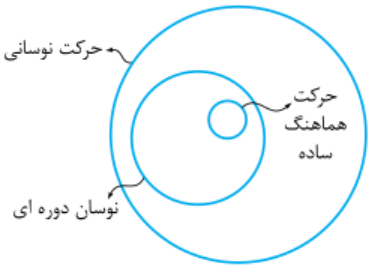
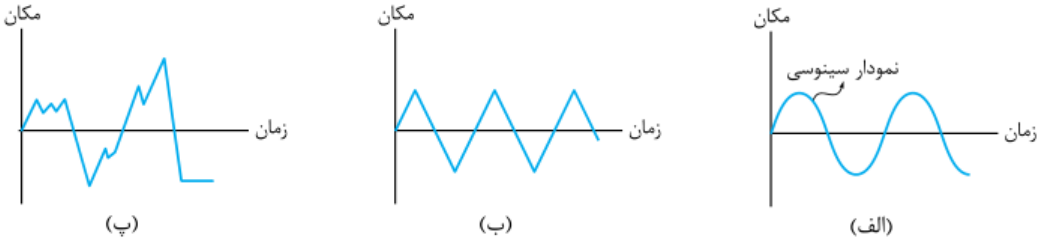
هر حرکت رفت و برگشتی و تکرارشونده را نوسان می‌نامیم. از حرکت مولکول‌های جامدات گرفته تا حرکت زمین به دور خورشید، ضربان قلب، حرکت پیستون در سیلندر اتومبیل و ...، همه و همه حرکت‌های نوسانی هستند. در حرکت‌های نوسانی، چرخه (سیکل) داریم. چرخه‌های یک نوسان می‌توانند یکسان باشند و یا این‌که یکسان نباشند.

اگر چرخهٔ یک نوسان در دوره‌های دیگر تکرار شود، نوسان را دوره‌ای می‌نامیم و اگر در یک حرکت دوره‌ای، مکان جسم برحسب زمان به صورت سینوسی (یا کسینوسی) تغییر کند، حرکت را هماهنگ ساده (SHM) می‌گوییم.



در واقع حرکت هماهنگ ساده نوع خاصی از نوسان دوره‌ای و نوسان دوره‌ای نوع خاصی از حرکت نوسانی است. مثلاً در یک **بازهٔ زمانی مشخص** که نوسان‌های زیر بررسی شده‌اند، نمودار شکل (الف) یک حرکت هماهنگ ساده را نشان می‌دهد؛ زیرا مکان جسم برحسب زمان به صورت سینوسی تغییر کرده است. نمودار شکل (ب) یک نوسان دوره‌ای را نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی یکسان عیناً تکرار شده است و نمودار (پ) یک نوسان غیر دوره‌ای را نشان می‌دهد.



دورهٔ تناوب (T): مدت‌زمان یک چرخه را دورهٔ تناوب می‌نامیم. دورهٔ تناوب را با T نشان می‌دهیم و آن را معمولاً برحسب ثانیه (s) بیان می‌کنیم. در واقع دورهٔ تناوب مدت‌زمانی است که یک حرکت دورانی پس از آن زمان عیناً تکرار می‌شود. در حرکت هماهنگ ساده در زمان یک دورهٔ تناوب، نوسانگر دو بار مسیر نوسان را به طور کامل طی می‌کند.

بسامد (f): به تعداد نوسان‌ها (تعداد چرخه) در واحد زمان بسامد می‌گوییم. بسامد را با f نشان می‌دهیم و یکای آن در SI هرتز (Hz) است. با توجه به تعریف دورهٔ تناوب و بسامد، بین دورهٔ تناوب و بسامد رابطهٔ روبه‌رو وجود دارد:

$$T = \frac{1}{f}$$

نکته به راحتی می‌توانیم بفهمیم که اگر نوسانگری در مدت‌زمان t ثانیه، تعداد n نوسان انجام دهد، بسامد آن از رابطهٔ روبه‌رو به دست می‌آید:

$$f = \frac{n}{t} = \frac{\text{تعداد نوسان}}{\text{زمان}}$$

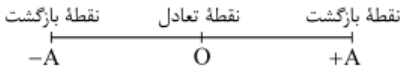
بسامد زاویه‌ای (ω): یکی از مشخصه‌های مهم حرکت هماهنگ ساده، بسامد زاویه‌ای است که آن را با ω نشان می‌دهیم. یکای بسامد زاویه‌ای رادیان بر ثانیه (rad / s) است و رابطهٔ آن با دورهٔ تناوب و بسامد به صورت روبه‌رو است:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

نکته بسامد زاویه‌ای و در نتیجه دورهٔ تناوب یک نوسانگر به **مشخصات فیزیکی** دستگاه نوسان‌کننده بستگی دارد.

نقطهٔ تعادل: به نقطه‌ای که نیروی خالص وارد بر نوسانگر هنگام عبور از آن نقطه صفر می‌شود، نقطهٔ تعادل می‌گوییم. در واقع در این نقطه نوسانگر در حال تعادل است.

دامنهٔ حرکت (A): **بیشترین فاصلهٔ نوسانگر را نسبت به نقطهٔ تعادل، دامنهٔ حرکت می‌نامیم.** در واقع دامنهٔ حرکت، نصف طول مسیر حرکت است.



مکان نوسانگر (x): **به جابه‌جایی نوسانگر نسبت به نقطهٔ تعادل در هر لحظه، مکان نوسانگر می‌گوییم.** واضح است که: $-A \le x \le +A$

نقطهٔ بازگشت: نقاط $x = \pm A$ را که در آن نقاط جهت حرکت نوسانگر (علامت سرعت) تغییر می‌کند، نقاط بازگشت می‌نامیم. **در نقاط بازگشت سرعت لحظه‌ای نوسانگر صفر است.**

رابطهٔ مکان ـ زمان (معادلهٔ حرکت) در حرکت هماهنگ ساده

اگر فرض کنیم که در لحظهٔ $t = ۰$ نوسانگر در بیشترین فاصله از نقطهٔ تعادل باشد، یعنی در لحظهٔ $t = ۰$ متحرک در $x = +A$ باشد، رابطهٔ مکان برحسب زمان نوسانگر را می‌توانیم به شکل زیر بنویسیم:

$$x(t) = A\cos\omega t \xrightarrow{\omega = ۲\pi f} x(t) = A\cos ۲\pi f t \xrightarrow{f = \frac{۱}{T}} x(t) = A\cos\frac{۲\pi}{T}t$$

با استفاده از این رابطه می‌توانیم در زمان‌های مختلف، مکان نوسانگر را تعیین کنیم.

مثال: اگر بیشینهٔ جابه‌جایی نوسانگری نسبت به وضعیت تعادل ۱۰ cm باشد و با دورهٔ تناوب ۰/۵ s حرکت هماهنگ ساده کند:

الف) رابطهٔ مکان ـ زمان نوسانگر را بنویسید.

ب) در لحظهٔ $t = \frac{۱}{۱۲}$ s مکان جسم را نسبت به وضع تعادل به دست آورید.

می‌خواهیم نمودار مکان ـ زمان حرکت هماهنگ ساده را در یک دورهٔ تناوب رسم کنیم. برای این کار باید در لحظات ۰، $\frac{T}{۴}$، $\frac{T}{۲}$، $\frac{۳T}{۴}$ و T مکان نوسانگر را برحسب دامنه به دست آوریم و سپس نمودار را رسم کنیم.

ابتدا زمان‌های داده‌شده را در رابطهٔ مکان ـ زمان به جای t قرار می‌دهیم:

$t = ۰ \Rightarrow$

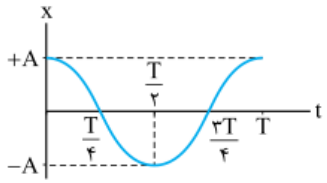
$t = \frac{T}{۴} \Rightarrow$

$t = \frac{T}{۲} \Rightarrow$

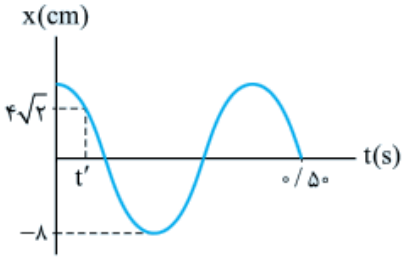
$t = \frac{۳T}{۴} \Rightarrow$

$t = T \Rightarrow$

حالا با استفاده از مقادیر به دست آمده، نمودار مکان ـ زمان نوسانگر را به شکل روبه‌رو رسم می‌کنیم. توجه کنید که این نمودار، یک نمودار کسینوسی است.



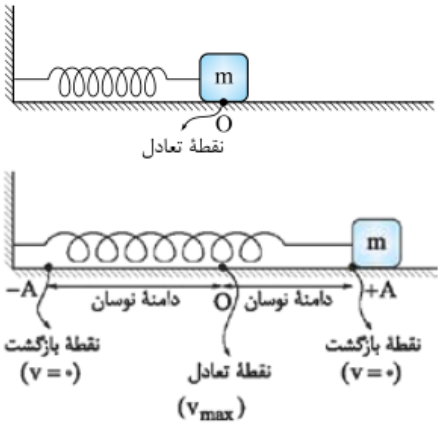
مثال **نمودار مکان ـ زمان نوسانگری مطابق شکل روبه‌رو است:**



الف) رابطهٔ مکان ـ زمان نوسانگر را بنویسید.

ب) زمان t' را به دست آورید.

یک مثال مشهور از حرکت هماهنگ ساده، نوسان دستگاه جرم ـ فنر است. اگر روی یک سطح افقی بدون اصطکاک جرمی را به انتهای فنری که به دیوار متصل است، ببندیم و آن را اندکی از وضع تعادل (وضعیتی که فنر کشیده یا فشرده نشده است) جابه‌جا کرده و سپس رها کنیم، حرکت دستگاه جرم ـ فنر حرکت هماهنگ ساده خواهد بود.



بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب دستگاه جرم ـ فنر

بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب نوسانگر به مشخصات فیزیکی نوسانگر بستگی دارد. در مورد دستگاه جرم ـ فنر، بسامد زاویه‌ای به **جرم وزنه** و **ثابت فنر** بستگی دارد و مستقل از **دامنهٔ نوسان** است. بسامد زاویه‌ای برای وزنه‌ای به جرم m که به فنری با ثابت k متصل است، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

و در مورد دورهٔ تناوب می‌توانیم بنویسیم:

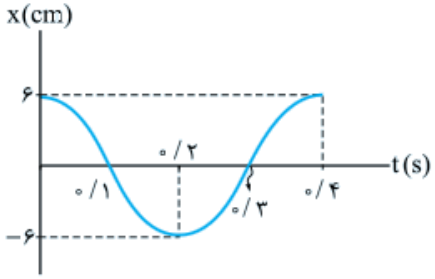
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

رابطهٔ فوق به این معنا است که هر چه جرم وزنه بیشتر و ثابت فنر کم‌تر باشد، دورهٔ تناوب افزایش می‌یابد و نوسان کندتر می‌شود.

مثال **وزنه‌ای به جرم $400\ g$ را به انتهای فنری با ثابت $1000\ N/m$ بسته و آن را روی سطح افقی بدون اصطکاک به اندازهٔ $5\ cm$ از وضع تعادل خارج کرده و سپس رها می‌کنیم. $(\pi = 3/14)$**

الف) دورهٔ تناوب نوسان دستگاه را محاسبه کنید.

ب) رابطهٔ مکان ـ زمان را برای این دستگاه بنویسید.



مثال نمودار مکان ـ زمان نوسانگری در سامانهٔ جرم و فنر، به صورت روبه‌رو است. اگر ثابت فنر برابر $۱۰۰\ N/m$ باشد:

الف) جرم نوسانگر چند کیلوگرم است؟

ب) اندازهٔ شتاب این نوسانگر در $t = ۰/۱۵\ s$ چند متر بر مجذور ثانیه است؟ $(\pi^۲ = ۱۰)$

انرژی در دستگاه جرم ـ فنر

۱ـ انرژی پتانسیل

در دستگاه جرم ـ فنر با جابه‌جایی جسم و تغییر طول فنر، انرژی پتانسیل کشسانی در دستگاه ذخیره می‌شود. هر چه فاصلهٔ جسم از نقطهٔ تعادل بیشتر باشد، انرژی پتانسیل سامانه بیشتر می‌شود. مقدار انرژی پتانسیل مجموعهٔ جرم ـ فنر به طور کامل به مشخصات فنر وابسته است و به ویژگی‌های جسم بستگی ندارد.

۲ـ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی سامانهٔ جرم ـ فنر به مشخصات جسم متصل به فنر بستگی دارد و از رابطهٔ آشنای روبه‌رو به دست می‌آید: $K = \frac{۱}{۲}mv^۲$

بنابراین رابطهٔ انرژی جنبشی دستگاه در حالتی که وزنه در نقاط بازگشت قرار دارد، صفر و در حالتی که وزنه در نقطهٔ تعادل قرار دارد، بیشینه است.

۳ـ انرژی مکانیکی

انرژی مکانیکی سامانه با مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل دستگاه در هر نقطه از مسیر برابر است و از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$E = U + K = \frac{۱}{۲}kA^۲$$

چون سطح، بدون اصطکاک فرض می‌شود، اتلاف انرژی نداریم و انرژی مکانیکی سامانه همواره ثابت است؛ یعنی اگر انرژی مکانیکی دستگاه را در یک نقطه از مسیر به دست آوریم، انرژی مکانیکی در سایر نقاط نیز همان مقدار است.

رابطهٔ بالا نشان می‌دهد **انرژی مکانیکی دستگاه جرم ـ فنر به زمان و مکان جسم بستگی ندارد و فقط تابع ثابت فنر و دامنهٔ نوسان است.**

نکته مهم دیدیم که از رابطهٔ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ داریم $k = m\omega^۲$؛ بنابراین انرژی مکانیکی دستگاه جرم ـ فنر را می‌توانیم به صورت زیر نیز بنویسیم:

$$E = \frac{۱}{۲}kA^۲ \Rightarrow E = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲ \xrightarrow{\omega = ۲\pi f} E = ۲\pi^۲mA^۲f^۲$$

هر چند رابطهٔ بالا را برای دستگاه جرم ـ فنر به دست آوردیم، اما می‌توانیم نشان دهیم که برای همهٔ دستگاه‌هایی که حرکت هماهنگ ساده انجام می‌دهد، درست است؛ یعنی:

در حرکت هماهنگ ساده، انرژی مکانیکی با مجذور دامنه و مجذور بسامد متناسب است.

مثال **وقتی انرژی جنبشی و پتانسیل دستگاه جرم ـ فنر برابرند، تندی نوسانگر را برحسب دامنه و بسامد نوسانگر به دست آورید.**

بیشینهٔ تندی در حرکت هماهنگ ساده

می‌توانیم ثابت کنیم که بیشینهٔ تندی در حرکت هماهنگ ساده از رابطهٔ $v_{max} = A\omega$ به دست می‌آید. وقتی نوسانگر از نقطهٔ تعادل می‌گذرد، همهٔ انرژی مکانیکی آن از نوع جنبشی است؛ زیرا در این حالت فنر طول عادی خود را دارد $(x = 0)$ ولی تندی بیشینه است؛ بنابراین برای نقطهٔ تعادل می‌توانیم بنویسیم:

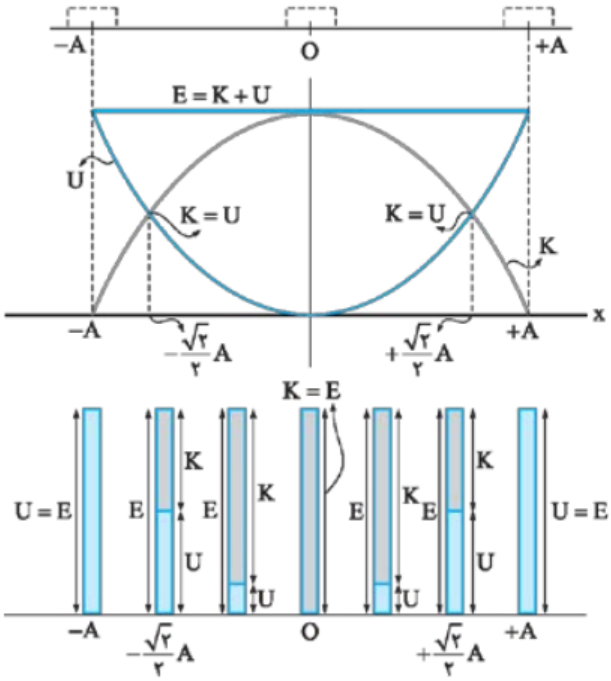
$$K = E \Rightarrow \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}kA^2 \xrightarrow{k=m\omega^2} \frac{1}{2}m v_{max}^2 = \frac{1}{2}m\omega^2A^2$$

$$\Rightarrow v_{max}^2 = \omega^2A^2 \Rightarrow \boxed{v_{max} = A\omega}$$

نمودار تغییرات انرژی در دستگاه جرم ـ فنر

دیدیم که در دستگاه جرم ـ فنر دائماً انرژی پتانسیل کشسانی و انرژی جنبشی به یکدیگر تبدیل می‌شوند، اما مجموع این دو انرژی یعنی انرژی مکانیکی همواره مقدار ثابتی دارد. در نقاط بازگشت $(x = \pm A)$ همهٔ انرژی مکانیکی از نوع پتانسیل و در نقطهٔ تعادل $(x = 0)$ همهٔ انرژی مکانیکی از نوع جنبشی است.

نمودارهای روبه‌رو نحوهٔ تغییر انرژی‌های پتانسیل و جنبشی در حین نوسان دستگاه جرم ـ فنر را به خوبی نشان می‌دهد.

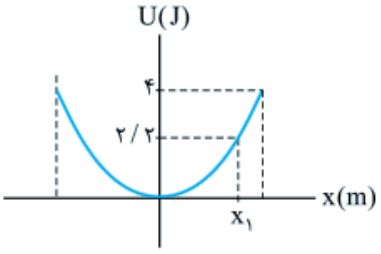


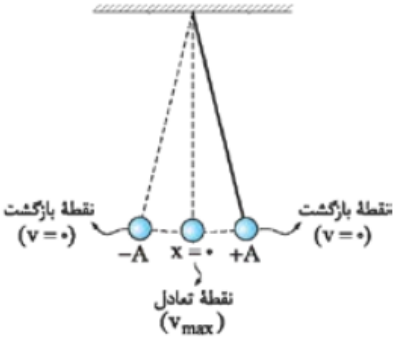
نکته می‌توانیم نشان دهیم در نقاط $x = \pm\frac{\sqrt{2}}{2}A$ انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل دستگاه جرم و فنر با هم برابرند.

مثال **نمودار انرژی پتانسیل برحسب مکان یک دستگاه جرم ـ فنر مطابق شکل است. اگر ثابت فنر ۲۰۰ N/m و جرم نوسانگر ۱۰۰ g باشد:**

الف) دامنهٔ نوسان را به دست آورید.

ب) تندی نوسانگر در مکان x_1 را محاسبه کنید.





آونگ ساده

آونگ ساده از وزنه‌ای به جرم m که از نخ بدون جرمی به طول ثابت L آویزان است، تشکیل می‌شود.

می‌توانیم نشان دهیم اگر آونگ را با **زاویه‌ای بسیار کوچک** از وضع تعادل منحرف کرده و سپس رها کنیم، وزنهٔ آونگ، حرکت هماهنگ ساده انجام می‌دهد.

بنابراین هر آن‌چه در مورد نوسان دستگاه جرم ـ فنر گفتیم، در مورد آونگ ساده نیز صدق می‌کند.

بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب آونگ ساده

در مورد آونگ ساده، بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب به **طول آونگ** و **شتاب گرانشی** در محلی که آونگ نوسان می‌کند، بستگی دارند و از رابطه‌های روبه‌رو به دست می‌آیند:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

رابطهٔ بالا نشان می‌دهد که **بسامد زاویه‌ای و دورهٔ تناوب نوسان آونگ ساده، به جرم وزنه و دامنهٔ نوسان بستگی ندارد.**

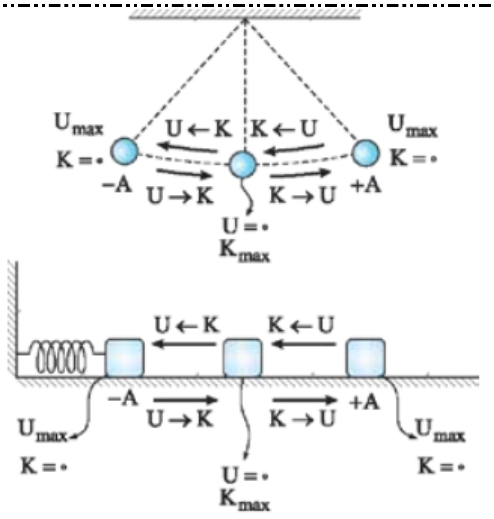
نکته با توجه به این‌که دورهٔ تناوب آونگ ساده به شتاب گرانشی بستگی دارد، می‌توانیم از یک آونگ ساده برای محاسبهٔ دقیق g استفاده کنیم.

مثال **آونگی به طول 56 cm را به نوسان درمی‌آوریم. اگر در مدت 60 s، آونگ 40 نوسان کامل انجام دهد، مقدار g را محاسبه کنید.**

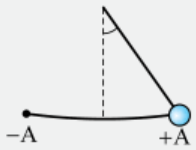
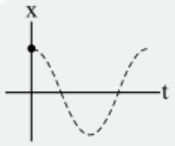
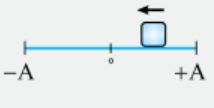
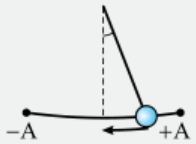
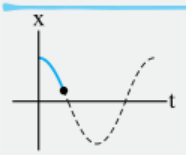
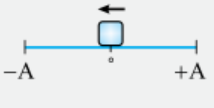
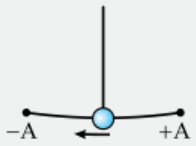
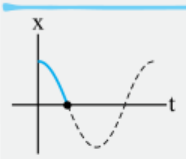
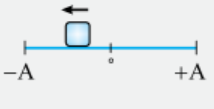
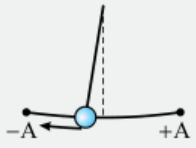
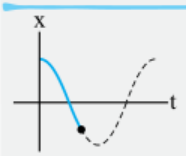
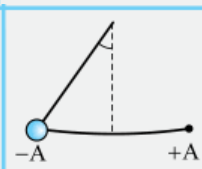
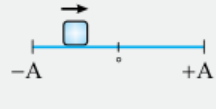
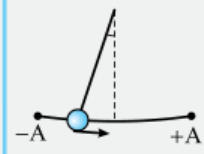
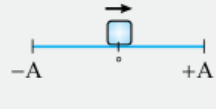
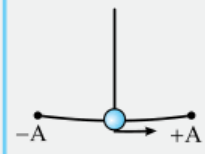
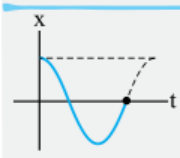
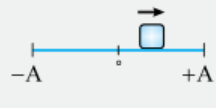
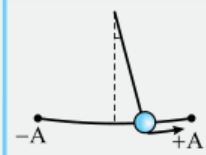
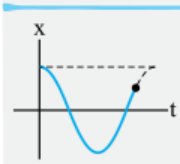
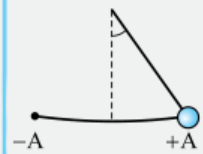
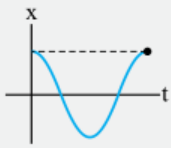
انرژی در نوسان آونگ ساده

در آونگ ساده نیز در نقاط بازگشت، سرعت و انرژی جنبشی صفر است اما انرژی پتانسیل بیشینه است. در نقطهٔ تعادل، سرعت و انرژی جنبشی بیشینه و در نتیجه انرژی پتانسیل صفر است. در صورتی که از اثر مقاومت هوا چشم‌پوشی کنیم، در طی نوسان انرژی مکانیکی همواره ثابت می‌ماند و دائماً انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود.

انرژی مکانیکی که با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل برابر است، در آونگ ساده نیز همچون دستگاه جرم ـ فنر با مجذور دامنه و مجذور بسامد متناسب است. شکل مقابل تشابه تبدیلات انرژی در آونگ ساده و دستگاه جرم ـ فنر را نشان می‌دهد.



بررسی حرکت هماهنگ ساده در یک دورهٔ تناوب با فرض $x_0 = +A$

وضعیت نوسانگر: جرم ـ فنر	وضعیت نوسانگر: آونگ ساده	مکان	زمان	سرعت	انرژی جنبشی	انرژی پتانسیل	نمودار مکان ـ زمان
		$x = +A$	$t = 0$	صفر	صفر	بیشینه $(\frac{1}{2}kA^2)$	
		$0 < x < +A$	$0 < t < \frac{T}{4}$	منفی	در حال افزایش	در حال کاهش	
		$x = 0$	$t = \frac{T}{4}$	منفی و بیشینه $v_{max} = -A\omega$	بیشینه $(\frac{1}{2}kA^2)$	صفر	
		$-A < x < 0$	$\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$	منفی	در حال کاهش	در حال افزایش	
		$x = -A$	$t = \frac{T}{2}$	صفر	صفر	بیشینه $(\frac{1}{2}kA^2)$	
		$-A < x < 0$	$\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$	مثبت	در حال افزایش	در حال کاهش	
		$x = 0$	$t = \frac{3T}{4}$	مثبت و بیشینه $v_{max} = +A\omega$	بیشینه $(\frac{1}{2}kA^2)$	صفر	
		$0 < x < +A$	$\frac{3T}{4} < t < T$	مثبت	در حال کاهش	در حال افزایش	
		$x = +A$	$t = T$	صفر	صفر	بیشینه $(\frac{1}{2}kA^2)$	

بسامد طبیعی

فرض کنید یک نوسانگر را از حالت تعادل خارج کنیم و سپس آن را به حال خودش رها کنیم تا آزادانه نوسان کند. همان‌طور که خواندید، این نوسانگر با یک بسامد خاص که به دامنهٔ نوسان وابسته نیست، شروع به نوسان می‌کند. به این بسامد خاص که فقط به ویژگی‌های ساختاری نوسانگر وابسته است، **بسامد طبیعی** نوسانگر می‌گوییم و آن را با f_0 نشان می‌دهیم.

نمونه بسامد طبیعی سامانهٔ جرم ـ فنر برابر $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ و بسامد طبیعی آونگ ساده برابر $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$ است.

مثال **بسامد طبیعی سامانهٔ جرم ـ فنری را که جرم نوسانگر آن $25\ g$ و ثابت فنر آن $22/5\ N/m$ است، به دست آورید.**

نوسان واداشته

شاید این سؤال برایتان ایجاد شده باشد که آیا نوسانگرها فقط با بسامد طبیعی خودشان نوسان می‌کنند؟ پاسخ این سؤال «خیر» است ولی این موضوع یک شرط دارد و آن شرط این است که دیگر نوسانگر را به حال خودش رها نکنیم و به طور دوره‌ای به آن نیرو وارد کنیم. اگر این کار را انجام دهیم، نوسانگر ما می‌تواند با بسامدی به غیر از بسامد طبیعی هم نوسان کند. به نوسان‌هایی که به خاطر اعمال نیروی خارجی رخ می‌دهد، **نوسان‌های واداشته** می‌گوییم و بسامد آن‌ها را با f_d نشان می‌دهیم.

تذکر در نوسان‌های واداشته f_d می‌تواند با f_0 برابر باشد و یا این‌که با آن برابر نباشد.

نوسان واداشته

شاید این سؤال برایتان ایجاد شده باشد که آیا نوسانگرها فقط با بسامد طبیعی خودشان نوسان می‌کنند؟ پاسخ این سؤال «خیر» است ولی این موضوع یک شرط دارد و آن شرط این است که دیگر نوسانگر را به حال خودش رها نکنیم و به طور دوره‌ای به آن نیرو وارد کنیم. اگر این کار را انجام دهیم، نوسانگر ما می‌تواند با بسامدی به غیر از بسامد طبیعی هم نوسان کند. به نوسان‌هایی که به خاطر اعمال نیروی خارجی رخ می‌دهد، **نوسان‌های واداشته** می‌گوییم و بسامد آن‌ها را با f_d نشان می‌دهیم.

تذکر در نوسان‌های واداشته f_d می‌تواند با f_0 برابر باشد و یا این‌که با آن برابر نباشد.

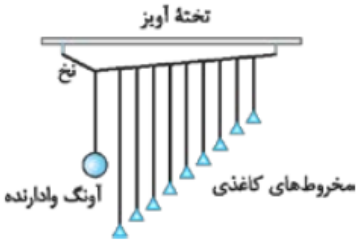
پدیدهٔ تشدید، یک نوسان واداشتهٔ جذاب!

اگر در یک نوسان واداشته بسامد نوسان واداشته (f_d) برابر با بسامد طبیعی سامانه (f_0) شود، دامنهٔ نوسان بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم، برای نوسانگر **تشدید** یا **رزونانس** رخ داده است.

نکته اگر به یک نوسانگر با بسامدهایی بیشتر یا کم‌تر از بسامد طبیعی‌اش نیرو وارد کنیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که بسامد نیروی واردشده به نوسانگر برابر با بسامد طبیعی آن است.

نمونه فروریختن پل تاکوما نروز که در شهر واشنگتن واقع بود، در اثر تشدید رخ داد. در ۷ نوامبر ۱۹۴۰، بادی با سرعت $67\ km/h$ و با بسامد $0/6\ Hz$ شروع به وزیدن کرد. به علت نزدیک‌بودن بسامد این باد، با بسامد طبیعی نوسان پل، در حدود ۱۰ صبح این پل فرو ریخت.

آونگ‌های بارتون



آونگ‌های بارتون به آونگ‌هایی مشابه آونگ‌های شکل روبه‌رو می‌گویند که یکی از روش‌های مشاهدهٔ پدیدهٔ تشدید است. این آونگ‌ها شامل یک آونگ سنگین و چند آونگ سبک است. نوسان آونگ سنگین که به آن **آونگ وادارنده** می‌گوییم، باعث تاب‌خوردن نخ بالایی می‌شود و سایر آونگ‌ها را به نوسان درمی‌آورد.

دامنهٔ نوسان همهٔ آونگ‌های سبک به‌جز آن‌که طول یکسانی با آونگ وادارنده دارد، کوچک است. در حالی که دامنهٔ نوسان آونگی که طول آن با طول آونگ وادارنده یکسان است، به علت تشدید، بزرگ می‌شود.

مثال **در مجموعهٔ آونگ‌های بارتون، آونگی به طول ۱۰ cm بیشترین دامنهٔ نوسان را داشته است. بسامد زاویه‌ای نوسان‌های آزاد آونگ وادارنده، چند رادیان بر ثانیه است؟ ($g = ۱۰\ m/s^۲$)**

موج چیست؟

اگر در نقطه‌ای از یک محیط ارتعاشی ایجاد شود، با گذشت زمان این ارتعاش به نقاط دیگر محیط منتقل می‌شود و موج به وجود می‌آید. مثلاً وقتی سنگی را درون یک برکهٔ آرام آب می‌اندازیم، دایره‌ای بر روی سطح آب ایجاد می‌شود که این دایره به تدریج از محل برخورد سنگ دور شده و در سطح برکه منتشر می‌شود؛ پس سقوط سنگ در آب، موجب ایجاد یک موج شده است.

موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی

موج‌ها از نظر محیط انتشار به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) موج‌های مکانیکی: امواج مکانیکی موج‌هایی هستند که برای انتشار به یک محیط مادی نیاز دارند. منظور از محیط مادی محیطی است که در آن، مولکول‌ها و اتم‌های مواد مختلف اعم از جامد، مایع و یا گاز وجود داشته باشند.

نمونه موارد زیر مثال‌هایی از امواج مکانیکی هستند:

۱) امواج لرزه‌ای زمین‌لرزه که در واقع انتقال ارتعاش‌های لایه‌های زیرین زمین به سطح زمین است، نمونه‌ای از انتقال موج مکانیکی در محیط جامد است. در این‌جا، محیط جامد، پوستهٔ زمین است.

۲) موجی که در اثر پرتاب سنگ به داخل آب روی سطح آب ایجاد می‌شود، مثالی آشنا برای انتقال موج مکانیکی در محیط مایع است.

۳) برای انتشار موج مکانیکی در محیط گازی هم می‌توانیم از موج صوتی‌ای نام ببریم که در هوا منتشر می‌شود.

در تمام مثال‌های امواج مکانیکی چون نواحی مختلف محیط به هم پیوسته هستند، ارتعاش ذرات محیط به یکدیگر منتقل می‌شود.

ب) موج‌های الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی موج‌هایی هستند که برای انتشار به محیط مادی نیازی ندارند. نور، امواج رادیویی و تلویزیونی و پرتوهای ایکس، مثال‌هایی از امواج الکترومغناطیسی هستند. در امواج الکترومغناطیسی به جای نوسان ذرات محیط، نوسان‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی از ناحیه‌ای از فضا به ناحیه‌ای دیگر منتقل می‌شود.

مثال **آزمایشی طرح کنید که نشان دهد امواج مکانیکی به محیط مادی نیاز دارند، در حالی که امواج الکترومغناطیسی برای انتشار نیاز به ماده ندارند.**

امواج پیش‌رونده

دیدیم که اگر در یک نقطه از محیط، نوسانی ایجاد کنیم، این نوسان در محیط منتشر می‌شود. نوسان یا آشفتگی که در محیط منتقل می‌شود را **تپ** می‌نامیم؛ پس موج در واقع انتشار این تپ در محیط است. چنین موج‌هایی را که از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر حرکت می‌کنند «**موج‌های پیش‌رونده**» می‌نامیم.

تذکر دقت کنید که هنگام انتشار موج پیش‌رونده این موج است که در محیط منتقل می‌شود، نه ماده و ذرات سازندهٔ آن.

در واقع در هنگام انتشار موج، هر ذره از محیط فقط حول وضع تعادل خود، یک حرکت نوسانی انجام می‌دهد. درست مانند موج مکزیکی که هر تماشاگر در جای خود می‌ایستد و سپس می‌نشیند اما موج ایجادشده در استادیوم دور می‌زند بدون این‌که تماشاگری با موج حرکت کند!!!

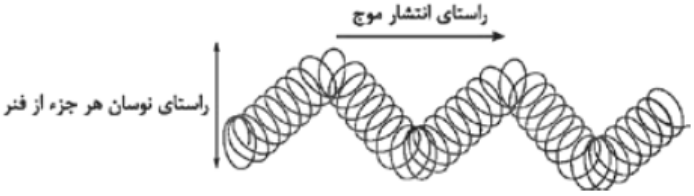
امواج عرضی و طولی

در تشکیل هر موج با دو حرکت سروکار داریم: ۱ **حرکت نوسانی ذرات محیط** ۲ **حرکت تپ یا موج ایجادشده در محیط**

براساس چگونگی راستای این دو حرکت نسبت به هم، امواج پیش‌رونده به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) امواج عرضی: اگر راستای نوسان ذرات محیط بر راستای حرکت موج عمود باشد، موج را موج عرضی می‌نامیم.

نمونه مطابق شکل زیر یک فنر بسیار بلند کشیده‌شده را در نظر بگیرید. چنین فنری را **فنر اسلینکی** می‌نامیم. حالا اگر یک سر فنر را دائماً به بالا و پایین حرکت دهیم، در فنر تپ‌هایی ایجاد می‌شود که در آن به صورت برآمدگی (قله) و فرورفتگی (دره) در راستای فنر منتشر می‌شود. در این موج هر نقطه از فنر در جای خود در راستای قائم بالا و پایین می‌رود، اما موج در راستای افقی منتشر می‌شود.

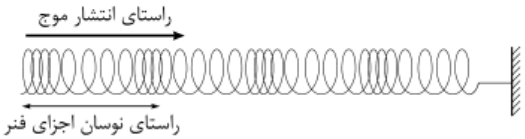


موج ثانویه در امواج لرزه‌ای، موج ایجادشده بر سطح آب و **امواج الکترومغناطیسی**، نمونه‌های دیگری از امواج عرضی هستند.

تذکر به برآمدگی یا قله، ستیغ و به فرورفتگی یا دره، پاستیغ نیز گفته می‌شود.

ب) امواج طولی: اگر جابه‌جایی و نوسان ذرات محیط در راستای انتشار موج باشد، موج را طولی می‌نامیم.

نمونه در مثال فنر اسلینکی اگر به جای آن‌که فنر را بالا و پایین ببریم، به صورت هماهنگ ساده به سمت جلو و عقب حرکت دهیم، تپ‌هایی در فنر به صورت جمع‌شدگی (تراکم) و بازشدگی (انبساط) در راستای فنر منتشر می‌شود. در این مثال هر جزء از فنر در راستای فنر (راستای افقی) عقب و جلو می‌رود و موج نیز در همین راستا منتشر می‌گردد.

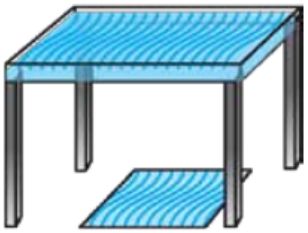


موج صوتی و **موج اولیه در امواج لرزه‌ای** از جمله امواج طولی هستند.

مثال **چگونه می‌توانیم بفهمیم امواجی که بر سطح آب در اثر ضربات متوالی یک گوی به وجود می‌آید، عرضی است؟**

پاسخ مطابق شکل روبه‌رو روی سطح آب یک یا چند جسم سبک مانند چوب‌پنبه می‌گذاریم؛ سپس به آرامی و به طور پی‌درپی به وسیلهٔ یک گوی بر سطح آب ضربه می‌زنیم تا تپ‌هایی ایجاد شود. با این کار می‌بینید که موج به صورت برآمدگی و فرورفتگی‌هایی دایره‌ای‌شکل روی سطح آب و به طور افقی منتشر می‌شود. وقتی موج به چوب‌پنبه‌ها می‌رسد، چوب‌پنبه‌ها در جای خودشان بالا و پایین می‌شوند، بدون این‌که در راستای افقی حرکت کنند. این نشان می‌دهد که ذرات محیط در راستای عمودی نوسان می‌کنند ولی موج در راستای افقی منتشر می‌شود؛ پس موج عرضی است.

تشت موج



برای مطالعهٔ رفتار امواج از وسیله‌ای به نام «تشت موج» استفاده می‌کنیم. تشت موج یک ظرف شیشه‌ای کم‌عمق با دیواره‌هایی شیب‌دار است. اگر توسط یک لامپ، سایه‌ای از آب داخل تشت بر روی کاغذی که زیر تشت است، تشکیل دهیم و توسط یک چشمهٔ موج در آب درون تشت، موج ایجاد کنیم، به راحتی می‌توانیم برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج را از روی سایهٔ آب بر روی کاغذ مشاهده کنیم.

مثال **چرا دیواره‌های تشت موج، باید شیب‌دار باشد؟**

پاسخ وقتی در تشت موج، موجی ایجاد می‌کنیم، این موج پس از برخورد با دیواره‌ها بازمی‌تابد و موج بازتابیده از دیواره‌ها با موج فرودی تداخل می‌کند و کار بررسی رفتار موج دچار مشکل می‌شود. به این دلیل با شیب‌دار ساختن کناره‌های تشت موج می‌توانیم امواج بازتابیده را حذف کنیم.

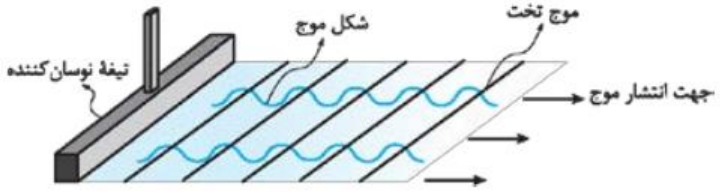
مشخصه‌های موج

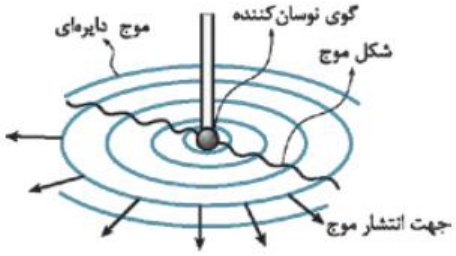
برای ایجاد یک موج، دو چیز لازم داریم:

۱- چشمهٔ موج: به شخص یا وسیلهٔ نوسانگری که با نوسان‌های خود، موج را ایجاد می‌کند، چشمهٔ موج می‌گوییم.

۲- محیط انتشار موج: محیطی که نوسان‌های ایجادشده توسط چشمهٔ موج در آن منتشر می‌شود، محیط انتشار می‌نامیم.

به عنوان نمونه در مثال ایجاد موج در فنر اسلینکی (فنر بلند و کشیده) دست ما چشمهٔ موج و فنر، محیط انتشار موج است و یا در مثال تشت موج، آب داخل تشت، محیط انتشار موج است و می‌توانیم از یک تیغه یا یک گوی کوچک به عنوان چشمهٔ موج استفاده کنیم. البته اگر چشمهٔ موج، تیغهٔ نوسان‌کننده بر سطح آب باشد، موج تخت ایجاد می‌شود، اما اگر چشمهٔ موج یک گوی نوسان‌کننده باشد، موج دایره‌ای تشکیل می‌گردد.





هر موج با مشخصه‌های مربوط به خود بررسی می‌شود. مشخصه‌های موج عبارت‌اند از:

۱- دورهٔ تناوب موج (T): **مدت‌زمانی را که هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد، دورهٔ تناوب موج می‌نامیم.** دورهٔ تناوب موج با دورهٔ تناوب چشمهٔ موج **برابر** است.

۲- بسامد موج (f): **تعداد نوسان‌های انجام‌شدهٔ هر ذره از محیط در یک ثانیه را بسامد موج می‌نامیم.** بدیهی است که بسامد موج با بسامد چشمهٔ موج **یکسان** است و بین دورهٔ تناوب و بسامد موج، رابطهٔ روبه‌رو برقرار است.

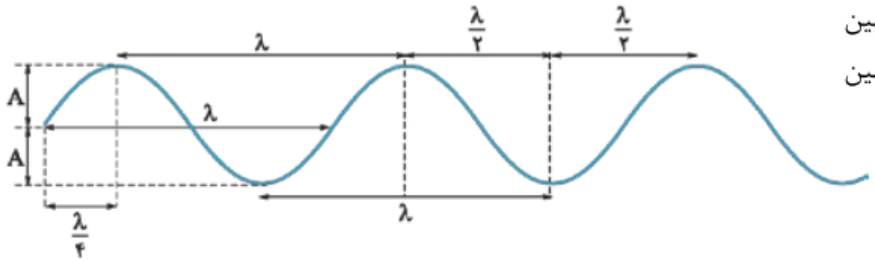
$$f = \frac{1}{T}$$

۳- دامنهٔ موج (A): **بیشترین جابه‌جایی یک ذره از مکان تعادلش را دامنهٔ موج می‌نامیم.** مثلاً در مثال موج سطحی در تشت موج، دامنه همان فاصلهٔ قله‌ها و دره‌ها نسبت به حالتی است که آب آرام و ساکن است.

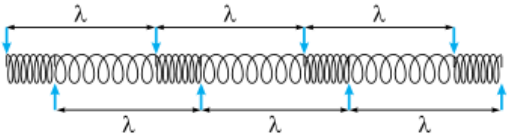
۴- تندی انتشار موج (v): اگر یک قله (برآمدگی) یا دره (فرورفتگی) موج در مدت‌زمان Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v = \frac{L}{\Delta t}$ به دست می‌آید.

۵- طول‌موج (λ): **به مسافتی که موج در یک دورهٔ تناوب طی می‌کند، طول موج می‌گوییم.**

نکته واضح است که در محیط انتشار موج، فاصلهٔ بین دو قله یا دو درهٔ متوالی با طول موج برابر است. هم‌چنین فاصلهٔ یک قله از درهٔ مجاورش نصف طول موج است.



نکته در امواج طولی فاصلهٔ بین دو تراکم یا دو انبساط متوالی برابر با طول موج است.



و اما نکتهٔ آخر که خیلی هم مهم است!

از مشخصه‌های ذکرشده برای موج، **دورهٔ تناوب**، **بسامد** و **دامنهٔ موج** صرفاً به مشخصات **چشمهٔ موج** وابسته‌اند. **سرعت انتشار موج**، فقط به **جنس و ویژگی‌های فیزیکی محیط انتشار موج** بستگی دارد و در نهایت **طول موج** هم به **مشخصات چشمهٔ موج** و هم به **ویژگی‌های محیط انتشار موج** وابسته است.

رابطهٔ تندی انتشار موج با دوره و بسامد

اگر سرعت انتشار موج در یک محیط v باشد، در مدت یک دورهٔ تناوب (T) به اندازهٔ یک طول موج (λ) مسافت طی می‌کند؛ بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$v = \frac{L}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow v = \lambda f$$

مثال **در آزمایش تشت موج، فاصلهٔ بین یک برآمدگی (قله) از فرورفتگی (دره) مجاورش ۰/۵۰ سانتی‌متر است. اگر چشمهٔ موج، یک گوی نوسانگر با بسامد ۲۰۰ Hz باشد:**

الف) طول موج ایجادشده چند سانتی‌متر است؟

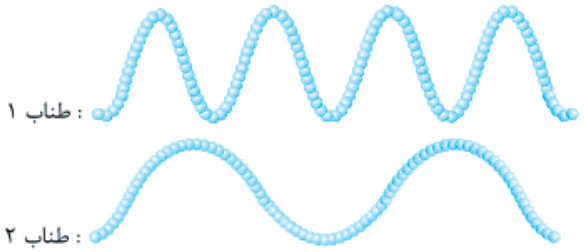
ب) تندی انتشار موج در این تشت، چند m/s است؟

پ) اگر مقداری آب به تشت اضافه کنیم، تا عمق آب درون تشت بیشتر شود، کدام‌یک از مشخصه‌های زیر تغییر می‌کند؟

۱- دورهٔ تناوب موج ۲- دامنهٔ موج ۳- سرعت انتشار موج ۴- طول موج

با افزایش عمق تشت، یکی از ویژگی‌های فیزیکی محیط انتشار موج تغییر می‌کند. در حالی که تغییر، در چشمهٔ موج رخ نداده است؛ بنابراین دورهٔ تناوب و دامنه که به مشخصات چشمهٔ موج وابسته‌اند، ثابت می‌مانند. اما تندی انتشار امواج سطحی که به مشخصات محیط انتشار بستگی دارد، تغییر می‌کند. آزمایش نشان می‌دهد، **در آب‌های کم‌عمق، با افزایش‌یافتن عمق آب، سرعت انتشار امواج بر سطح آب افزایش می‌یابد.** از طرفی با ثابت‌ماندن دورهٔ تناوب و افزایش تندی انتشار موج، طبق رابطهٔ $\lambda = vT$، طول موج نیز افزایش پیدا می‌کند.

مثال **در دو طناب کاملاً مشابه، دو موج عرضی ایجاد کرده‌ایم. دامنه، بسامد، دورهٔ تناوب و طول موج امواج ایجادشده در دو طناب را مقایسه کنید.**



نکته به طور کلی اگر تندی انتشار دو موج یکسان باشد، هر چه در فاصلهٔ معینی از محیط انتشار موج، تعداد قله‌ها و دره‌ها بیشتر باشد (طول موج کم‌تر باشد)، بسامد موج بیشتر و دورهٔ تناوب آن کم‌تر است.

نقش موج عرضی

اگر یک چشمهٔ موج، یک سر طناب افقی کشیده‌شده را به صورت سینوسی به سمت بالا و پایین به نوسان درآورد، موج عرضی پیوسته‌ای در طناب ایجاد می‌شود که می‌توانیم آن را با موج سینوسی مدل‌سازی کنیم.

اگر در یک لحظه از موج در حال انتشار عکس بگیریم، تصویری مشابه شکل زیر می‌بینیم که به آن، نقش موج یا شکل موج در آن لحظه می‌گوییم. از روی شکل موج می‌توانیم قله‌ها و دره‌ها را به وضوح ببینیم و دامنه و طول موج را اندازه بگیریم.

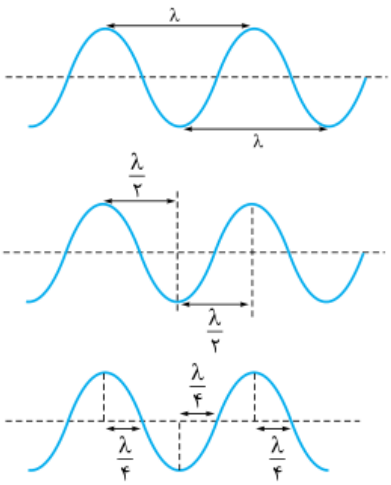
تعیین طول موج از روی نقش موج: همان‌طور که قبلاً گفتیم، فاصلهٔ بین دو نقطهٔ مشابه متوالی برابر طول موج است.

با این توضیح می‌توانیم نتیجه بگیریم که:

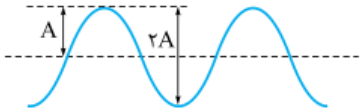
۱) فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی برابر یک طول موج (λ) است.

۲) فاصلهٔ یک قله از درهٔ مجاورش، نصف طول موج $(\frac{\lambda}{۲})$ است.

۳) کم‌ترین فاصلهٔ یک قله یا دره از نقطه‌ای که در مکان تعادل است، $\frac{۱}{۴}$ طول موج $(\frac{\lambda}{۴})$ است.



تعیین دامنه از روی نقش موج: حداکثر جابه‌جایی هر نقطه از محیط نسبت به وضع تعادل، دامنه (A) را نشان می‌دهد. با این توضیح می‌توانیم نتیجه بگیریم که فاصلهٔ بالای یک قله تا پایین یک دره، دو برابر دامنه $(2A)$ است.



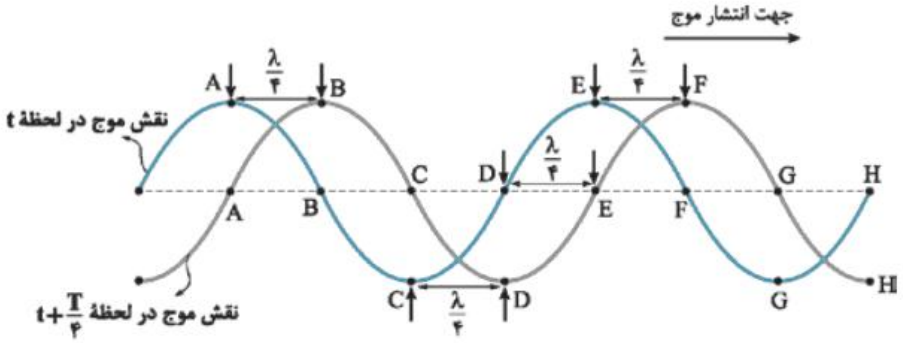
نکتهٔ که از این شکل به دست می‌آید این است که در هر دورهٔ تناوب، دو اتفاق رخ می‌دهد:

۱) هر نقطه از طناب یک نوسان کامل انجام می‌دهد.

۲) هر تپ ایجادشده به اندازهٔ یک طول موج در طناب پیشروی می‌کند.

نکته چون در یک دورهٔ تناوب (T)، موج (نه یک ذره از محیط) به اندازهٔ یک طول موج (λ) پیش می‌رود؛ بنابراین در مدت $\frac{T}{n}$ هر وضعیت از موج به اندازهٔ $\frac{\lambda}{n}$ در محیط جلو می‌رود و هر نقطه از محیط انتشار موج، بعد از زمان $\frac{T}{n}$ از نظر وضعیت نوسانی (یعنی فاصله از مبدأ) وضعیت نقطه‌ای را خواهد داشت که به اندازهٔ $\frac{\lambda}{n}$ عقب‌تر از آن است.

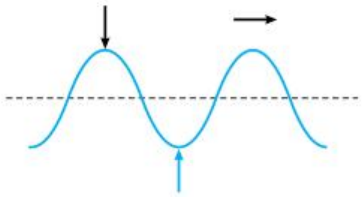
نمونه شکل مقابل نقش موجی را که به سمت راست منتشر می‌شود، در دو لحظهٔ t و $t+\frac{T}{4}$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که هر قله یا دره به اندازهٔ $\frac{\lambda}{4}$ در محیط پیشروی کرده است.



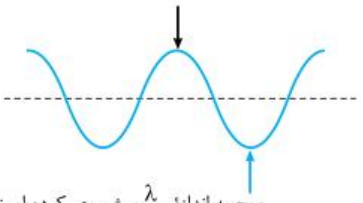
نکته با توجه به نکتهٔ قبل، دو نتیجهٔ ریز زیر!! گرفته می‌شود:

۱) پس از گذشت زمانی معادل با نصف دورهٔ تناوب، نقش موج نسبت به محور انتشار موج قرینه می‌شود.

نقش موج در لحظهٔ t:



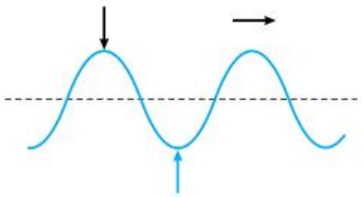
نقش موج در لحظهٔ $t+\frac{T}{2}$:



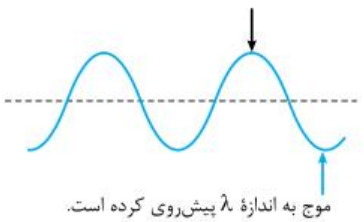
موج به اندازهٔ $\frac{\lambda}{2}$ پیش‌روی کرده است.

۲) پس از گذشت یک دورهٔ تناوب، نقش موج عیناً تکرار می‌شود.

نقش موج در لحظهٔ t:

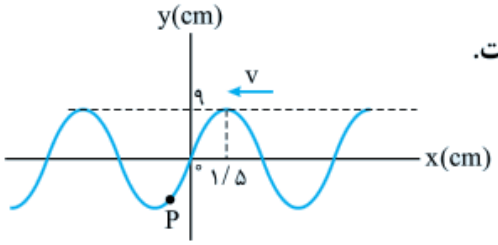


نقش موج در لحظهٔ $t+T$:



موج به اندازهٔ λ پیش‌روی کرده است.

مثال **نقش موجی که به سمت چپ منتشر می‌شود، در یک لحظه به صورت مقابل است.**



الف) طول موج و دامنهٔ موج چند سانتی‌متر است؟

ب) نقش موج را $\frac{T}{۴}$ بعد رسم کنید.

پ) در این مدت نقطهٔ P به چه سمتی حرکت کرده است؟

تندی انتشار امواج عرضی

سرعت انتشار موج به ویژگی‌های فیزیکی و جنس محیط انتشار بستگی دارد. مثلاً تندی انتشار موج عرضی در یک فنر طناب یا ریسمان کشیده‌شده از رابطه مقابل به دست می‌آید:

$$v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

F نیروی کشش ریسمان یا فنر برحسب نیوتون (N) و μ چگالی خطی جرم فنر یا ریسمان است. **چگالی خطی جرم از نسبت جرم فنر یا ریسمان به طول آن به دست می‌آید.** یعنی:

$$\mu=\frac{m}{L}$$

بنابراین یکای چگالی خطی جرم در SI، کیلوگرم بر متر (kg/m) است.

نمونه در سازهای زهی وقتی نوازنده اصطلاحاً ساز را کوک می‌کند با شل و سفت کردن سیم‌ها نیروی کشش آن را تغییر می‌دهد و موجب تغییر تندی انتشار موج عرضی در آن می‌شود و از این طریق بسامد صوتی که از تار شنیده می‌شود را تغییر می‌دهد.

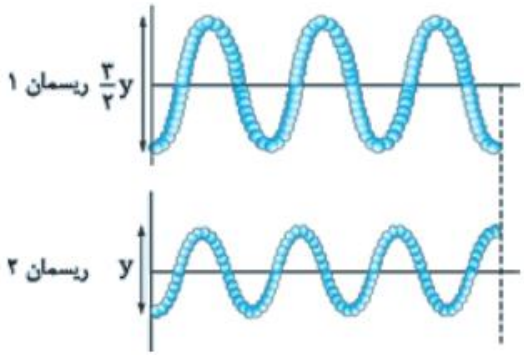
مثال در ساز زهی قیچک طول یکی از سیم‌ها ۳۰ سانتی‌متر و جرم آن ۱/۲ گرم است. این سیم با نیروی ۲۴۰ نیوتون کشیده شده است. اگر تندی انتشار موج مناسب برای نواختن بالاترین بسامد، $3\times10^{2}\ m/s$ باشد، نوازنده کشش سیم را چند نیوتون کاهش یا افزایش دهد تا این سیم برای این بسامد کوک شود؟ *(مشابه تمرین کتاب درسی)*

انتقال انرژی در امواج عرضی

فنر یا ریسمان بلند و کشیده‌ای که موج عرضی در آن منتشر می‌شود را در نظر بگیرید. انرژی که نوسانگر (چشمهٔ موج) در نقطهٔ ابتدایی فنر به آن می‌دهد به صورت ترکیبی از انرژی جنبشی و پتانسیل کشسانی توسط موج به نقاط دورتر فنر حمل می‌شود.

نکته مهم می‌توانیم ثابت کنیم در همهٔ انواع موج مکانیکی (چه طولی و چه عرضی) عبارت زیر درست است.

آهنگ انتقال انرژی با مربع دامنه (A^2) و مربع بسامد (f^2) موج متناسب است.



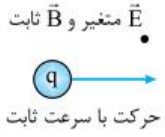
مثال در دو ریسمان کاملاً مشابه به طول ۲۱ متر که تحت کشش یکسان قرار دارند دو موج ایجاد کرده‌ایم. آهنگ انتقال انرژی در ریسمان اول چند برابر آهنگ انتقال انرژی در ریسمان دوم است؟

امواج الکترومغناطیس، نمونه‌ای از موج عرضی

با توجه به مطالبی که در فیزیک یازدهم آموختید، می‌توانیم نحوهٔ تولید امواج الکترومغناطیس را به صورت زیر بیان کنیم:

۱ بارهای الکتریکی ساکن در اطراف خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند که این میدان الکتریکی در یک نقطهٔ معین، ثابت است.

۲ اگر بارهای الکتریکی با سرعت ثابت حرکت کنند (جریان الکتریکی ثابت) میدان الکتریکی در هر نقطه تغییر می‌کند. بعدها جیمز کلارک ماکسول نشان داد که میدان الکتریکی متغیر موجب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود.

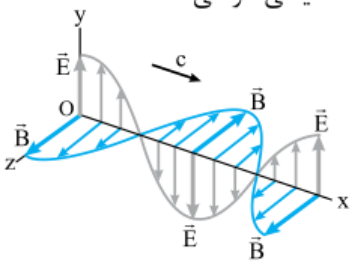


۳ حالا اگر بارهای الکتریکی با شتاب حرکت کنند، یعنی بزرگی و یا جهت سرعتشان تغییر کند (جریان الکتریکی متغیر)، علاوه بر میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی هم تغییر می‌کند.

۴ مایکل فاراده نشان داد که میدان مغناطیسی متغیر، میدان و در نتیجه جریان الکتریکی ایجاد می‌کند.
یعنی با تغییر یکی از میدان‌ها، یک چرخهٔ تکرارشونده ایجاد می‌شود:
این سازوکار موجب انتشار امواج الکترومغناطیس می‌شود که با انتقالِ نوسان‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی از نقطه‌ای از فضا به نقطهٔ دیگر رخ می‌دهد.

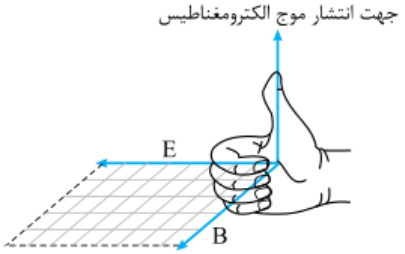
ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی

۱ میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی همواره بر هم عمود هستند.
۲ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همواره بر جهت حرکت موج عمود هستند به همین دلیل امواج الکترومغناطیسی عرضی هستند.
۳ میدان‌ها با بسامد یکسان و هم‌گام با یکدیگر تغییر می‌کنند.
شکل روبه‌رو تصویری از شکل موج الکترومغناطیسی در یک لحظه معین را نشان می‌دهد.

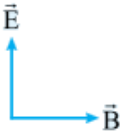


تعیین جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

قاعدهٔ دست راست: اگر چهار انگشت دست راست در جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ قرار بگیرند طوری که جهت پیچش چهار انگشت میدان مغناطیسی $\vec{B}$ را نشان دهد، انگشت شست جهت حرکت موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.



مثال در یک موج الکترومغناطیس در یک لحظهٔ معین بردار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به شکل روبه‌رو است. جهت انتشار موج را تعیین نمایید.



تندی انتشار امواج الکترومغناطیس

تندی انتشار امواج الکترومغناطیس در خلأ از رابطهٔ روبه‌رو به دست می‌آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

در رابطهٔ بالا μ_0 ضریب تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر با $4\pi \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A}$ و ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر با $8/85 \times 10^{-12}\ \frac{C^2}{N.m^2}$ است.

نمونه با قراردادن مقادیر داده‌شده در رابطهٔ تندی انتشار امواج الکترومغناطیس بزرگی تندی انتشار این امواج را در خلأ حساب می‌کنیم:

$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A}) \times (8/85 \times 10^{-12}\ \frac{C^2}{N.m^2})}} = \frac{1}{3/33 \times 10^{-9}} \simeq 0/3 \times 10^{9}\ m/s \Rightarrow c = 3 \times 10^{8}\ m/s$$

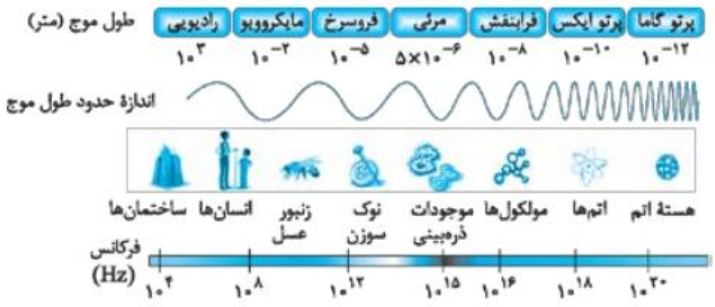
عدد به دست آمده همان سرعت انتشار نور در خلأ است؛ بنابراین، نتیجه می‌گیریم نور هم از جنس امواج الکترومغناطیس است.

نکته امواج الکترومغناطیس هر بسامدی که داشته باشند، در خلأ، با تندی $3 \times 10^{8}\ m/s$ منتشر می‌شوند.

طیف امواج الکترومغناطیس

امروزه می‌دانیم علاوه بر نور مرئی، امواج رادیویی، میکروموج، پرتوهای فروسرخ و فرابنفش، پرتوهای X و گاما همگی از جنس امواج الکترومغناطیس هستند و همهٔ آن‌ها در خلأ با سرعت یکسان منتشر می‌شوند.

شکل روبه‌رو طیف امواج الکترومغناطیس را به ترتیب از کم‌ترین بسامد (بیشترین طول موج) تا بیشترین بسامد (کوتاه‌ترین طول موج) نشان می‌دهد.



مثال کم‌ترین بسامد نور مرئی مربوط به نور قرمز با بسامد $f_R = 4/00\times10^{14}\ Hz$ و بیشترین بسامد نور مرئی مربوط به نور بنفش با بسامد $f_V = 7/90\times10^{14}\ Hz$ است. کم‌ترین و بیشترین طول موج نور مرئی در خلأ را برحسب نانومتر محاسبه کنید.

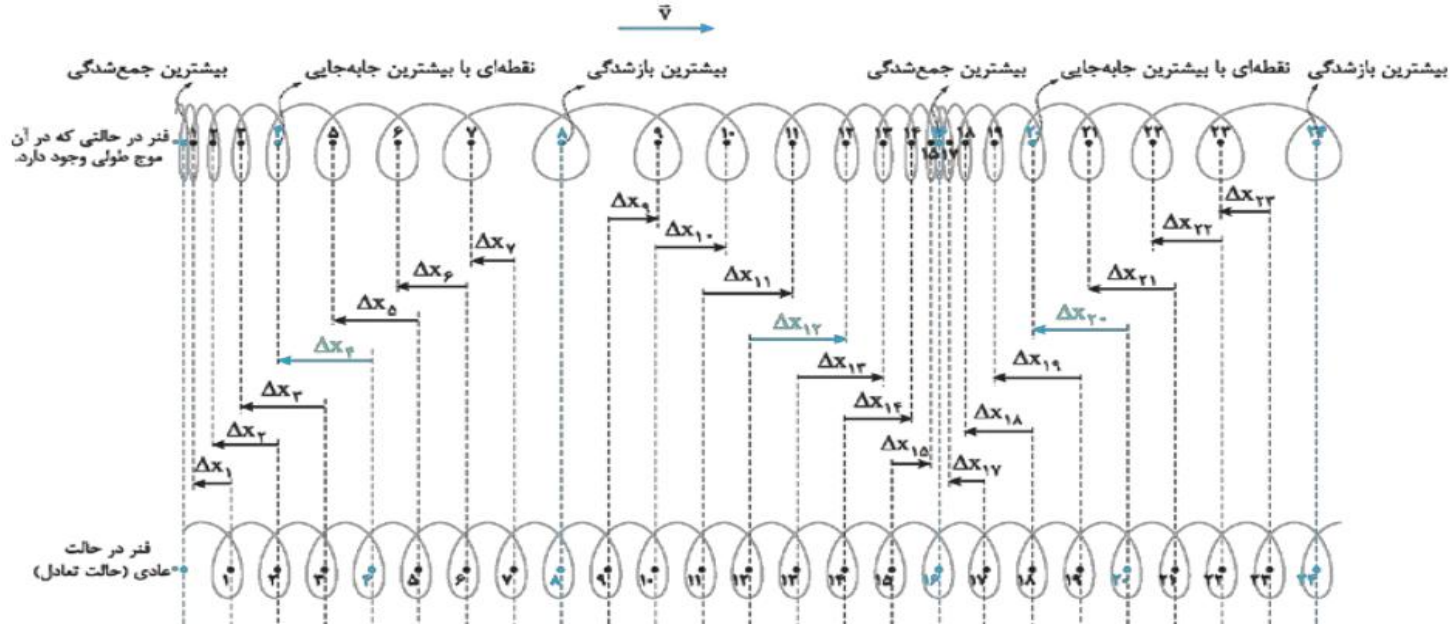
طول موج و بسامد رنگ‌های مختلف نور مرئی در نامساوی زیر صدق می‌کند:

$$380\ nm \le \lambda \le 750\ nm$$
$$4/00\times10^{14}\ Hz \le f \le 7/9\times10^{14}\ Hz$$

(گسترهٔ بسامد و طول موج نور مرئی)

امواج طولی و مشخصه‌های آن

یک بار دیگر فنر بلند و کشیده‌ای را در نظر بگیرید. اگر یک سر فنر را به جلو حرکت دهیم، حلقه‌های فنر در آن ناحیه به هم نزدیک می‌شوند و یک جمع‌شدگی ایجاد می‌شود. حال اگر سر آزاد فنر را به عقب بکشیم موجب فاصله‌گرفتن حلقه‌ها از هم می‌شود و یک بازشدگی در فنر به وجود می‌آید. اگر به طور مداوم به صورت هماهنگ ساده یک سر فنر را به جلو و عقب حرکت دهیم، جمع‌شدگی (تراکم) و بازشدگی (انبساط)هایی ایجاد می‌شود که به طور متناوب در طول فنر منتشر می‌شود، در حالی که هر جزء فنر هم‌راستا با حرکت موج به چپ و راست می‌رود و در راستای انتشار موج حرکت هماهنگ ساده می‌کند.



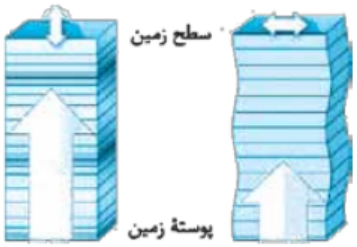
نکته۱ در امواج طولی، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی (تراکم بیشینه) یا بیشترین بازشدگی (انبساط بیشینه) رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء از محیط از وضعیت تعادل صفر است. این نقاط وسط تراکم و یا وسط انبساط هستند.

نکته۲ در امواج طولی در **وسط** فاصلهٔ بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینهٔ مجاور هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل بیشینه است

طول موج و دامنه در امواج طولی

مشخصه‌هایی که برای امواج عرضی به کار بردیم در مورد امواج طولی نیز درست است. فقط در امواج طولی، طول موج به صورت فاصلهٔ بین دو تراکم (جمع‌شدگی) و یا دو انبساط (بازشدگی) متوالی تعریف می‌شود. دامنه هم برابر با بیشینهٔ جابه‌جایی از وضعیت تعادل است.

امواج لرزه‌ای، ترکیبی از امواج طولی و عرضی



امواج لرزه‌ای منشأ اغلب زمین‌لرزه‌ها هستند. این امواج از لایه‌های زمین عبور می‌کنند و انرژی حاصل از لرزش‌های اعماق زمین را به سطح زمین حمل می‌کنند. دو نوع مهم از امواج لرزه‌ای، امواج اولیه (یا p) و امواج ثانویه (یا s) هستند.

امواج p طولی هستند و تندی انتشار آن‌ها از امواج s که عرضی هستند، بیشتر است. بنابراین معمولاً لرزه‌نگارها ابتدا امواج طولی p و سپس امواج عرضی s را دریافت می‌کنند.

مثال **در زلزلهٔ آبان‌ماه ۱۳۹۶ در استان کرمانشاه کانون زمین‌لرزه در عمق ۱۱ کیلومتری زمین گزارش شد. اگر تندی امواج s برابر $3/5\ km/s$ و تندی امواج p برابر $6/5\ km/s$ باشد، امواج s چند ثانیه پس از امواج p به سطح زمین رسیده‌اند.**

صوت، آشناترین موج طولی

امواج صوتی ممکن است از تارهای صوتی انسان‌ها و حیوانات، صفحات مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو یا سیم‌های یک ساز زهی مانند گیتار یا ارتعاش هوای درون یک ساز بادی مانند شیپور و ... تولید شود. هر وسیله‌ای را که امواج صوتی تولید می‌کند **چشمهٔ صوت** می‌نامیم.

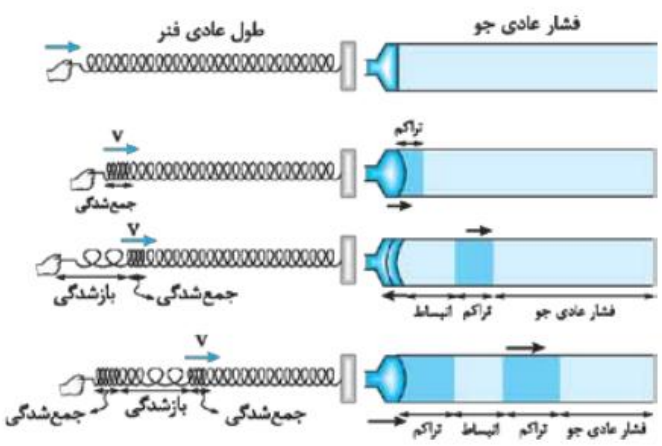
موج صوتی که از یک چشمه صوت ایجاد می‌شود، در صورتی که اطراف چشمهٔ صوت محیط مادی وجود داشته باشد، در تمام جهات منتشر می‌شود؛ زیرا صوت، موجی مکانیکی است و در خلأ منتشر نمی‌شود.

چشمه‌های صوت با ایجاد مجموعه‌ای از تراکم‌ها و انبساط‌ها در محیط باعث انتشار صوت می‌شوند. مثلاً یک بلندگو از طریق ارتعاش دیافراگم و یا یک دیاپازون از طریق ارتعاش تیغه‌هایش در هوای اطراف خود تراکم و انبساط‌هایی ایجاد می‌کند که این تراکم و انبساط‌ها در هوا انتشار می‌یابد. این تراکم‌ها و انبساط‌ها در هر ناحیه از هوا به ترتیب باعث افزایش و کاهش فشار جو در آن نواحی می‌شود.

تذکر دقت کنید که آن‌چه به عنوان صوت در محیط منتشر می‌شود، صرفاً تراکم‌ها و انبساط‌ها هستند، نه مولکول‌های محیط! در واقع مولکول‌های محیط در هنگام انتشار صوت، تنها در حول مکان تعادل خود حرکت نوسانی انجام می‌دهند.

برای درک بهتر چگونگی ایجاد امواج صوتی می‌توانیم تراکم‌ها و انبساط‌های ایجادشده در این امواج را به جمع‌شدگی و بازشدگی‌ها در موج طولی منتشرشده در فنر تشبیه کنیم.

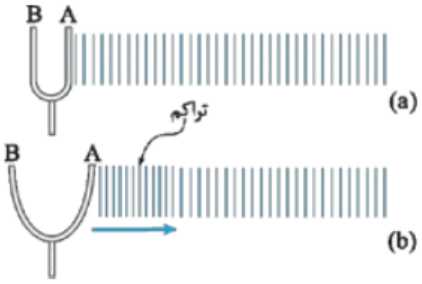
در شکل‌های روبه‌رو دیافراگم بلندگو با حرکت به سمت بیرون، تراکم و با حرکت به سمت داخل انبساط ایجاد می‌کند، درست مانند شخصی که سر آزاد فنر را به عقب و جلو حرکت دهد و در فنر جمع‌شدگی و بازشدگی به وجود آورد.



دیاپازون، چشمهٔ صوت دوست‌داشتنی

دیاپازون از دو شاخهٔ فلزی تشکیل شده است که انتهای آن‌ها به یک پایهٔ مشترک متصل است. دیاپازون یک چشمهٔ صوت پرکاربرد است که مانند سایر چشمه‌های صوت از طریق ارتعاش شاخه‌ها و با ایجاد تراکم و انبساط در محیط، موج صوتی ایجاد می‌کند.

با واردشدن ضربه به یکی از شاخه‌ها، دیاپازون مرتعش می‌شود و صوتی با بسامد معین و ثابت تولید می‌شود. اهمیت دیاپازون به این علت است که نوسان‌های آن به حرکت هماهنگ ساده بسیار شبیه است و بنابراین موجی سینوسی تولید می‌کند.



به صوت تولیدشده توسط چشمه‌ای که به طور سینوسی نوسان می‌کند و حرکت هماهنگ ساده دارد، **تن موسیقی** یا به طور خلاصه **تن** می‌گوییم. شکل روبه‌رو تصویر ساده‌ای از تولید صوت توسط دیاپازون را نشان می‌دهد.

تندی انتشار صوت

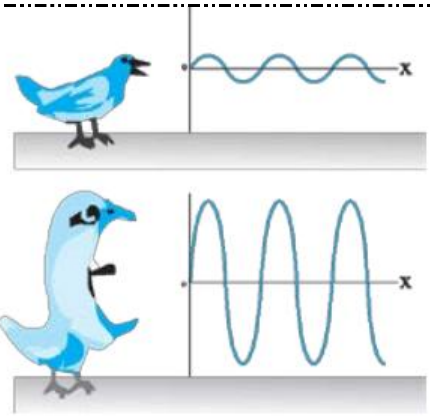
تندی انتشار صوت در یک محیط مانند سایر امواج به ویژگی‌های محیط بستگی دارد. هر چه محیطی تراکم‌ناپذیرتر و چگالی آن بیشتر باشد، تندی انتشار صوت در آن بیشتر است. بر این اساس به جز برخی استثناها می‌توان گفت:

تندی صوت در گازها < تندی صوت در مایعات < تندی صوت در جامدات

وابستگی تندی انتشار صوت به دما: تندی صوت به دما نیز بستگی دارد، بنابراین وقتی تندی صوت در یک محیط بیان می‌شود باید معلوم کنیم که در چه دمایی این تندی اندازه‌گیری شده است.

مثلاً تندی صوت در هوای صفر درجهٔ سلسیوس $331\ m/s$ است، اما با افزایش دمای هوا تندی صوت نیز افزایش می‌یابد و برای مثال در هوای ۲۰ درجهٔ سلسیوس تندی صوت در هوا به $343\ m/s$ می‌رسد.

شدت صوت

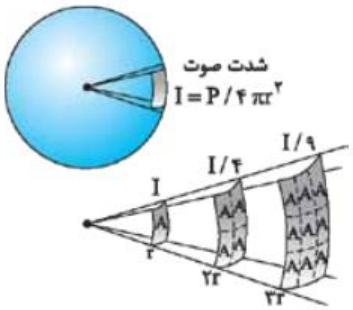


صوت نیز مانند سایر امواج حامل انرژی است. انرژی که چشمهٔ صوت به لایه‌های مجاور خود منتقل می‌کند از طریق تراکم‌ها و انبساط‌های پی‌درپی به لایه‌های بعدی و دورتر منتقل می‌شود.

به آهنگ متوسط انرژی که توسط موج صوتی به واحد سطح عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد، شدت صوت می‌گوییم. شدت صوت از رابطهٔ روبه‌رو به دست می‌آید.

$$I = \frac{\bar{P}}{A}$$

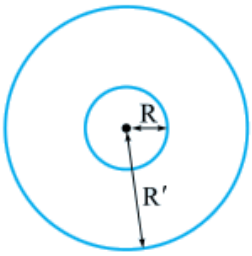
در رابطهٔ بالا $\bar{P}$ آهنگ متوسط انرژی انتقال‌یافته برحسب وات (W)، A مساحت سطحی که انرژی گسیل‌شده را جذب می‌کند برحسب مترمربع (m^2) و I شدت صوت برحسب وات بر متر مربع $(\frac{W}{m^2})$ است.



نکته انرژی موج صوتی از چشمهٔ صوت در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. با توجه به شکل هر چه از چشمهٔ صوت دورتر می‌شویم انرژی گسیل‌شده توسط چشمهٔ صوت در سطح کره‌هایی با مساحت بزرگ‌تر توزیع می‌شود در نتیجه شدت صوت در فاصله‌های دورتر از چشمهٔ صوت به شدت کاهش می‌یابد.

مثال **شدت صوت در نقطه‌ای به فاصلهٔ R از چشمهٔ صوت چند برابر شدت صوت در فاصلهٔ R' ، $(R' > R)$ از آن چشمه است؟**

پاسخ انرژی گسیل‌شده توسط چشمهٔ صوت در فاصلهٔ R توسط سطح کره‌ای به شعاع R و انرژی گسیل‌شده توسط چشمهٔ صوت در فاصله R' توسط سطح کره‌ای به شعاع R' جذب می‌شود؛ بنابراین:



$$\begin{cases} I' = \dfrac{\bar{P}}{A'} \\ I = \dfrac{\bar{P}}{A} \end{cases} \Rightarrow \frac{I}{I'} = \frac{\frac{\bar{P}}{A}}{\frac{\bar{P}}{A'}} \Rightarrow \frac{I}{I'} = \frac{A'}{A} = \frac{4\pi R'^2}{4\pi R^2} \Rightarrow \boxed{\frac{I}{I'} = \frac{R'^2}{R^2}}$$

یعنی شدت صوت با مجذور فاصله از چشمهٔ صوت رابطه وارون دارد.

تراز شدت صوت

تراز شدت صوت یا تراز صوتی برابر است با لگاریتم نسبت شدت آن صوت به شدت صوت مرجع در پایهٔ ۱۰، یعنی:

$$\beta = (10\ dB)\log\frac{I}{I_0}$$

در رابطهٔ بالا β تراز شدت صوت برحسب دسی‌بل (dB) و I_0 شدت صوت مرجع برابر $10^{-12}\ W/m^2$ است که نزدیک به پایین‌ترین شدتی است که گوش انسان می‌تواند بشنود.

نمونه تراز شدت صوت مرجع برابر است با:

$$\beta = (10\ dB)\log\frac{10^{-12}\frac{W}{m^2}}{10^{-12}\frac{W}{m^2}} = (10\ dB)\log 1 = (10\ dB)\times 0 = 0$$

یعنی تراز شدت صوت مرجع برابر صفر است و تراز شدت سایر صوت‌ها نسبت به این تراز سنجیده می‌شود.

مثال **تراز شدت صوت در نزدیکی جاروبرقی $80\ dB$ است. شدت صوت در نزدیکی جاروبرقی را به دست آورید.**

مثال **آرش با هندزفری به موسیقی گوش می‌دهد. اگر انرژی صوتی از هندزفری با آهنگ متوسط 10^{-9} W منتشر شود، شدت صوت و تراز صوتی که آرش می‌شنود را محاسبه نمایید. (مساحت پردهٔ گوش $100\ mm^2$ است و فرض کنید تمام انرژی صوتی، وارد گوش آرش می‌شود.)**

ادراک شنوایی

به صوت حاصل از چشمه‌هایی که با حرکت هماهنگ ساده نوسان می‌کنند، تُن می‌گوییم. حالا می‌خواهیم دربارهٔ دو ویژگی که به هنگام شنیدن تُن‌های موسیقی حس می‌کنیم، صحبت کنیم.

ارتفاع صوت و **بلندی صوت** دو ویژگی ادراکی و حسی صوت هستند. به عبارت دیگر وقتی ما تُن‌های موسیقی را می‌شنویم با دو ویژگی ارتفاع و بلندی می‌توانیم درک خودمان از صوت شنیده‌شده را توصیف کنیم.

۱ **ارتفاع صوت**: ارتفاع صوت به درک ما از **بسامد صوت** وابسته است. اگر دو صوت با شدت یکسان را بشنویم، صوتی که بسامد بیشتری دارد را زیرتر احساس می‌کنیم و می‌گوییم ارتفاع آن بالاتر است و صوتی که بسامد کم‌تری دارد را بم‌تر حس می‌کنیم و می‌گوییم ارتفاع آن صوت کم‌تر است.

۲ **بلندی صوت**: بلندی صوت درک ما از **شدت صوتی** که می‌شنویم را بیان می‌کند. هر چند بلندی صوت به شدت صوت (یا تراز شدت صوت) وابسته است، اما با آن تفاوت اساسی دارد. شدت صوت کمیتی است که با یک آشکارساز قابل اندازه‌گیری است. اما بلندی صوت به درک یک فرد از صوت بستگی دارد و علاوه بر شدت صوت به حساسیت شنوایی فرد نیز بستگی دارد.

گوش انسان به بسامدهای ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz بیشترین حساسیت را دارد که این حساسیت در بسامد ۳۳۰۰ Hz به بیشترین مقدار خود می‌رسد. یعنی اگر بسامد صوتی در این محدوده بسامدی باشد حتی اگر شدت آن کم باشد احتمالا، گوش انسان آن را می‌شنود.

به عبارت دیگر اگر شدت دو صوت یکسان باشد، صوتی که بسامد آن در محدودهٔ ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz باشد بلندتر شنیده خواهد شد.

گوش انسان قادر به شنیدن اصواتی با بسامد کم‌تر از ۲۰ Hz و بیشتر از ۲۰۰۰۰ Hz نیست؛ یعنی تُن‌های صدایی که خارج از محدودهٔ $20\ Hz \le f \le 20000\ Hz$ باشند حتی اگر شدت آن‌ها بسیار زیاد باشد توسط گوش انسان شنیده نمی‌شوند. برخی عوامل از جمله افزایش سن محدودهٔ بسامدی شنوایی را کاهش می‌دهند.

نمونه اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت ۱۲۰ dB باشیم، آستانهٔ شنوایی به طور موقت از ۰ dB به ۲۸ dB افزایش می‌یابد. هم‌چنین مطالعات نشان داده است که به طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدای با تراز شدت ۹۲ dB قرار بگیریم، آستانهٔ شنوایی به طور دائم به ۲۸ dB افزایش می‌یابد و شخص صداهای با تراز شدت کم‌تر را نمی‌شنود.

حتماً برای شما پیش آمده است که تفاوت صدای اتومبیلی را هنگام نزدیک‌شدن و دورشدن احساس کرده باشید. وقتی اتومبیل به شما نزدیک می‌شود صدای آن زیرتر و وقتی دور می‌شود صدای آن بم‌تر است. اما علت این پدیده چیست؟

علت آن است که حرکت چشمهٔ صوت و شنوندهٔ صوت (ناظر) نسبت به هم در بسامد صوتی که ناظر می‌شنود مؤثر است؛ این پدیده را اثر دوپلر می‌نامیم. اثر دوپلر در مورد امواج الکترومغناطیسی نیز رخ می‌دهد

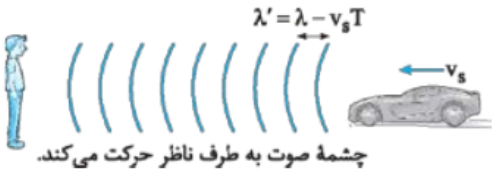
اول بیایید به اثر دوپلر در مورد صوت بپردازیم. این کار را در دو حالت کلی بررسی می‌کنیم:

الف) اگر چشمهٔ صوت و شنوندهٔ صوت (ناظر) به یکدیگر نزدیک شوند

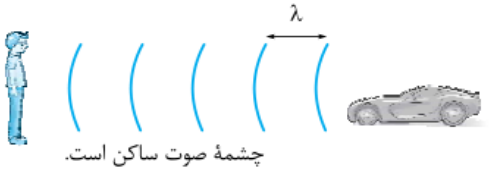
این اتفاق در سه حالت رخ می‌دهد.

۱) ناظر ساکن باشد و چشمهٔ صوت با تندی v_s به آن نزدیک شود

در این حالت چشمهٔ صوت در یک دورهٔ تناوب به اندازهٔ v_sT به جلو حرکت می‌کند؛ بنابراین فاصلهٔ دو جبههٔ موج متوالی که برابر با طول موج است، به اندازهٔ v_sT نسبت به حالتی که چشمه ساکن است، کاهش می‌یابد و شنونده طول موج کوتاه‌تری را دریافت می‌کند. با توجه به این‌که سرعت انتشار صوت ثابت است، طبق رابطهٔ $f=\frac{v}{\lambda}$ با کاهش طول موج بسامد افزایش می‌یابد. در نتیجه، ناظر صوت را با بسامد بیشتر نسبت به حالت عادی دریافت می‌کند.



چشمهٔ صوت به طرف ناظر حرکت می‌کند.



چشمهٔ صوت ساکن است.

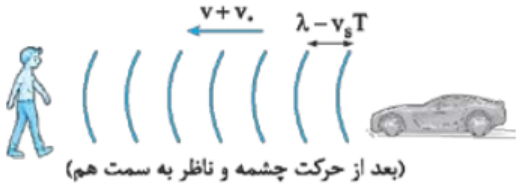
نکته در این حالت طول موج‌های رسیده به ناظر کاهش می‌یابد.

۲) چشمهٔ صوت ساکن باشد و ناظر با تندی v_0 به آن نزدیک شود

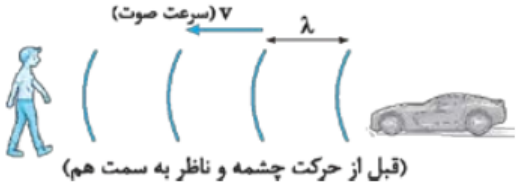
در این حالت **چون چشمه ساکن است**، طول موج تغییر نمی‌کند اما ناظر در یک مدت‌زمان ثابت با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود؛ در نتیجه بسامد صوت رسیده به ناظر بیشتر می‌شود؛ این اتفاق به این خاطر رخ می‌دهد که ناظر به سمت چشمه می‌رود.

۳) چشمهٔ صوت با تندی v_s و ناظر با تندی v_0 به هم نزدیک شوند

در این حالت هر دو اتفاق بالا رخ می‌دهد یعنی هم ناظر طول موج‌های کوتاه‌تری دریافت می‌کند و هم تعداد جبهه موج‌های رسیده به ناظر افزایش می‌یابد؛ بنابراین بسامد صوت دریافتی توسط ناظر افزایش می‌یابد.



(بعد از حرکت چشمه و ناظر به سمت هم)



(قبل از حرکت چشمه و ناظر به سمت هم)

پس در حالت کلی نتیجه می‌گیریم:

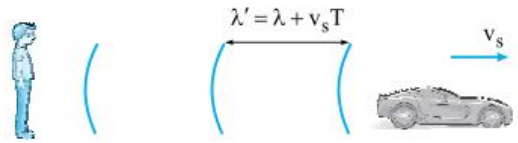
اگر فاصلهٔ چشمهٔ صوت و شنوندهٔ صوت در حال کاهش باشد، بسامد صوت دریافتی توسط شنونده افزایش می‌یابد و او صوت را زیرتر احساس می‌کند.

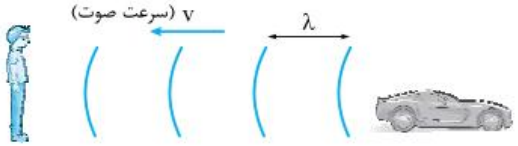
ب) اگر چشمهٔ صوت و شنوندهٔ صوت (ناظر) از هم دور شوند

این اتفاق نیز در سه حالت رخ می‌دهد:

۱) ناظر ساکن باشد و چشمهٔ صوت با تندی v_s از آن دور شود

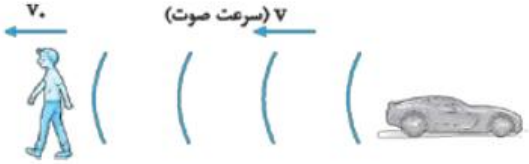
در این صورت چشمهٔ صوت در یک دورهٔ تناوب به اندازهٔ v_sT از ناظر دور می‌شود؛ بنابراین فاصلهٔ دو جبههٔ موج متوالی که برابر با طول موج است،به اندازهٔ v_sT افزایش می‌یابد. طبق رابطهٔ $f = \frac{v}{\lambda}$ با ثابت‌ماندن تندی انتشار صوت و افزایش طول موج، بسامد صوت دریافتی توسط ناظر کاهش می‌یابد.





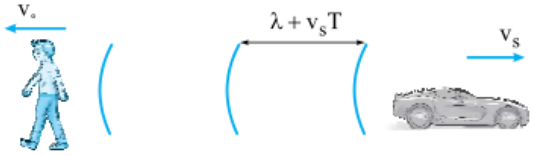
۲) چشمهٔ صوت ساکن باشد و ناظر با تندی v_0 از آن دور شود

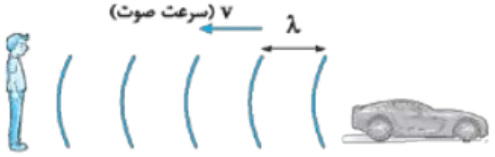
در این حالت ناظر متحرک نسبت ناظر ساکن در مدت‌زمان یکسان، با جبهه موج‌های کم‌تری مواجه می‌شود که باعث کاهش بسامد صوت می‌شود.



۳) چشمهٔ صوت با تندی v_s و ناظر با تندی v_0 از هم دور شوند

در این حالت نیز هر دو اتفاق بالا رخ می‌دهد؛ یعنی هم طول موجی که ناظر دریافت می‌کند بلندتر است و تعداد جبهه موج‌های رسیده به ناظر متحرک نسبت به ناظر کم‌تر است؛ به همین دلیل بسامد صوتی که ناظر دریافت می‌کند به شدت کاهش می‌یابد.





(قبل از دورشدن چشمه و ناظر از هم)

پس در حالت کلی نتیجه می‌گیریم:

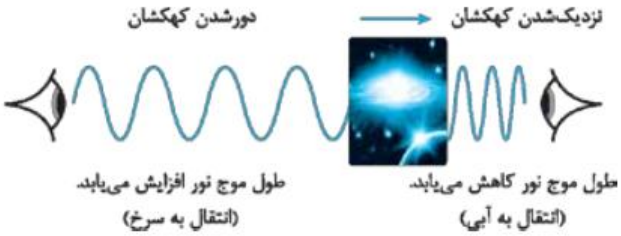
اگر فاصلهٔ چشمهٔ صوت و شنوندهٔ صوت در حال افزایش باشد، بسامد صوت دریافتی توسط شنونده کاهش می‌یابد و او صوت را بم‌تر احساس می‌کند.

اثر دوپلر در امواج الکترومغناطیسی

اثر دوپلر در مورد امواج الکترومغناطیس نیز اتفاق می‌افتد.

هرگاه چشمهٔ موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آن‌ها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آن‌ها به دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است.

انتقال به سرخ و انتقال به آبی



وقتی چشمهٔ نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ می‌گویند. وقتی چشمهٔ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی می‌گویند.

نمونه از همین ویژگی در دوربین‌های کنترل سرعت برای تعیین سرعت اتومبیل‌ها استفاده می‌شود. امواجی از دوربین‌ها به سمت اتومبیل‌ها ارسال می‌شود و موج برگشتی از اتومبیل مجدداً توسط دوربین دریافت می‌شود. دوربین با توجه به مقدار اختلاف بسامد موج ارسالی و موج دریافتی تندی اتومبیل را اندازه می‌گیرد.