالاتر و فنرهای قوی‌تر، بزرگتر است.

1 - springiness
2 - amplitude

برای یک موج در بعضی از نقاط دور از منبع و مرزهای محیط این رابطه را می‌توان به صورت معادلهٔ ۱۷-۱ بیان کرد:

$$\frac{\text{pressure component amplitude}}{\text{velocity component amplitude}} = \frac{P}{U} = \text{constant} = Z_{acoustic} \qquad (۱۷-۱)$$

که در آن P دامنهٔ مؤلفهٔ فشار

و U دامنهٔ مؤلفهٔ سرعت حجمی[1]

و $Z_{acoustic}$ امپدانس آکوستیکی[2] است.

این مقدار ثابت به نام **"امپدانس آکوستیک"** شناخته می‌شود و شبیه به مقاومت یا امپدانس در مدارات الکتریکی است.

دامنهٔ مؤلفهٔ فشار تابعی از میزان فنری بودن (مدول یانگ) ماده است و مؤلفهٔ سرعت حجمی تابعی از چگالی است. این موضوع به ما اجازه می‌دهد که امپدانس آکوستیک را با استفاده از معیار یانگ و چگالی با معادلهٔ ذیل محاسبه کنیم:

$$Z_{acoustic} = \sqrt{\rho . E}$$

به هر جهت سرعت صوت در محیط یا ماده، که معمولاً با حرف C نمایش داده می‌شود، به معیار یانگ و چگالی بستگی دارد لذا معادلهٔ بالا را اغلب به صورت ذیل بیان می‌کنند:

$$Z_{acoustic} = \sqrt{\rho . E} = \sqrt{\rho^2 \left[\frac{E}{\rho}\right]} = \rho c = 1.21 \times 344 \qquad (\text{الف } ۱۷-۱)$$

$$= 416 \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1} \quad \text{in air at 20 °C}$$

1 - volume velocity component
2 - acoustic impedance

نکته: سرعت حجمی معیار اندازه‌گیری مؤلفهٔ سرعت موج است و بر اساس واحد لیتر بر ثانیه ($m^3.s^{-1}$) اندازه‌گیری می‌شود. واحد امپدانس آکوستیکی رایل بر مترمربع ($rayl.m^{-2}$) است.

توجه داشته باشید که امپدانس آکوستیکی برای موجی در فضای آزاد نیز تنها به خصوصیات محیط انتشار بستگی دارد. در هر صورت اگر موج درون لوله‌ای که ابعادش از طول موج آن کوچکتر است در حال حرکت باشد، آنگاه امپدانس پیش بینی شده توسط معادلهٔ ۱۷-۱ توسط سطح مقطع لوله اصلاح خواهد شد و معادلهٔ ذیل را به دست خواهد داد:

$$Z_{\text{acoustic}} = \frac{\rho c}{S_{tube}} \qquad (۱۷-۱ \text{ ب})$$

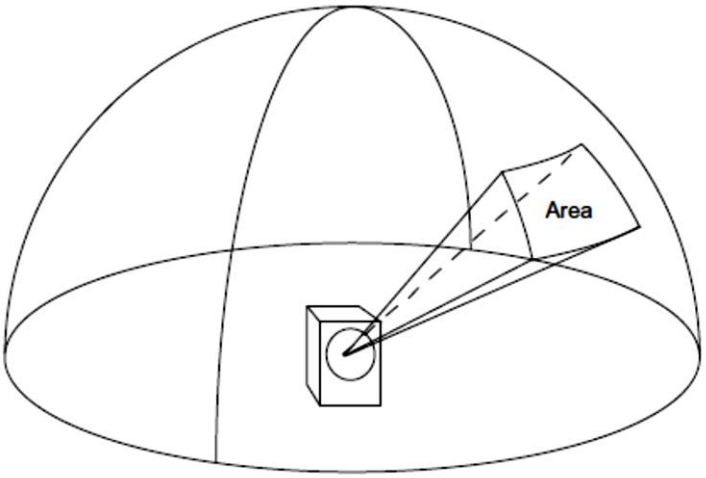
این بدان معنی است که برای موجهای محدود شده، امپدانس به سطح مقطع درون ساختار محدود کننده بستگی دارد و همچنان که سطح مقطع تغییر می‌کند، امپدانس نیز تغییر خواهد کرد. همچنان که بعداً خواهیم دید تغییرات در امپدانس می‌تواند باعث ایجاد بازتابها شود. این اثر در طراحی و کارکرد بسیاری از سازهای موسیقی مهم بوده و در فصل ۴ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱,۲ شدّت صوت، توان و اندازه فشار Sound intensity, power and pressure level

انرژی موج صوتی معیاری از میزان صوت موجود است. در هر صورت به طور کلّی ما بیشتر علاقه‌مند به نرخ انتقال انرژی هستیم تا آنکه بخواهیم میزان کل انرژی انتقال یافته را بدانیم. بنابر این ما بیشتر علاقه‌مند هستیم مقدار انرژی انتقال یافته در واحد زمان را بدانیم، یعنی تعداد ژولها[1] درثانیه (توان بر حسب وات[2]) که منتشر می‌شود.

1 -joules
2 - watt

صوت البته کمّیّتی سه بعدی است و بر این اساس موج صوتی فضا را اِشغال می‌کند. به این دلیل مفید خواهد بود تا نرخ انتقال انرژی نسبت به سطح را مشخص کنیم، یعنی بر حسب وات در واحد سطح آن را بیان کنیم. این کار مقداری را به دست خواهد داد که **"شدّت صوت**[1]**"** نامیده می‌شود و معیاری از چگالی انرژی یک موج صوتی منتشر شونده در یک جهت خاص است، همانگونه که در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۱ شدّت صوت

۱,۲,۱ اندازه[2] شدّت صوت Sound intensity level (SIL)

شدّت صوت جریان انرژی[3] از درون واحد سطح را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر وات در واحد سطح از یک منبع صوتی، و این بدان معنی است که می‌توان آن را با تقسیم بر

1 - sound intensity

۲- مترجم: معادل کلمهٔ level در این متن کلمهٔ **اندازه** قرار داده شده است، برای مثال اندازهٔ شدّت صوتی یا اندازهٔ فشار صوتی. کلماتی مانند power level و field level یا root-power level که در علوم و مهندسی زیاد به کار می‌رود اشاره به اندازه‌هایی لگاریتمی از مقادیری اندازه‌گیری شده نسبت به یک مقدار مبنای استاندارد از همان نوع دارد.

3 - flow of energy

سطح منتشر کننده منبع صوتی به اندازهٔ توان صوتی[1] مرتبط نمود. همانگونه که پیشتر گفته شد، شدّت صوت جهتی دارد که عمود بر سطحی است که انرژی درون آن جریان دارد؛ شکل ۱۰-۱ را ببینید. شدّت صوت یک منبع صوتی واقعی می‌تواند در گستره‌ای بزرگتر از یک ترا (میلیون- میلیون) به یک یا ۱:$۱۰^{۱۲}$ تغییر کند. به این دلیل و نیز به دلیل نحوهٔ ادراکمان از بلندی صدا[2] معمولاً اندازهٔ شدّت صوت با مقیاس لگاریتمی بیان می‌شود. این مقیاس بر اساس نسبت چگالی توان واقعی به یک شدّت معیارِ یک پیکو وات در مترمربع (10^{-12} W.m^{-2}) است. بنابر این اندازه شدّت صوت (SIL) بدین صورت تعریف می‌شود:

$$\mathrm{SIL} = 10 \log_{10} \frac{I_{actual}}{I_{ref}} \qquad (۱-۱۸)$$

که در آن I_{actual} اندازه شدّت توان صوتی واقعی بر حسب وات بر مترمربع W.m^{-2} و I_{ref} اندازه شدّت توان صوتی مبنا بر حسب 10^{-12} وات بر مترمربع W.m^{-2} 10^{-12} است.

ضریب ۱۰ در معادله از آنجا آمده است که، نتیجه را به عددی تبدیل کند که در آن هر تغییر در نتیجه به اندازهٔ یک عدد صحیح، تقریباً معادل با کوچکترین تغییری باشد که با گوش انسان قابل ادراک است. تغییری ۱۰ برابری در نسبت چگالی توان، که آن را بِل[3] می‌نامند، منجر به تغییری برابر با ۱۰ دسیبل در حاصل معادلهٔ ۱۸-۱ خواهد شد.

---

1 - sound power level

2 - loudness of a sound

۳ - مترجم: طبق تعریف نسبت لگاریتم پایهٔ ۱۰ دو مقدار توان را بِل Bel می‌نامند. از آنجا که بل واحد بزرگی است، با افزودن ضریب ۱۰ در جلوی لگاریتم، حاصل بر حسب واحد کوچکتر یعنی دسیبل decibel (dB) خواهد شد. یک بل برابر با ۱۰ دسیبل است. یک دسیبل برابر با لگاریتم نسبت ۱,۲۵۸۹ بین دو توان است. یعنی:

$1\ \mathrm{dB} = 10\mathrm{Log}\ (p_2/p_1) = 10\mathrm{Log}\ (1.2589)$

بنابر این اعداد صحیحِ به دست آمده از معادلهٔ ۱۸-۱ را دسیبل (dB) می‌نامند. یک دسیبل نشان دهندهٔ تغییری در نسبت چگالی توان برابر با (ریشهٔ دهم عدد ۱۰) $\sqrt[10]{10}$ است،که نسبتی برابر با ۱,۲۶ است.

مثال ۶-۱

بلندگویی با قطر مؤثر ۲۵ سانتی‌متر ۲۰ میلی‌وات تشعشع می‌کند. اندازهٔ شدّت صدا در بلندگو چقدر است؟

شدّت صدا برابر با توان در واحد سطح است. اوّل اینکه باید سطح تشعشع کنندهٔ بلندگو را پیدا کنیم که برابر است با:

$$A_{speaker} = \pi r^2 = \pi \times (0.25m/2)^2 = 0.049\ m^2$$

حال می‌توانیم شدّت صدا را به صورت ذیل به دست آوریم:

$$I = \left(\frac{W}{A_{speaker}}\right) = \left(\frac{20 \times 10^{-3} W}{0.049\ m^2}\right) = 0.41\ W.m^{-2}$$

با جایگزینی نتایج در معادلهٔ ۱۸-۱ و برابر قرار دادن مبنا برابر با 10^{-12} وات سطح شدّت صدا بر حسب dB برابر است با:

$$SIL = 10\log_{10}\frac{I_{actual}}{I_{ref.}} = 10\log_{10}\frac{0.41\ wm^{-2}}{10^{-12} wm^{-2}} = 116\ dB$$

۱,۲,۲ اندازهٔ توان صوتی Sound power level

اندازهٔ توان صوتی معیار میزان توان تشعشع شده در تمام جهات توسط منبع صوت است، و اغلب به صورت خلاصه SWL یا گاهی PWL نوشته می‌شود. اندازهٔ توان صوتی نیز با لگاریتم نسبتها بر حسب دسیبل بیان می‌شود و می‌تواند بر اساس نسبت اندازه توان واقعی نسبت به اندازهٔ مرجع یک پیکو وات (10^{-12} W) به صورت ذیل محاسبه گردد:

$$SWL = 10\log_{10}\frac{W_{actual}}{W_{ref}} \qquad (۱-۱۹)$$

که در آن W_{actual} اندازه شدّت توان صوتی واقعی بر حسب وات W
و W_{ref} اندازه شدّت توان صوتی مبنا بر حسب 10^{-12} وات (10^{-12} W) است.

از اندازهٔ توان صوتی برای مقایسهٔ مجموع توان آکوستیکی تشعشع شده توسط اجسام، مانند اجسامی که نویز تولید می‌کنند، استفاده می‌شود و سودمند است. چنانچه در فصل ۶ خواهیم دید مزیت اندازهٔ توان صوتی، وابسته نبودن به زمینهٔ آکوستیکی[۱] است. توجه داشته باشید که بر خلاف شدّت صوت، توان صوتی جهت خاصی ندارد.

۱،۲،۳ اندازهٔ فشار صوتی Sound pressure level (SPL)

شدّت صوت یکی از راههای اندازه‌گیری و توصیف دامنهٔ موج صوتی در یک نقطهٔ خاص است. به هر جهت اگرچه شدّت صوت از نظر تئوری سودمند و قابل اندازه‌گیری است ولی آن کمّیّتی نیست که هنگام توصیف دامنهٔ صوت به صورت معمول از آن استفاده می‌شود. معیارهای دیگر می‌تواند دامنهٔ فشار یا مؤلفهٔ متناظر سرعت موج صوتی باشد. از آنجا که گوشهای انسان به فشار حساس هستند، که در فصل ۲ به تشریح آن خواهیم پرداخت، و از آنجا که اندازه‌گیری فشار ساده‌تر است لذا از فشار به عنوان معیار دامنهٔ موج صوتی استفاده می‌شود. این کار کمّیّتی را به دست می‌دهد که برابر با مقدار مؤثر یا جذر میانگین مربعات[۲] (rms) فشار یک موج صوتی در یک نقطهٔ خاص است و به عنوان **"فشار صوتی[۳]"** شناخته شده است. میزان فشار صوتی ناشی از منابع واقعی صوت می‌تواند از

1 -acoustic context
2 - root mean square
3 - sound pressure