

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صوت



موج

- تعریف یک موج، نقش آشفته‌گی در محیط است که با سرعت ثابت V در آن محیط منتشر می‌شود و مقدار این سرعت به مشخصات محیط بستگی دارد. مثلاً ریسمان معرف محیط و آشفته‌گی معرف جابه‌جایی نقاط مختلف از موضع تعادل است.
- هر نقطه از ریسمان فقط موقعی به بالا و پایین حرکت می‌کند که آشفته‌گی با سرعت ثابت V در طول ریسمان حرکت کند. این سرعت با سرعت بالا و پایین رفتن نقاط ریسمان مساوی نیست. سرعت بالا و پایین رفتن ثابت نیست.



سرعت موج

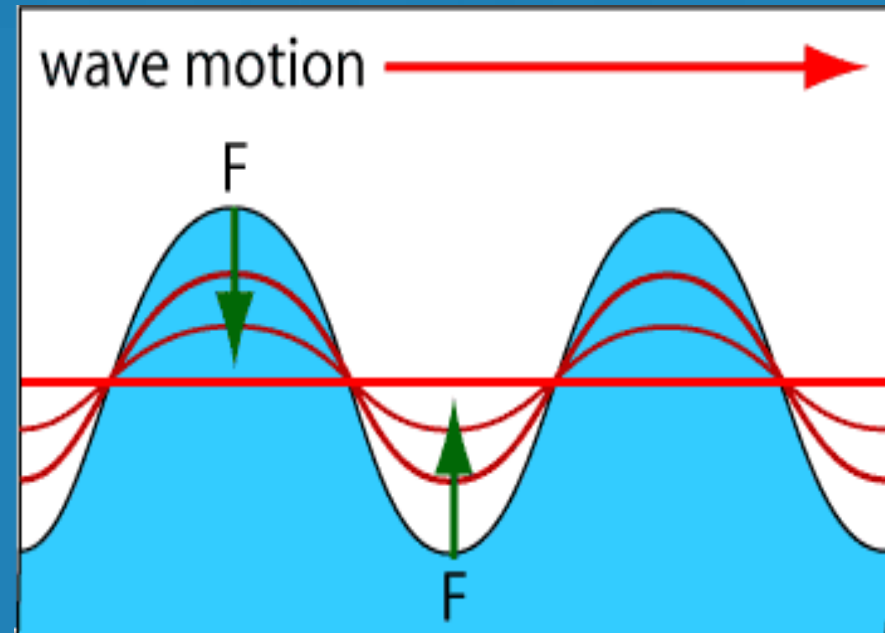
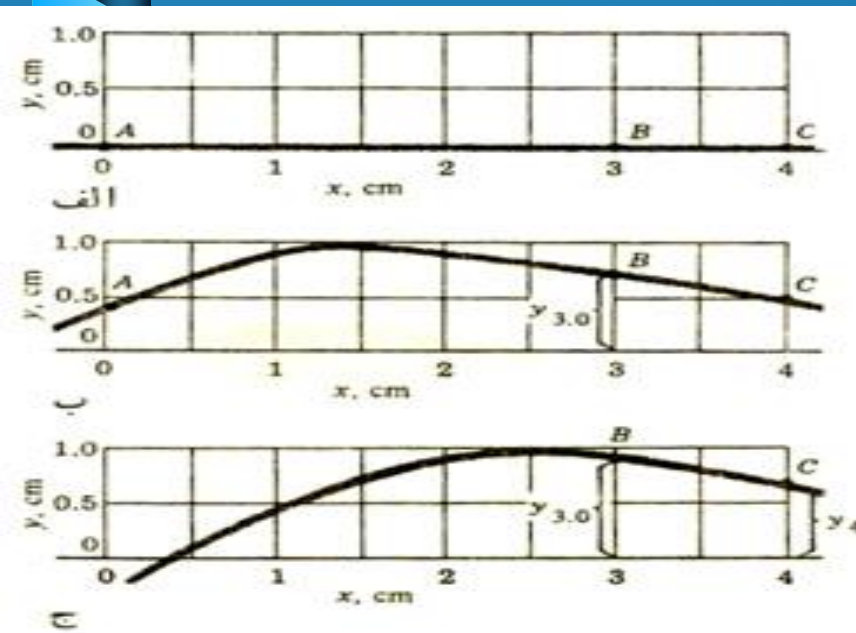
- فرض کنید که فاصله زمانی میان شکل های زیر ۰.۲ ثانیه باشد. در این مدت، نقطه ای از ریسمان که دارای جابه جایی ۰.۷ سانتی متر است از نقطه **B** (در $X=3.0 \text{ cm}$) تا نقطه **C** (در $X=4.0 \text{ cm}$) حرکت کرده است، در نتیجه سرعت موج برابر است با :

$$V=(4-3)/0.2=5(\text{cm/s})$$

- از طرف دیگر، در همین مدت جابه جایی نقطه **B** از ۰.۷ تا ۰.۹ سانتی متر تغییر کرده است، در نتیجه سرعت (متوسط) بالا و پایین رفتن این نقطه، یا سرعت عرضی آن برابر است با :

$$V1=0.2/0.2=1(\text{cm/s})$$

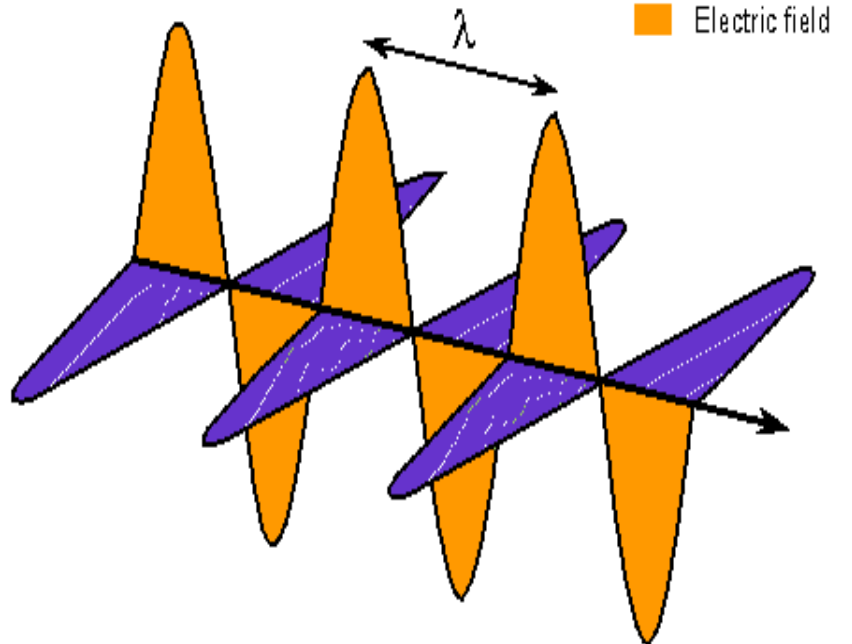
- سرعت عرضی $v1$ به انرژی حمل شده توسط موج بستگی دارد، در حالی که سرعت V موج، سرعت انتقال انرژی در طول ریسمان است.
- برای یک محیط معین، سرعت موج مقدار ثابتی مستقل از شکل موج است، در حالی که سرعت عرضی از موجی به موج دیگر تغییر می کند و در یک موج معین حتی از نقطه ای به نقطه دیگر و از لحظه ای به لحظه دیگر نیز تغییر می کند.



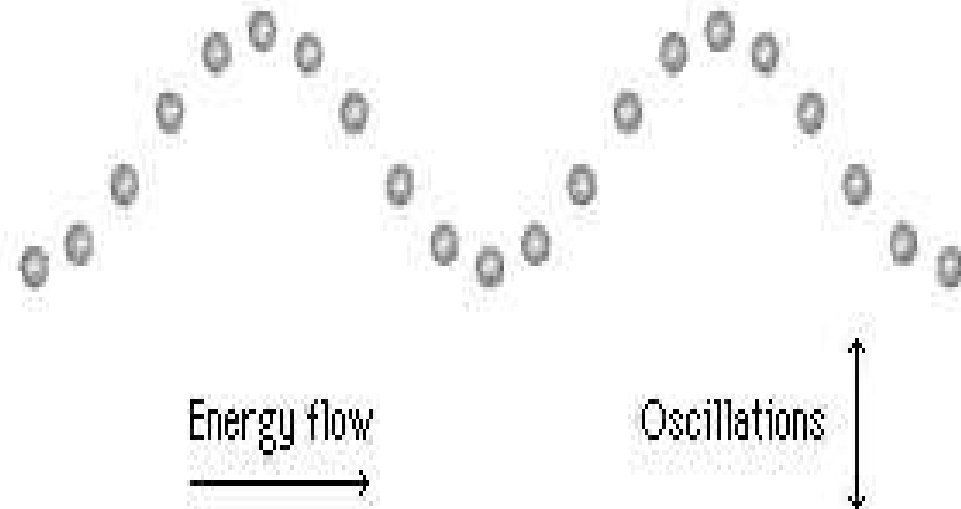
موج عرضی

- یک موج عرضی موجی است که در آن، اجزاء محیط در امتداد عمود بر راستای انتشار موج حرکت می کنند. موج روی یک ریسمان عرضی است، زیرا موقعی که موج در طول ریسمان منتشر می شود، نقاط روی ریسمان در امتداد عمود بر ریسمان حرکت می کنند.

Electromagnetic Wave

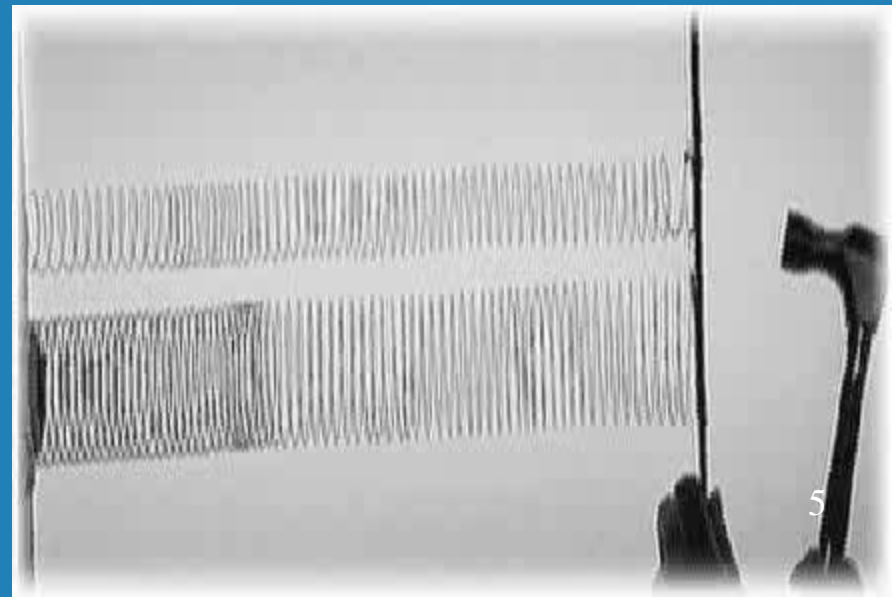
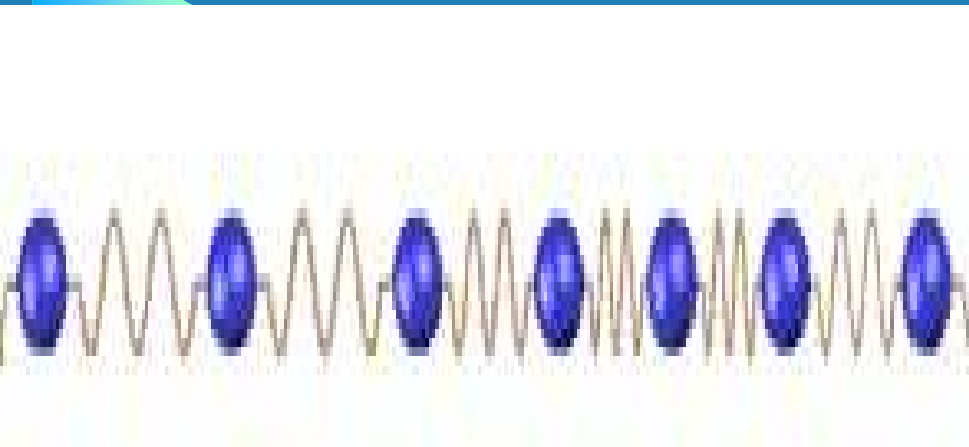


Transverse wave



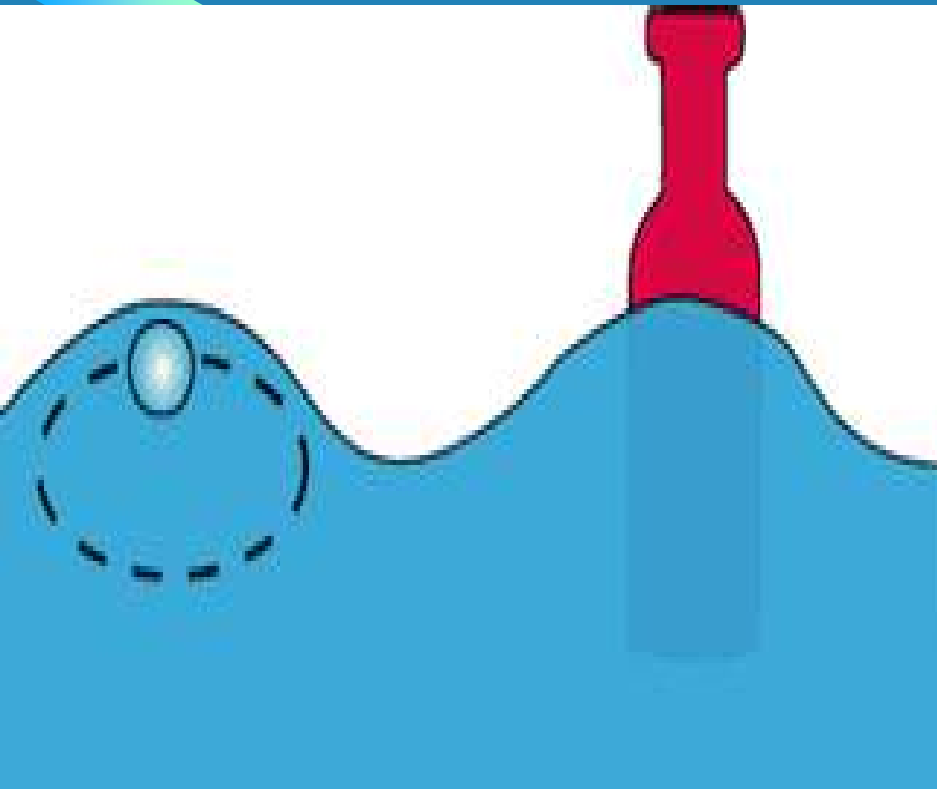
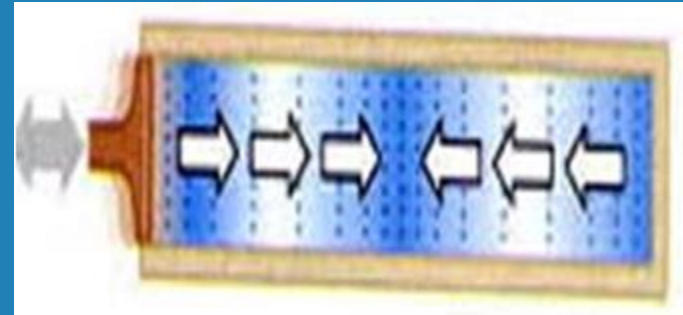
موج طولی

- یک موج طولی موجی است که در آن اجزاء محیط در امتدادی موازی با راستای انتشار موج به پس و پیش می روند.
- یک موج طولی را می توان با فشردن چند حلقه از یک فنر دراز و سپس رها کردن آنها تولید کرد. هنگامی که این حلقه ها به موضع تعادل خود به طرف عقب بر می گردند، حلقه های مجاور فشرده می شوند و دوباره به موضع تعادل خود بر می گردند و حلقه های دیگری را متراکم می کنند. حاصل این عمل یک موج تراکمی طولی است که با سرعت ثابت در طول فنر حرکت می کند.



امواج مکانیکی

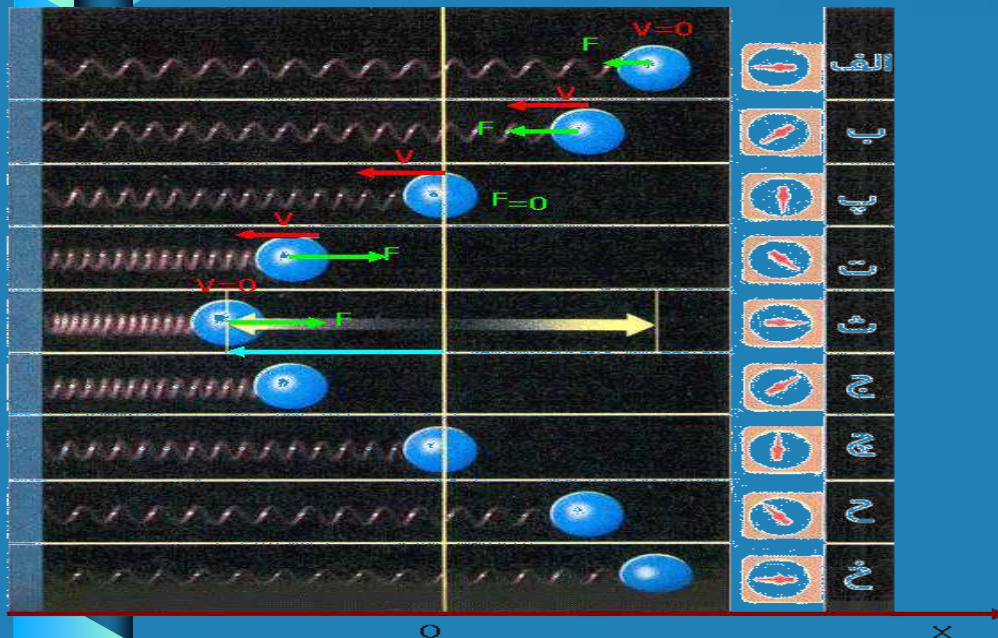
- امواج طولی و عرضی می توانند درون جامدات منتشر شوند.
- امواج عرضی در سطح یک مایع نیز منتشر می شوند، و تنها امواج طولی می توانند در داخل یک شاره منتشر شوند.
- امواجی را که به صورت آشفته‌گی در محیط‌های مادی جامد یا شاره منتشر می شوند برای اشتباه نشدن با امواج الکترومغناطیسی نظیر نور، امواج مکانیکی می نامند.



نظریه ریاضی امواج

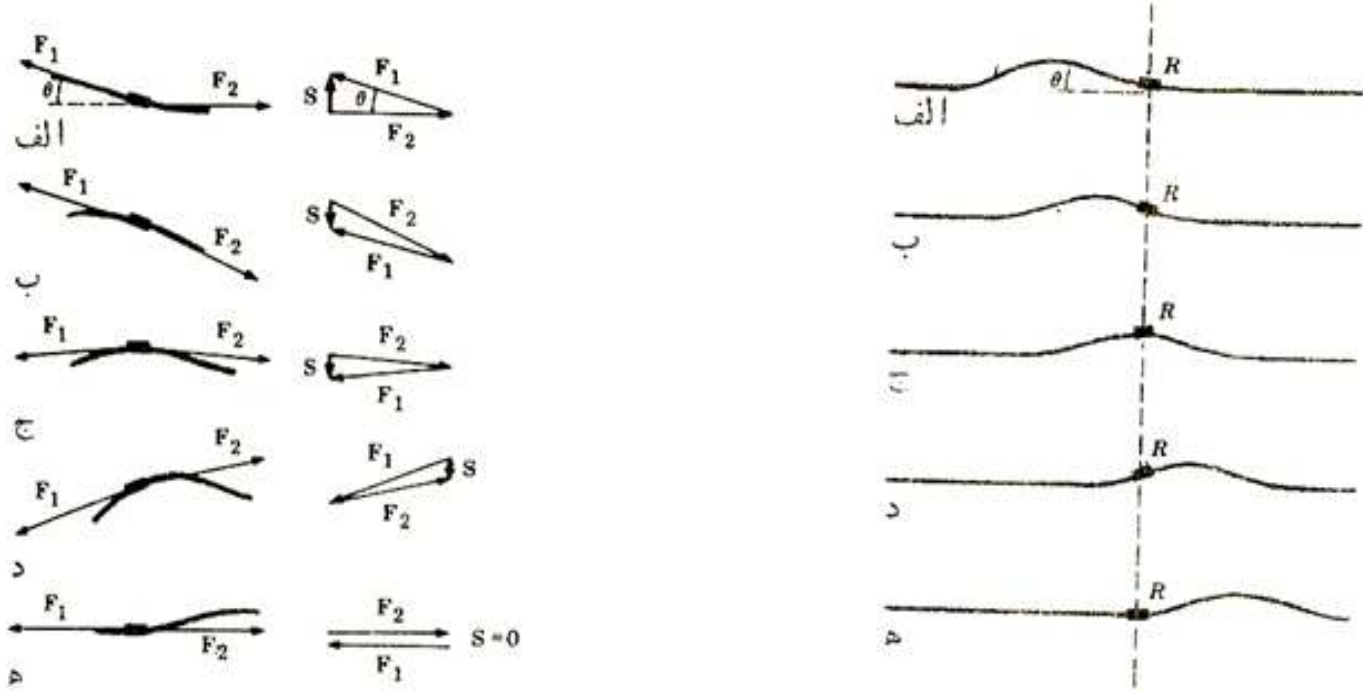
- در نظریه ریاضی امواج فقط جابه جایی های کوچک را در نظر می گیریم. اگر جزئی از ماده اندکی از موضع تعادلش جابه جا شود، به وسیله نیروهای اعمال شده به آن از طرف اجزاء مجاور ماده، به موضع تعادل خود بر می گردد.

- در همین موقع، ماده جابه جا شده بر طبق قانون سوم نیوتن نیروهایی به ماده مجاورش وارد می کند، در نتیجه هنگامی که ماده از موضع تعادل به عقب کشیده می شود، ماده مجاور خود را از موضع تعادل دور می کند. این اجزاء مجاور ماده نیز روی اجزاء مجاور خود اثر می کنند و فرایند تکرار می شود، در نتیجه آشفتگی اولیه در محیط منتشر می شود.



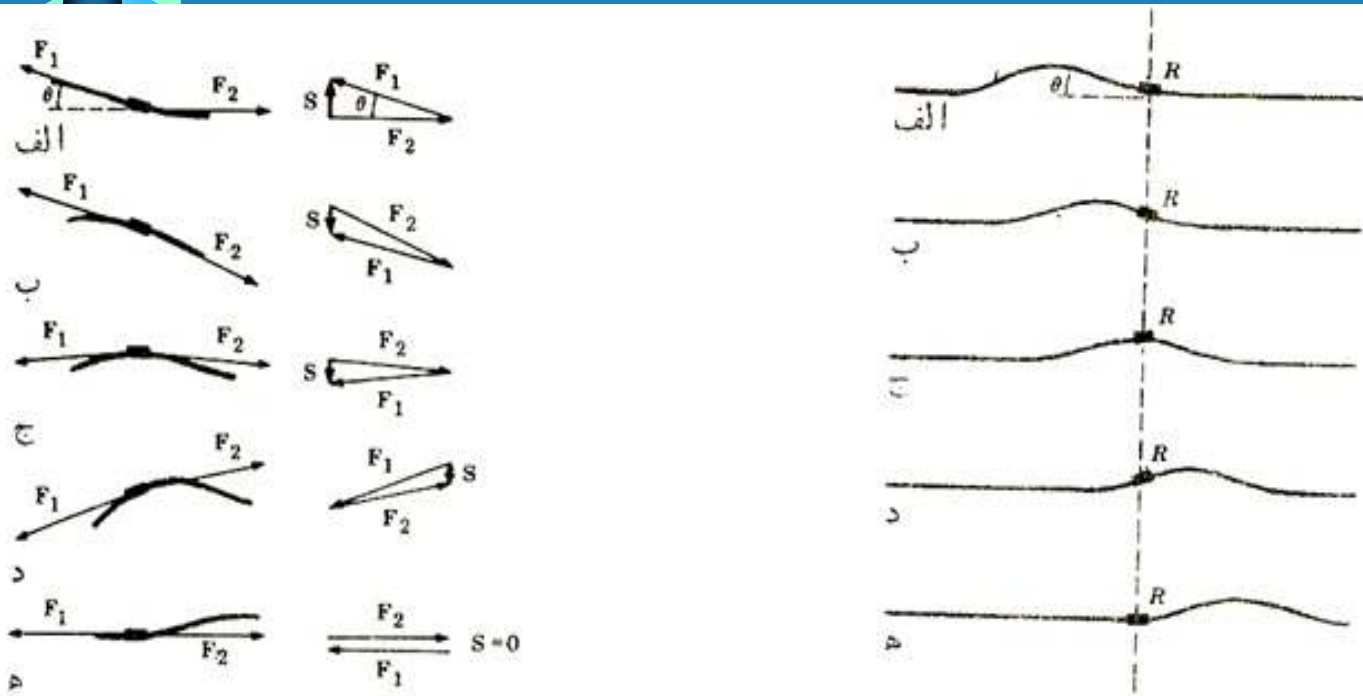
نظریه ریاضی امواج

- شکل زیر مواضع متوالی تپی را که در طول یک ریسمان به طرف راست حرکت می کند، نشان می دهد. قسمت کوچک **R** از ریسمان طوری مشخص شده است که بتوان حرکت آن را هنگام عبور تپ مطالعه کرد.
- در شکل الف تپ در حال رسیدن به **R** است. چون **R** هنوز شروع به حرکت نکرده است، سرعت قائم آن صفر است. در همین لحظه، ریسمان نیروهای **F1** و **F2** را به دو سر **R** اعمال می کند. بزرگی نیروهای **F1** و **F2** مساوی با **T** (کشش ریسمان) است و مجموع **S=F1+F2** صفر نیست. شکل الف نشان می دهد که جهت **S** به طرف بالا و راستای آن بر ریسمان عمود است.
- طبق قانون دوم نیوتن، جزء **R** شتاب رو به بالای **a=S/m** را پیدا می کند، که در آن **m** جرم ریسمان جزء **R** است. هنگام حرکت تپ در طول ریسمان، این شتاب باعث می شود که **R** به طرف بالا حرکت کند.



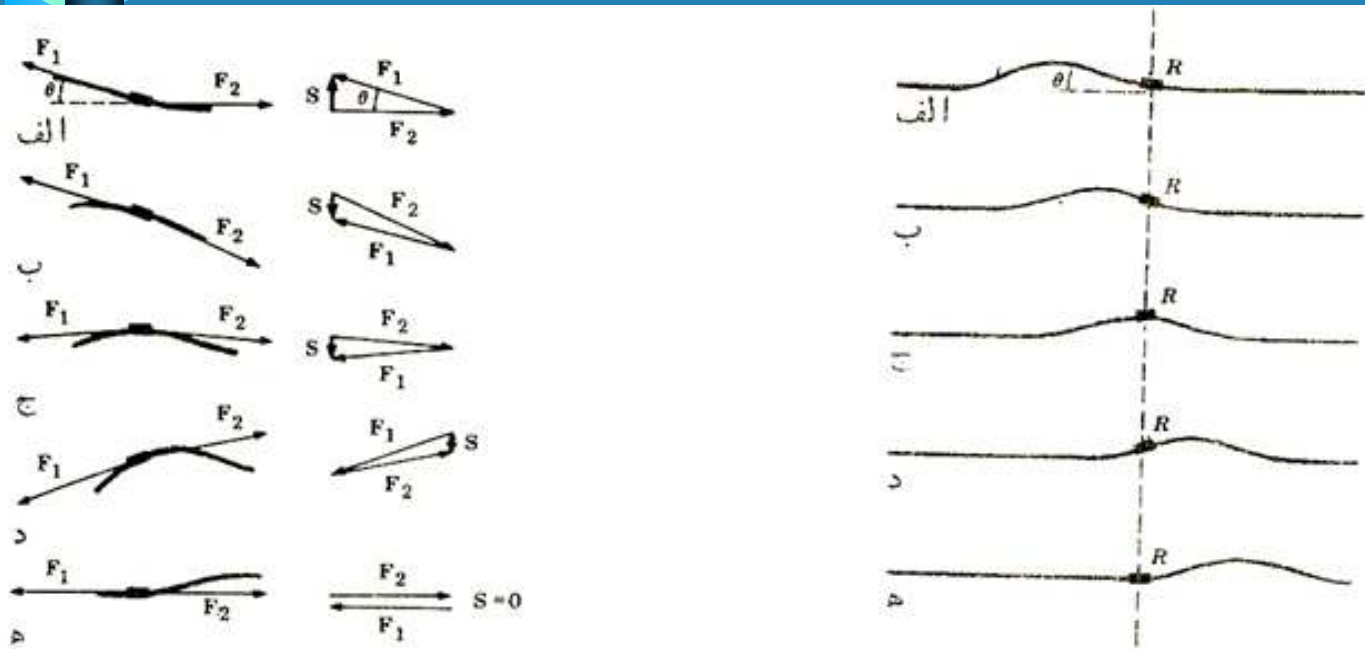
نظریه ریاضی امواج

- لحظه کوتاهی بعد از این، R سرعت رو به بالای قابل ملاحظه ای به دست می آورد و در وضعیت نشان داده شده در شکل ب قرار می گیرد. اما همان طوری که در شکل ب نشان می دهد، در این حالت جهت نیروی برآیند S که بر R وارد می شود، به طرف پایین است. منظور این است که R با سرعت در حال کاهش به حرکت خود به طرف بالا ادامه می دهد.
- وقتی که جابه جایی R ماکزیمم می شود (ج)، سرعت R دوباره صفر می شود. در این حالت کشش ریسمان نیروی رو به پایین S را به R وارد می کند (ج)، و در نتیجه R با سرعت در حال افزایش به طرف پایین حرکت می کند.



نظریه ریاضی امواج

- شکل د، **R** را در حالتی نشان می دهد که بیشترین سرعت رو به پایین را دارد، در حالی که شکل د، نشان می دهد که جهت نیروی برآیند وارد شده بر آن به طرف بالا است.
- بنابراین سرعت رو به پایین **R** کاهش می یابد تا آن که **R** به موضع تعادل خود برمی گردد (شکل ه). در موضع تعادل سرعت **R** صفر و شتاب آن نیز صفر است (شکل ه).
- این بحث نشان می دهد که وقتی تپ با سرعت ثابت **V** به طرف راست حرکت کند، هر نقطه از ریسمان با سرعت متغیری در راستای قائم (عرضی) روی ریسمان به حرکت در می آید.



سرعت موج

- در حالت خاصی می توان نشان داد که سرعت v یک موج در روی ریسمانی به جرم m و طول L ، برابر است با :

- $v = \sqrt{[T/(m/L)]}$

- در این رابطه T کشش ریسمان است. کمیت m/L جرم واحد طول، یا چگالی خطی ریسمان است. بنابراین، اگر

- $\mu = m/L$

- باشد، سرعت موج برابر است با :

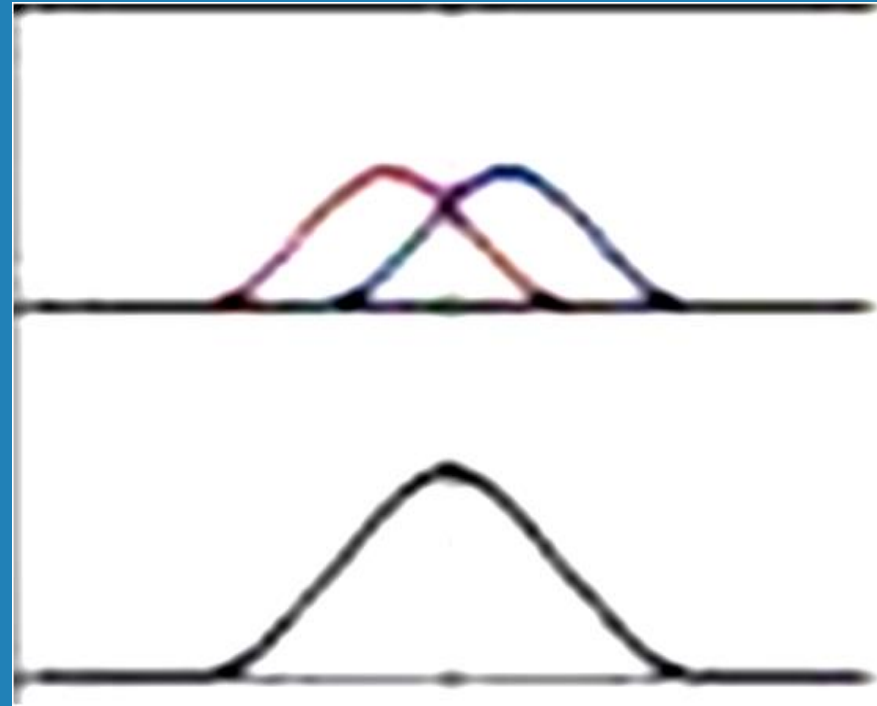
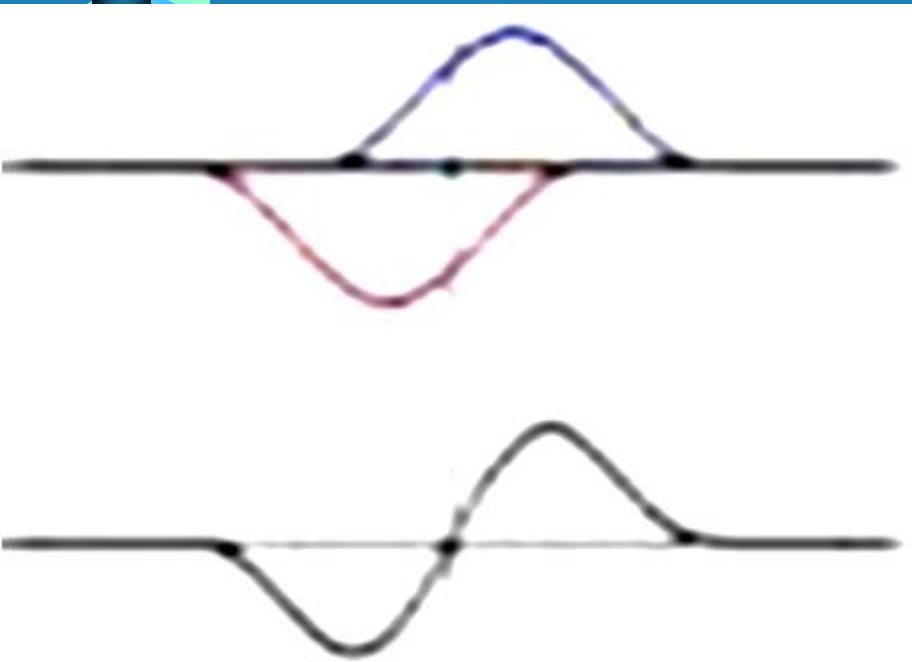
- $v = \sqrt{[T/\mu]}$

- این معادله نشان می دهد که سرعت یک موج در روی ریسمان کشیده شده، با جذر کشش آن نسبت مستقیم و با جذر جرم واحد طول آن نسبت معکوس دارد.



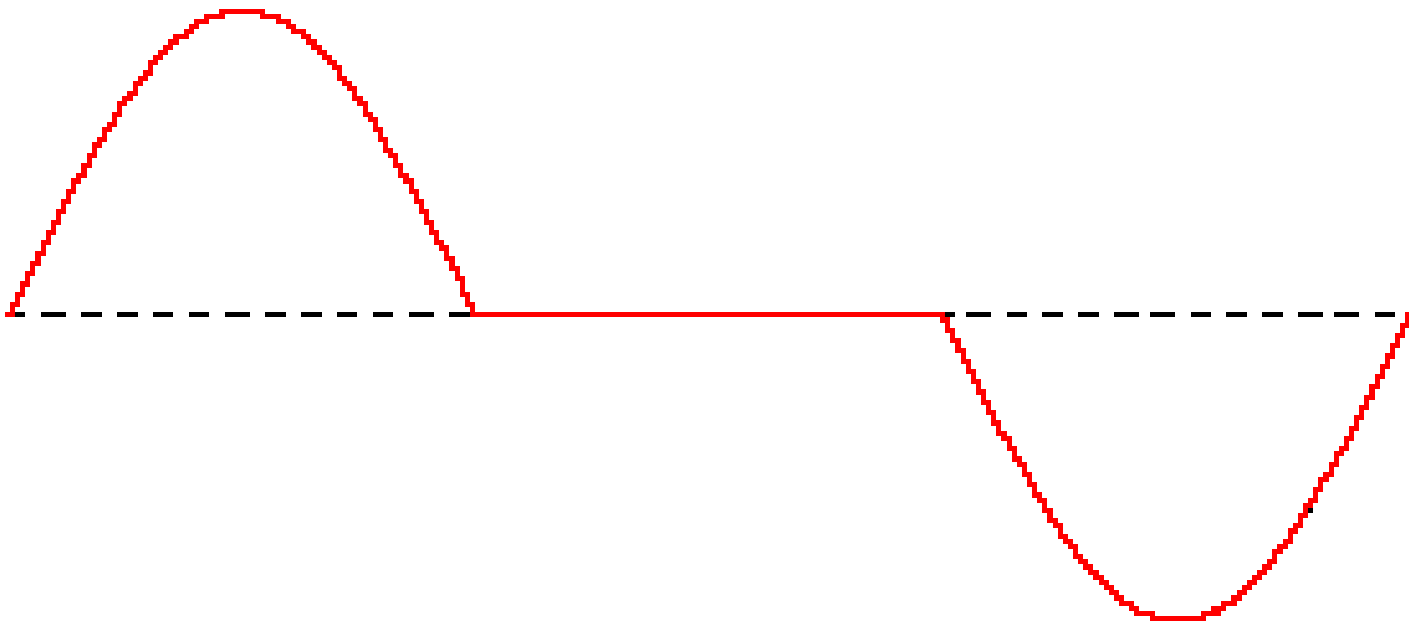
برهم نهش موج

- در یک نقطه از محیط به طور همزمان ممکن است بیش از یک موج وجود داشته باشد. همین خاصیت امواج آنها را با اجسام مادی متمایز می کند.
- دو تپی که در ریسمان به طرف هم حرکت می کنند، بدون تغییر از هم می گذرند و به حرکت ادامه می دهند. اجسام مادی به این صورت در هم نفوذ نمی کنند. اما موج یک جسم مادی نیست. یک موج، نقشی از جابه جایی های نقاط محیط مادی است که در محیط منتشر می شود.
- اصل برهم نهش : اگر در هر لحظه ای دو یا چند موج به طور همزمان به یک نقطه برسند، جابه جایی آن نقطه با مجموع جابه جایی های تک تک امواج برابر است. هنگام به کار بردن این اصل، جابه جایی های یک طرف موضع تعادل را مثبت، و جابه جایی های طرف دیگر را منفی در نظر می گیریم.



برهم نهش موج

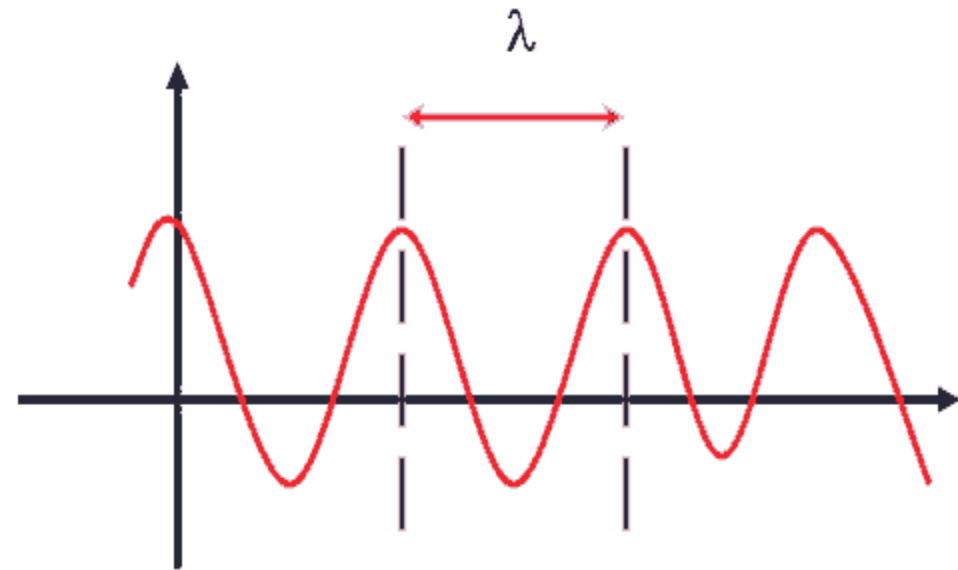
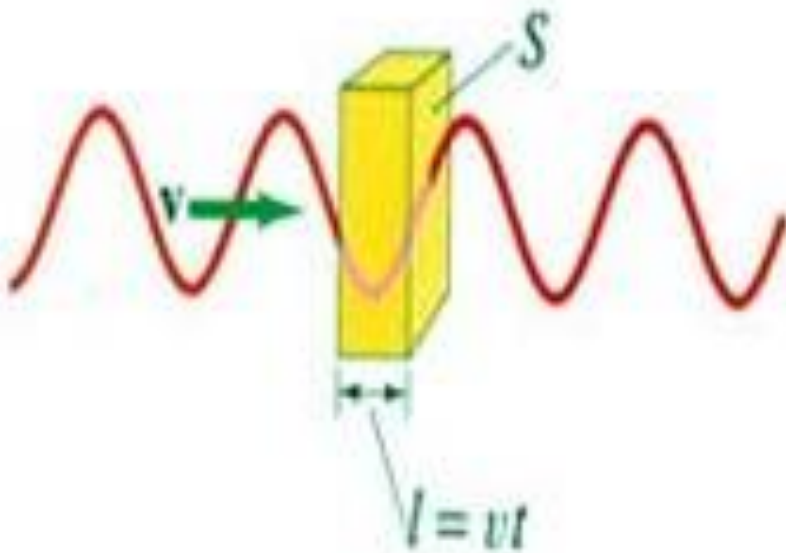
- اصل بر هم نهش علاوه بر جابه جایی برای سرعت نیز معتبر است. یعنی سرعت واقعی هر نقطه از ریسمان با مجموع سرعت های تک تک تپ ها برابر است. پس، هنگامی که دو تپ کاملاً به طور متقابل قرار می گیرند، برای لحظه ای با هم ترکیب شده و موجی تولید می کنند که جابه جایی در یک نقطه صفر است ولی سرعت آن نقطه صفر نیست. هر نقطه از این موج با سرعتی مساوی با مجموع سرعت های تک تک تپ ها، از موضع تعادل می گذرد.



طول موج و بسامد

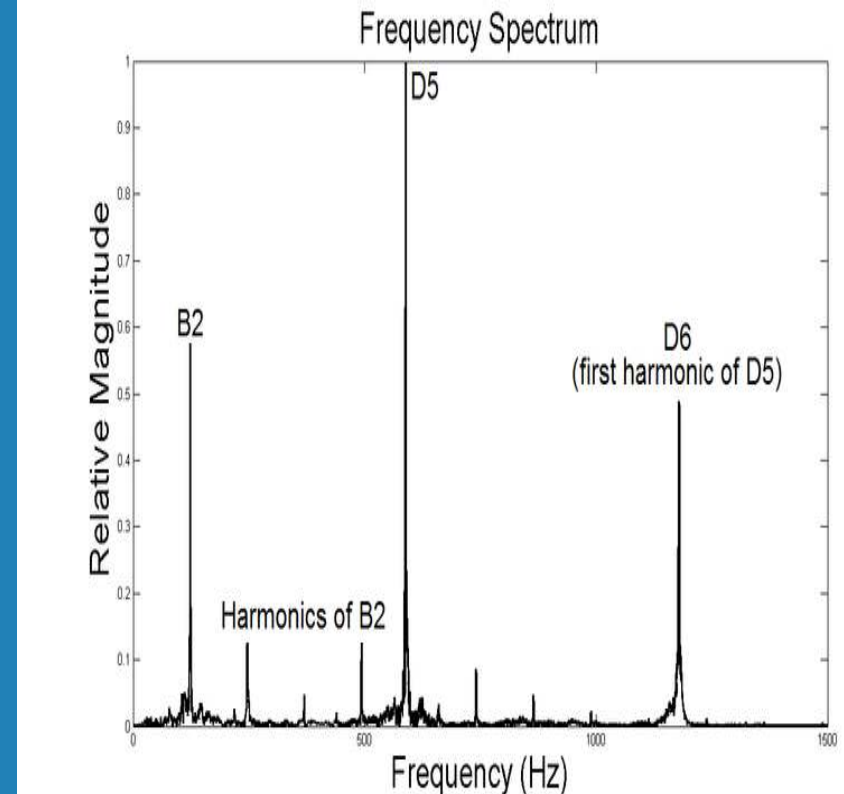
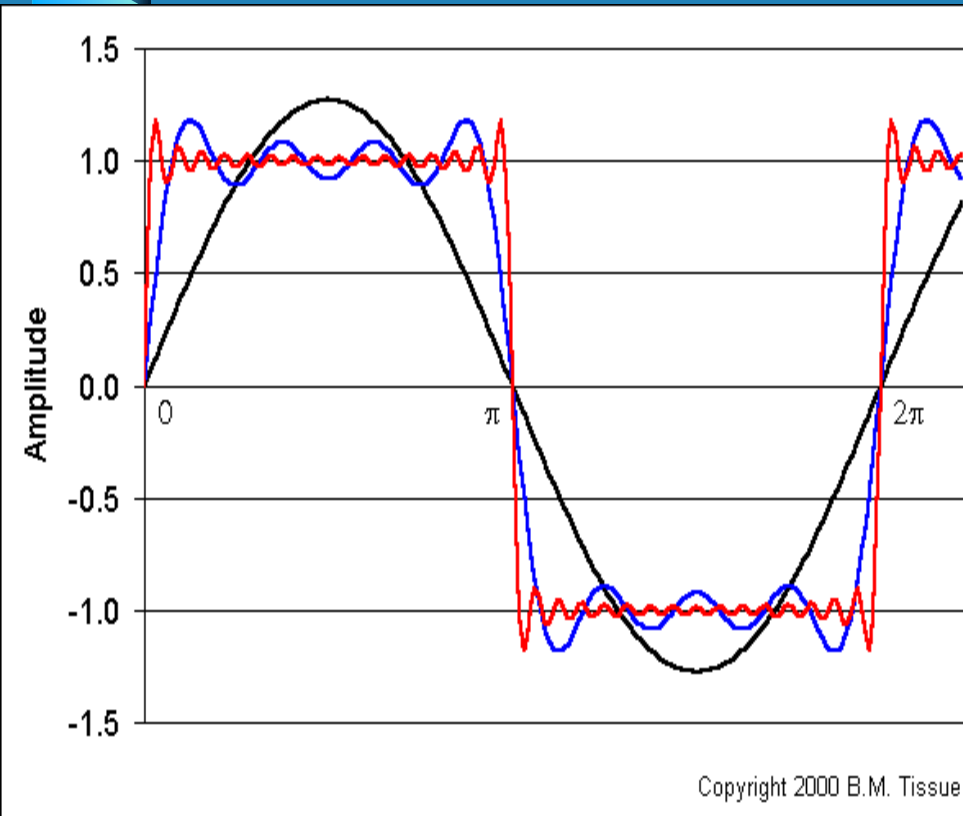
- بسامد از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا برای صوت و نور یک مفهوم روانی فیزیولوژیکی دارد. طنین (تون) یک صوت به بسامد صوت بستگی دارد، و رنگ یک جسم به بسامد موج نوری که از آن به ما می رسد مربوط است.

- برای نمونه، تون موسیقی **A** (یا **La3**) یک موج صوتی با بسامد تقریبی ۴۴۰ هرتز، و رنگ آبی در رنگین کمان، یک موج نوری با بسامد تقریبی $10^{14} \times 7.5$ هرتز است.



قضیه فوریه

- هر موجی با هر شکلی را می توان به صورت مجموعه ای از امواج سینوسی با طول موج ها و دامنه های معین توصیف کرد.

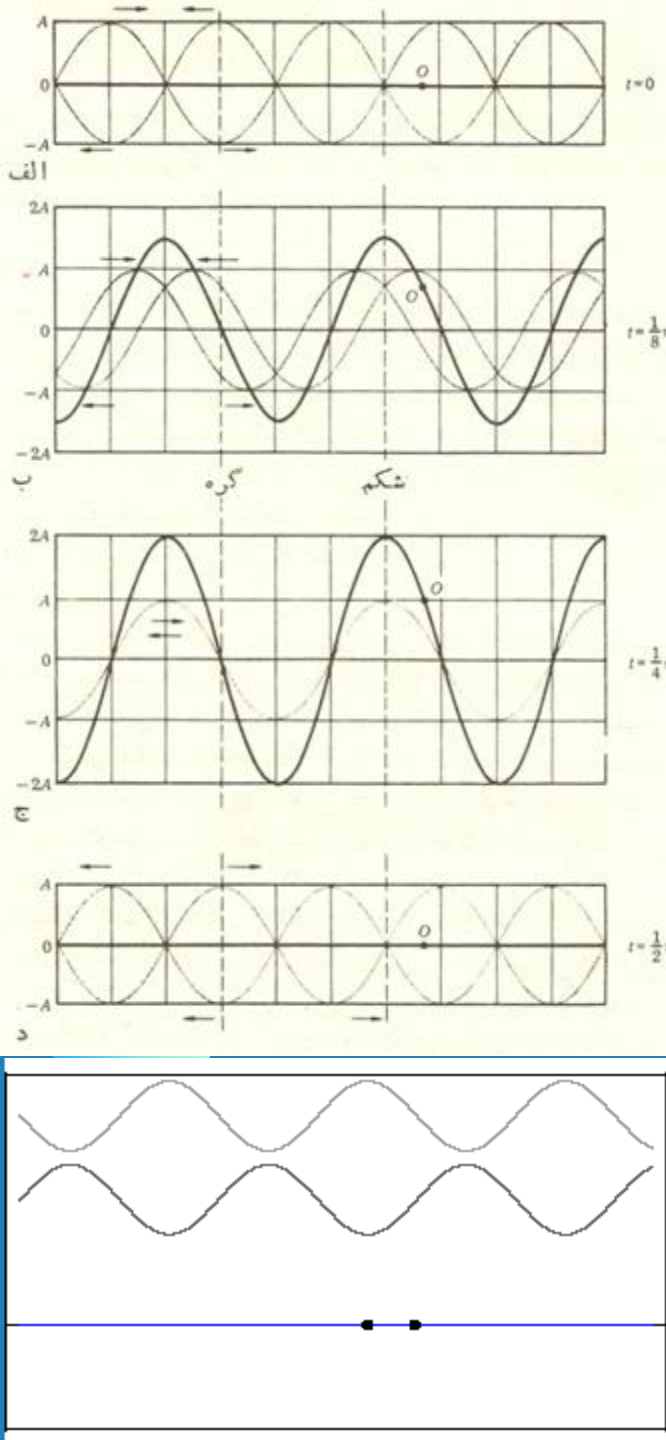


امواج ایستاده

- از بر هم نهش دو موج سینوسی که طول موج و دامنه آنها مساوی است و در جهت های مخالف یکدیگر حرکت می کنند، نقش موج ویژه ای تولید می شود.

- در یک لحظه معین ($t=0$)، هنگامی که این دو موج سینوسی در وضعیت های نشان داده شده در شکل الف قرار دارند، جابه جایی بر هم نهش آنها (منحنی پر رنگ) در هر نقطه از محیط صفر است.

- بعد از گذشت یک چهارم دوره تناوب ($t=1/4T$)، یکی از موج های سینوسی به اندازه یک چهارم طول موج به طرف راست و موج سینوسی دیگر به اندازه یک چهارم طول موج به طرف چپ حرکت می کند، این امر باعث می شود که دو موج مطابق شکل ج طوری بر هم منطبق شوند که از بر هم نهش آنها موج سینوسی دیگری با دامنه $2A$ به وجود آید.

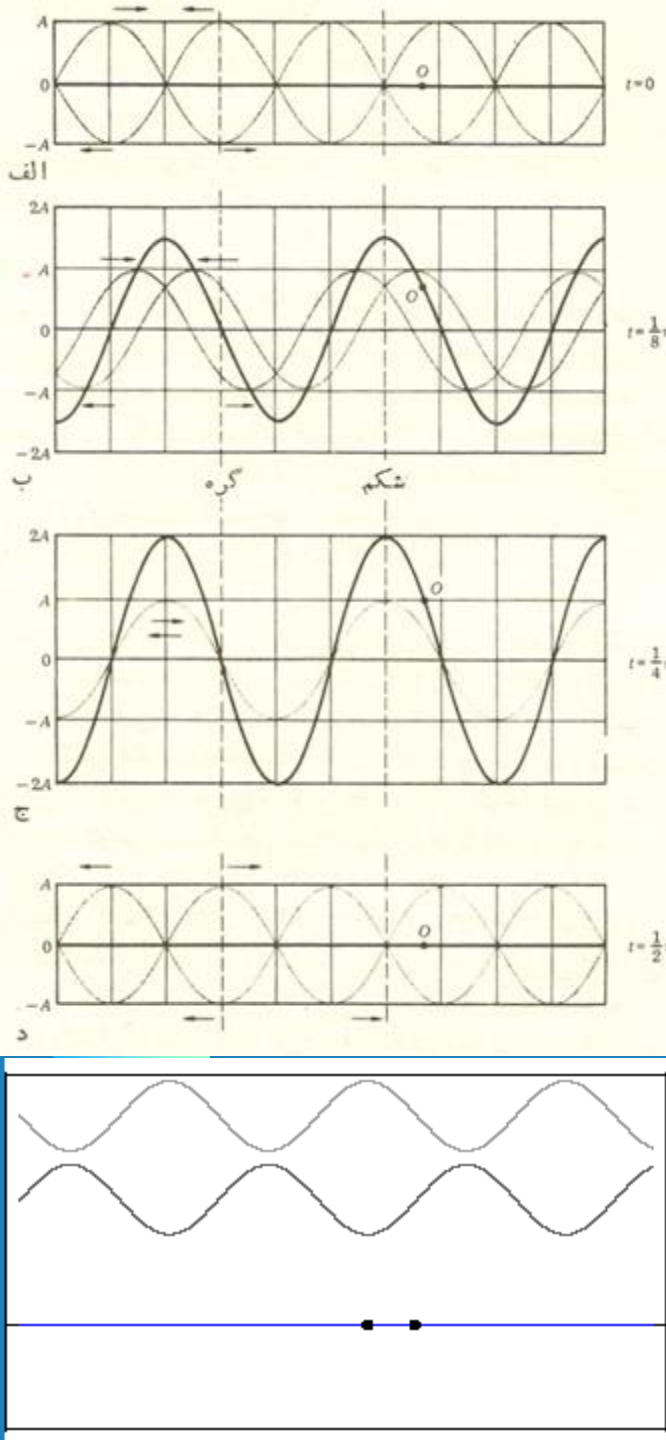


امواج ایستاده

• شکل ب نشان می دهد که حاصل بر هم نهش امواج فوق در یک لحظه میانی ($t=1/8T$) نیز یک موج سینوسی است، ولی دامنه آن کمتر از $2A$ است.

• شکل د نشان می دهد که در لحظه $t=1/2T$ نیز وضعیت به همین ترتیب است.

• هنگامی که دو موج سینوسی به طرف یکدیگر حرکت می کنند، نتیجه بر هم نهش آنها یک موج سینوسی با دامنه متغیر است که دارای نقاط ثابتی با جابه جایی صفر است.



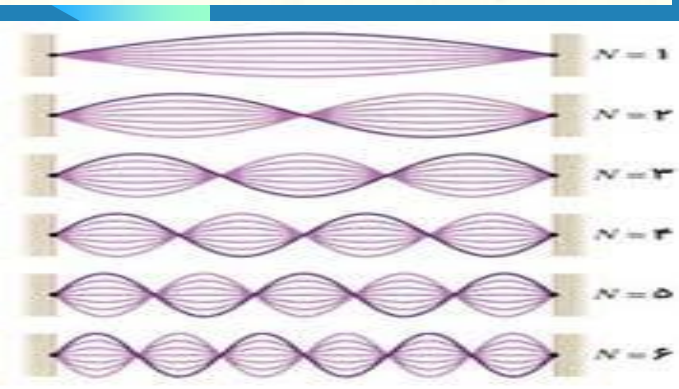
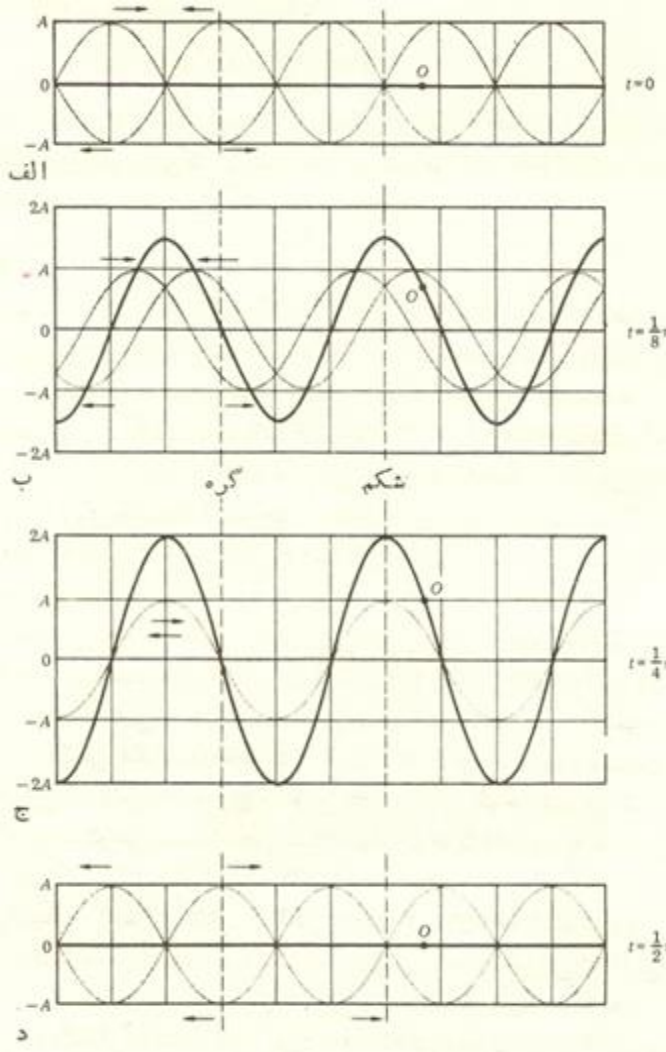
امواج ایستاده

- جابه جایی نهایی محیط در لحظات مختلف در شکل زیر نشان داده شده است. این نوع نقش موج را یک موج ایستاده می نامند، زیرا اگر چه این نقش با زمان تغییر می کند، ولی در طول ریزمان حرکت نمی کند.

- در این نقش موج، نقاطی با جابه جایی صفر، یا گره ها، نقاطی هستند که فاصله آنها از یکدیگر با نصف طول موج مساوی است.

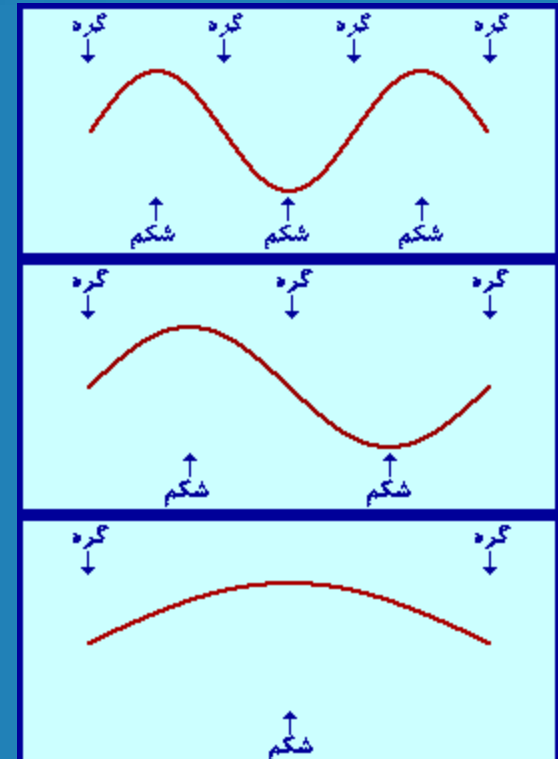
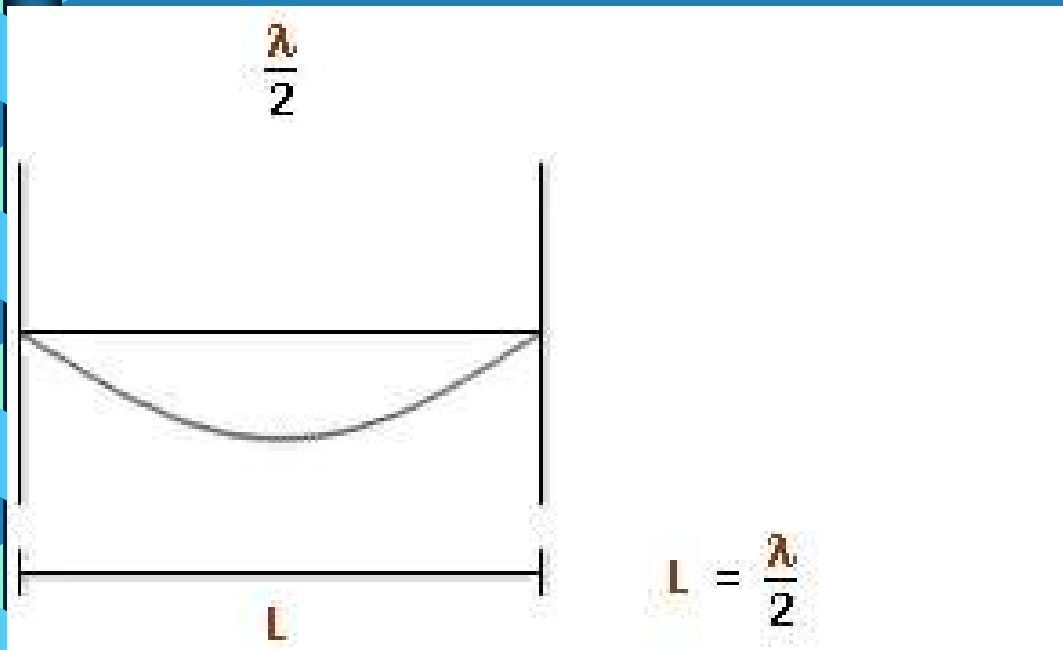
- نقطه ای از محیط که در محل گره قرار دارد نوسان قائم نمی کند، در حالی که نقطه واقع در وسط دو گره (که شکم نامیده می شود)، حرکت هماهنگ ساده با دامنه $2A$ انجام می دهد. نقاط واقع در میان گره و شکم، بین صفر و $2A$ تغییر می کند.

- تمام نقاط یک موج ایستاده در مدت زمان T که با دوره تناوب امواج سینوسی به وجود آورنده آن مساوی است، یک نوسان کامل انجام می دهند.



امواج ایستاده

- امواج ایستاده بسیار مهم اند زیرا در هر فضای محدودی قابل تولیدند.
- هنگام مطالعه حرکت موجی یک محیط محدود، مثلاً سیم گیتار که مانند یک ریسمان دارای طول L بوده و در دو انتها ثابت شده است، امواج ایستاده به عنوان امواج طبیعی در نظر گرفته می شوند.
- یک موج سینوسی تنها که در یک راستا حرکت می کند، نمی تواند روی ریسمان به وجود آید زیرا برای تولید چنین موجی لازم است که نقاط انتهایی ریسمان نوسان کنند. اما یک موج ایستاده می تواند روی ریسمان به وجود بیاید مشروط بر این که در انتهای ریسمان گره تولید شود.



امواج ایستاده

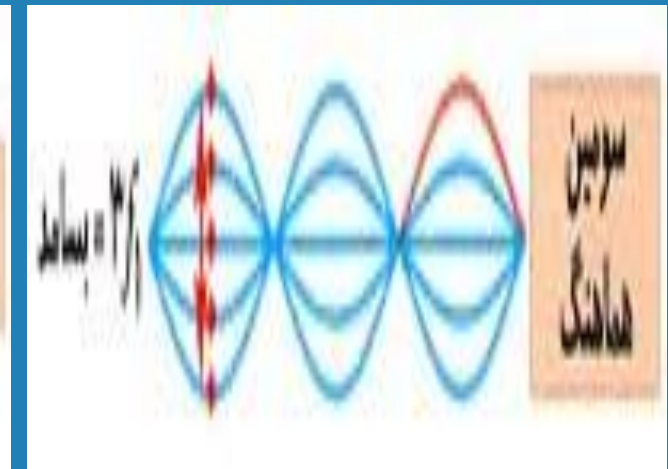
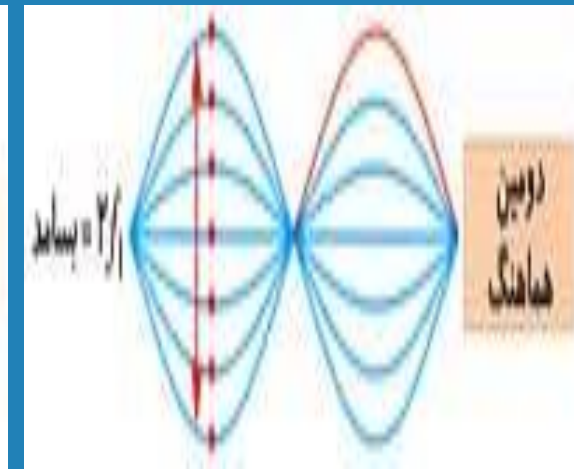
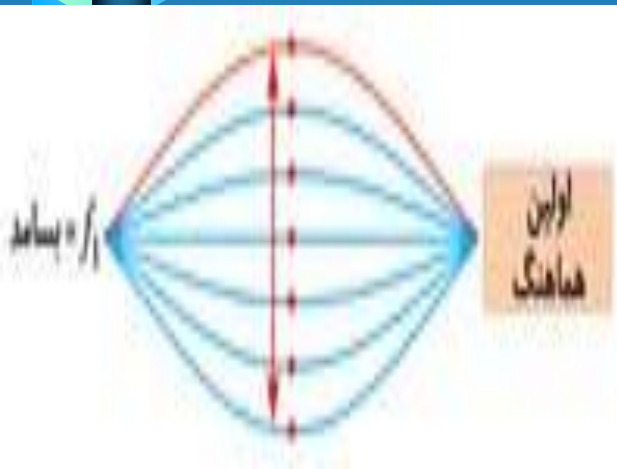
- شکل زیر چندین امکان تولید امواج ایستاده در روی ریسمانی به طول L را نشان می دهد. شرط گره بودن نقاط انتهایی ریسمان، اندازه طول موج های امواج ایستاده را محدود می کند. چون گره ها در فواصل $\lambda/2$ تولید می شوند، و چون تعداد درستی از این نصف طول موج ها در طول ریسمان ایجاد می شوند، طول موج یک موج ایستاده بر طبق رابطه زیر با طول L ریسمان بستگی دارد.

- $n \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda = L$

- که در آن n یک عدد درست است. بنابراین، تنها طول موج هایی که با دو شرط

- $\lambda_n = 2L/n$, $n=1,2,3,\dots$

- سازگارند، می توانند به عنوان امواج ایستاده در روی ریسمان به وجود آیند.



امواج ایستاده

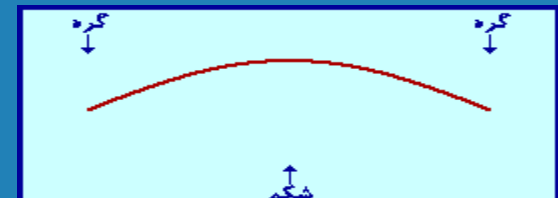
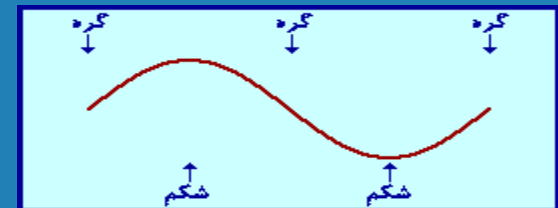
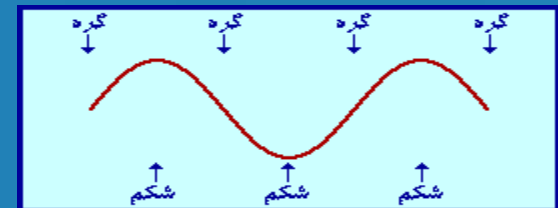
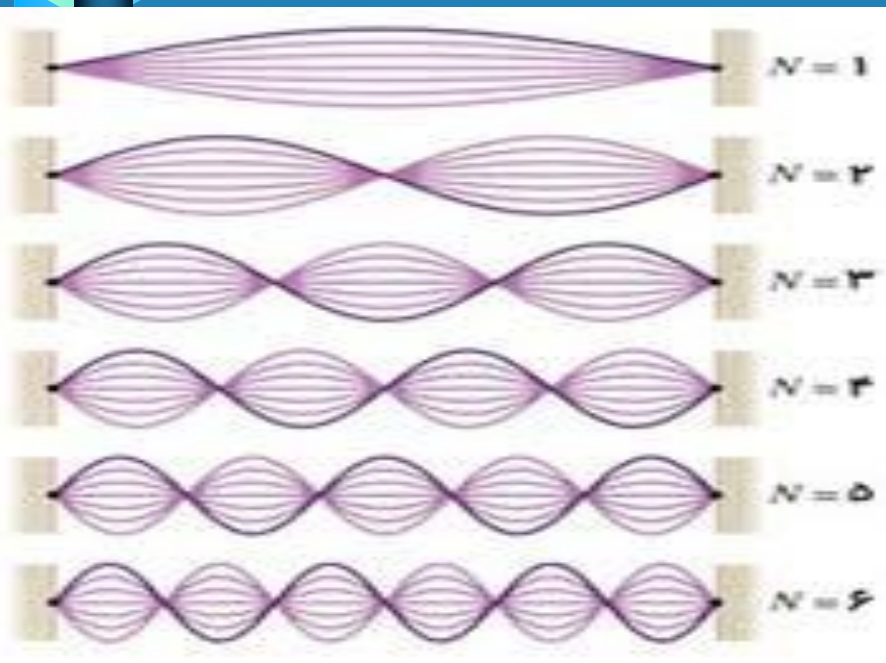
- بسامد نوسان ریسمان به طول موج بستگی دارد. بنابراین ریسمانی که دو انتهای آن ثابت است می تواند تنها با بسامدهای fn نوسان کند :

- $fn = V/\lambda n$

- کمترین بسامد موقعی تولید می شود که $n = 1$ باشد این بسامد را بسامد اصلی می نامند. همه بسامدهای دیگر مضرب درستی از f_1 هستند :

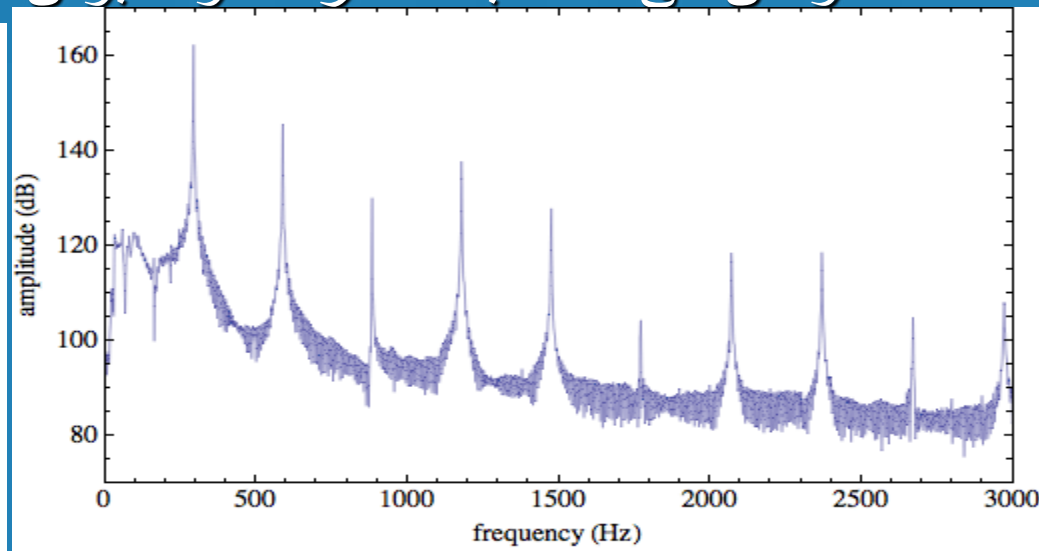
- $fn = nf_1$

- پس، بسامدهای ممکن یک ریسمان در حال نوسان، یک رشته هماهنگ را تشکیل می دهند.



امواج ایستاده

- هنگامی که سیم گیتار را کشیده و رها می کنیم، نوسان حاصل، از بر هم نهش تعداد زیادی امواج ایستاده به وجود می آید.
- معمولاً بسامد اصلی غالب است، یعنی دامنه اش بسیار بزرگتر از دامنه مؤلفه های دیگر است. ریسمان در حال نوسان، هوا را به نوسان در می آورد و یک موج صوتی با همان بسامد تولید می کند. گوش ما این امواج را به صورت یک تون موسیقی با بسامد f_1 می شنود. بسامدهای دیگر (که تون های فرعی نامیده می شوند) در کیفیت این تون مؤثرند.
- تمام وسایل موسیقی سیمی، مانند ویولن، گیتار، چنگ و پیانو به این ترتیب آهنگ تولید می کنند. علت متفاوت بودن کیفیت صوت تولید شده با این وسایل، هنگامی که نوت یکسانی را می نوازند یعنی با بسامد اصلی یکسانی نوسان می کنند، به خاطر متفاوت بودن دامنه تون های فرعی آنها است.

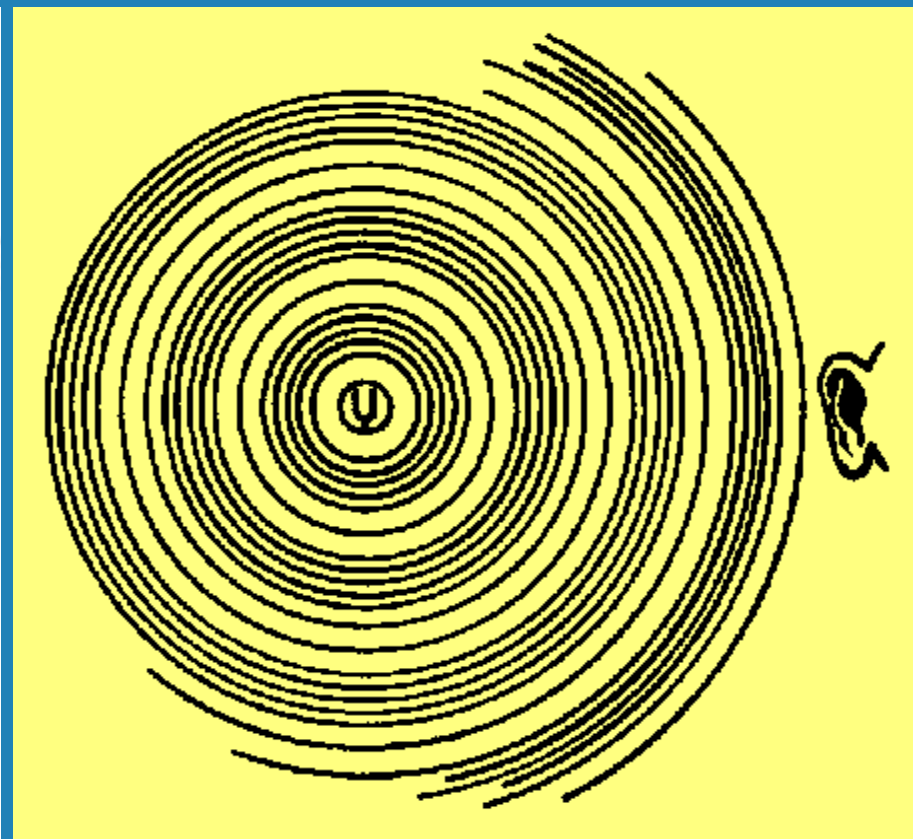
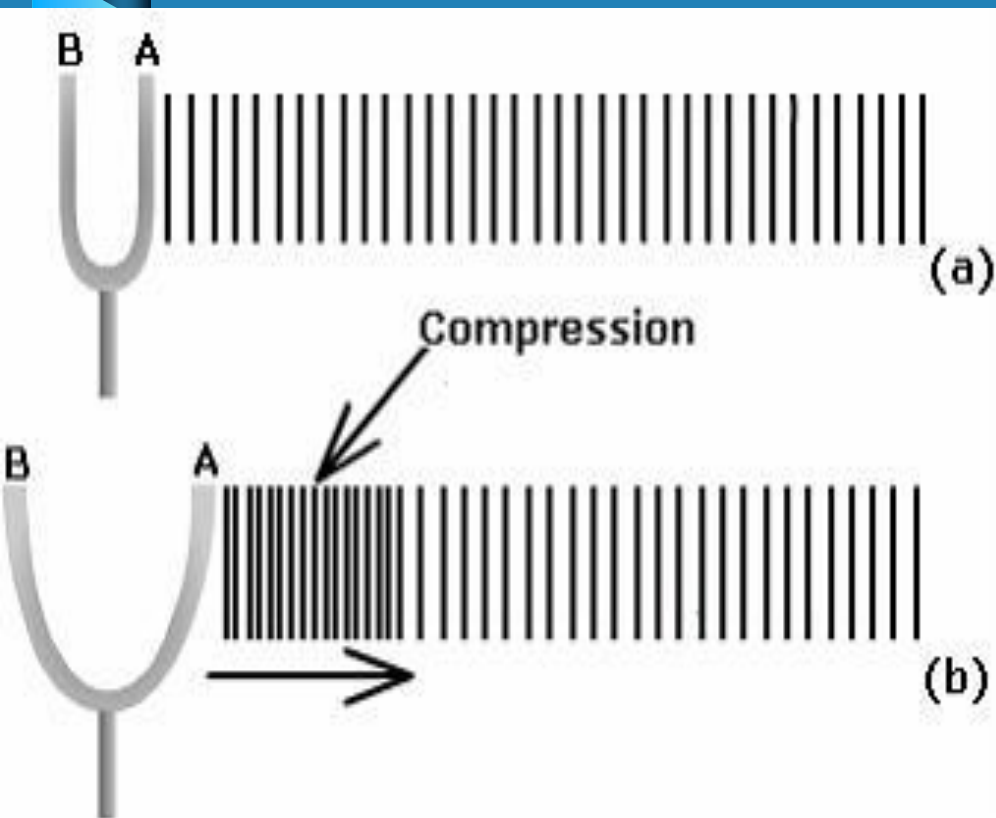


نوت

- یک وسیله موسیقی سیمی با تنظیم کشش سیم هایش کوک می شود. این امر باعث می شود تا سرعت امواج سیم تغییر کند.
- در نتیجه بسامدهای نوسان سیم نیز تغییر می کنند. بعد از کوک کردن ویولن یا گیتار با فشار دادن سیم ها در نقاط مختلف (انگشت گذاری) و در نتیجه با تغییر دادن طول L، می توان نوت های مختلف را نواخت. وسایل دیگر، مانند چنگ و پیانو، تعداد زیادی سیم با چگالی های متفاوت دارند، که هر کدام برای تولید یک نوت معین تنظیم شده اند.

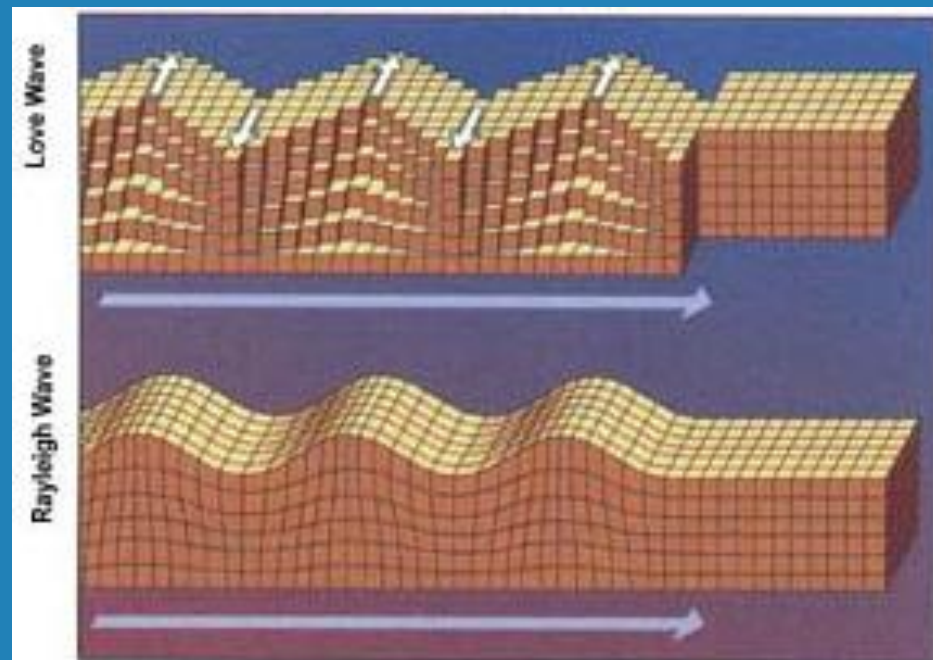
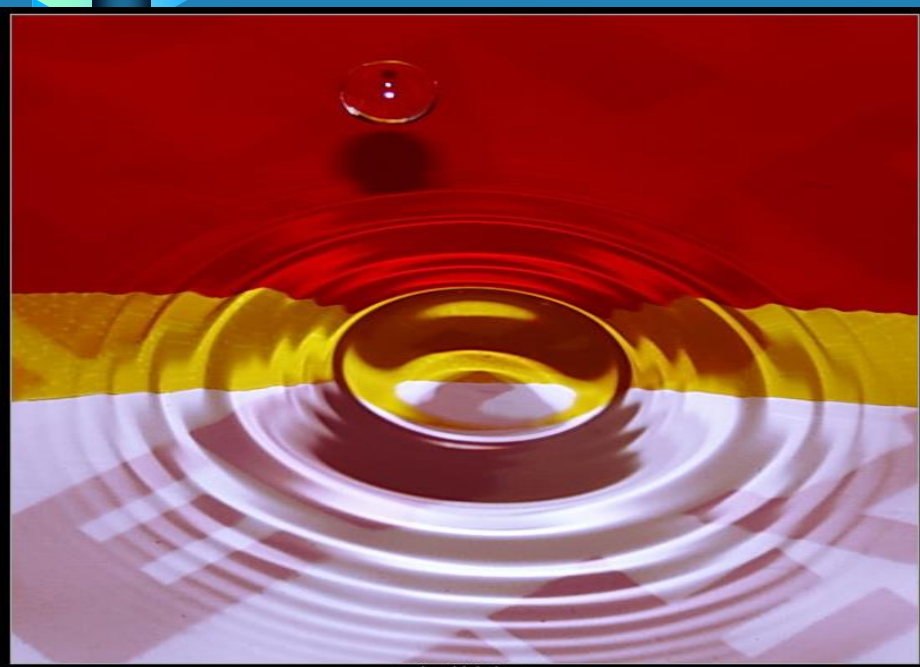
صوت

- صوت یک موج مکانیکی طولی است که در هوا، آب و دیگر محیط‌های مادی منتشر می‌شود. صوت در زندگی همه جانوران عالی اهمیت ویژه‌ای دارد، به همین علت آنها برای تولید و تشخیص امواج صوتی اندام خاصی دارند. جانوران (به ویژه انسان‌ها) به وسیله صوت با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و اطلاعات لازم را از محیط خود به دست می‌آورند.



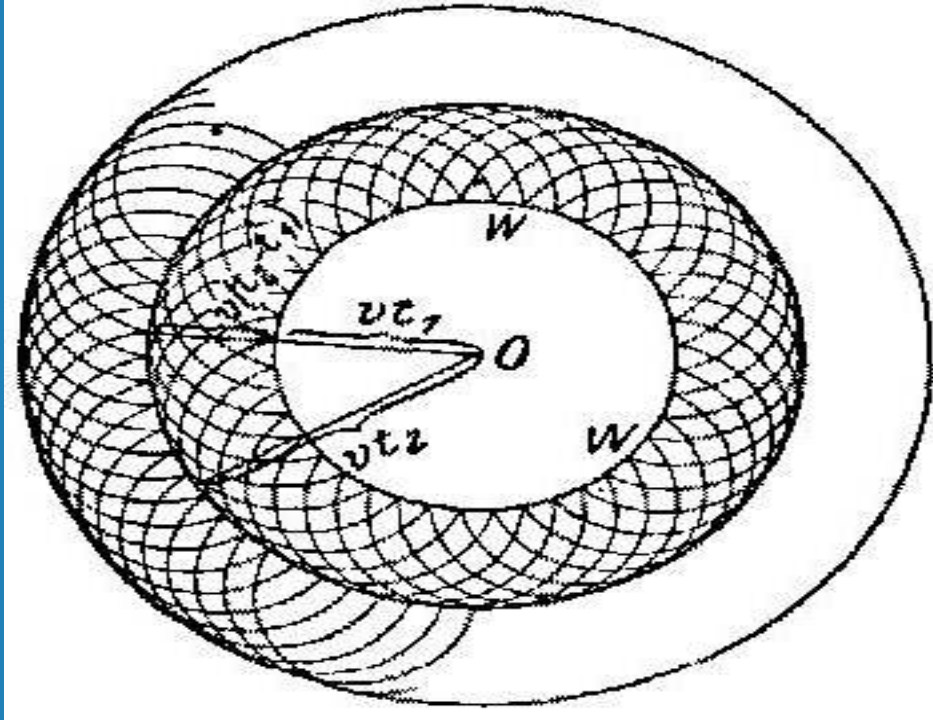
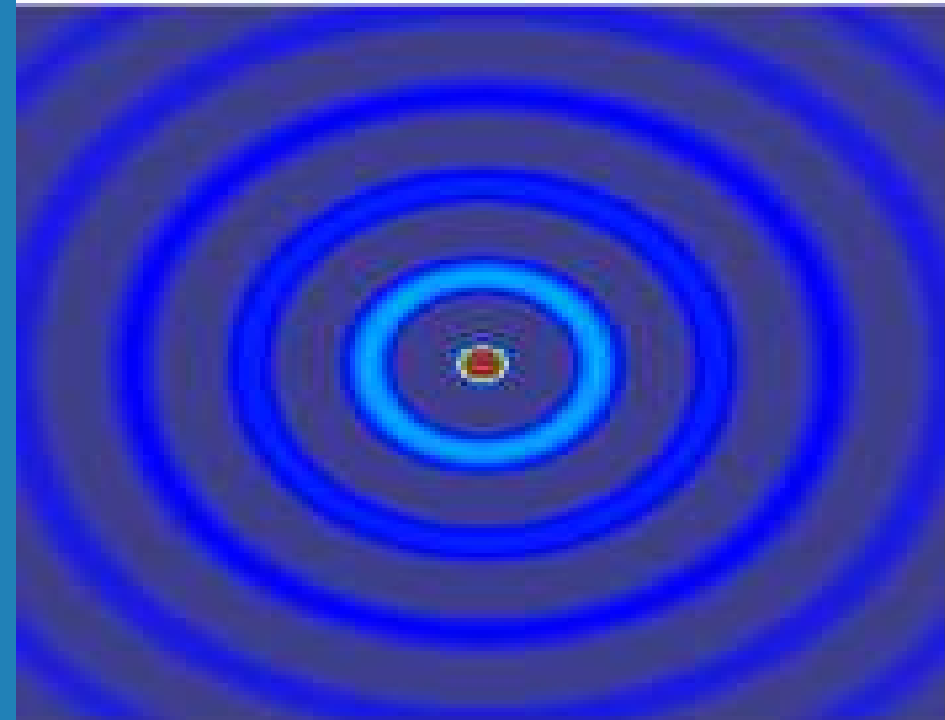
امواج مکانیکی طولی

- موجک های روی سطح آب مثال آشنایی برای امواج در محیط های دو بعدی اند.
- شکل زیر یک محیط سه بعدی را نشان می دهد که در آن یک موج عرضی به موازات محور z حرکت می کند، در حالی که خود محیط به موازات xy نوسان می کند. این موج را یک موج تخت می نامند، زیرا جابه جایی تمام نقاط صفحه عمود بر محور z در هر لحظه با هم مساوی است.
- اگر جابه جایی یک موج تخت در راستای انتشار آن به صورت سینوسی تغییر کند، آن موج را یک موج تخت سینوسی می نامند. این موج شبیه یک موج سینوسی یک بعدی است.



موج کروی

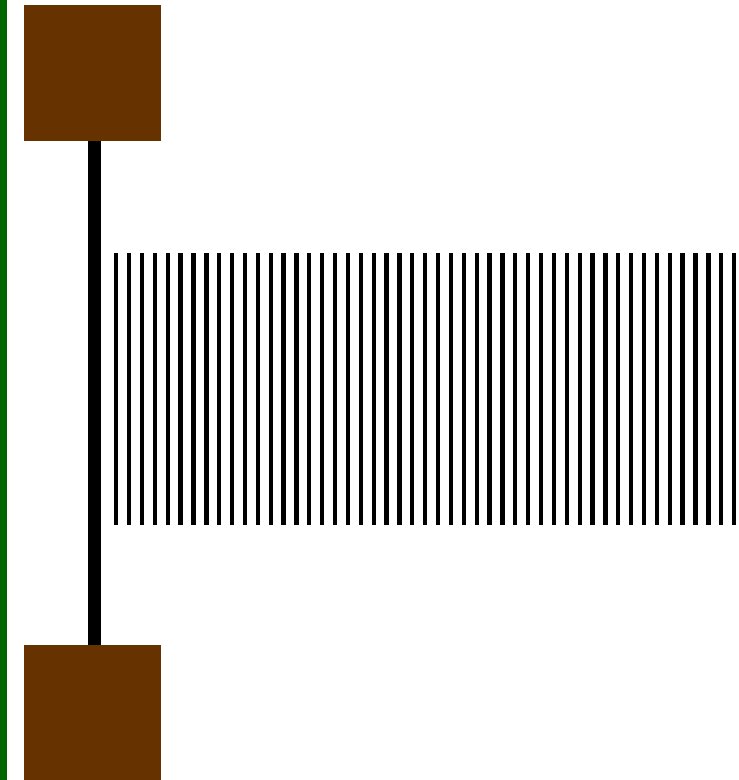
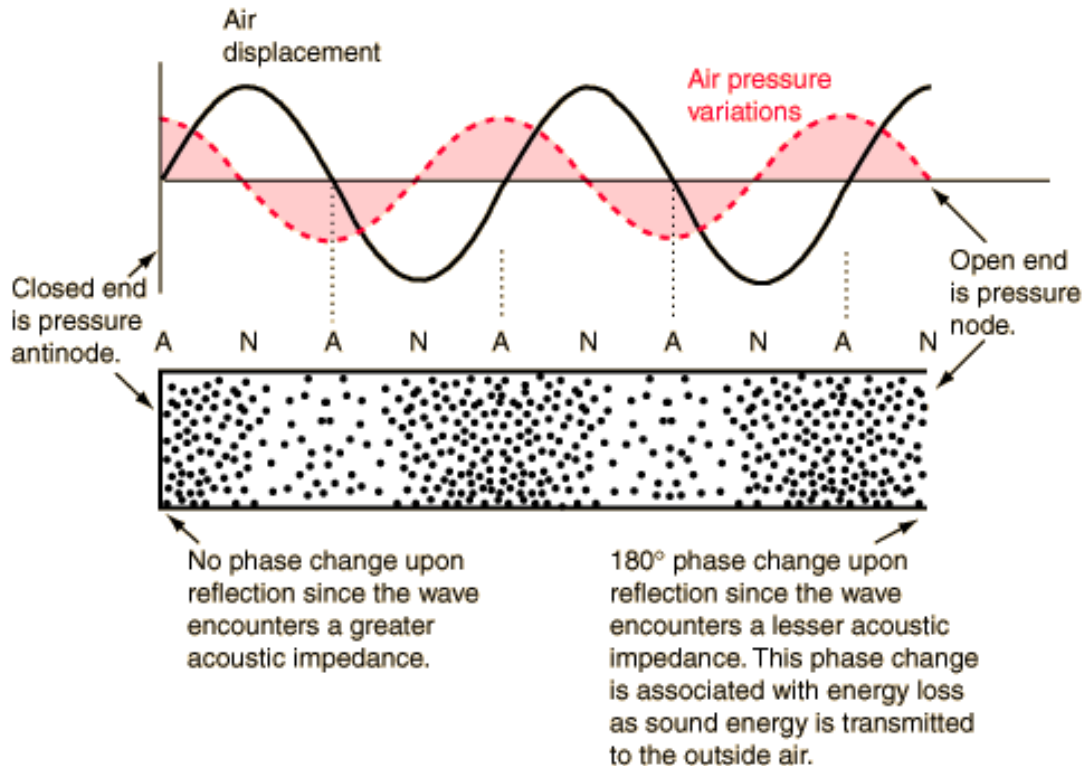
- هنگامی که سنگی در یک استخر می افتد، موجک ها دایر هم مرکزی هستند که در تمام راستاها از محل برخورد سنگ دور می شوند. یک موج مشابه دیگر در محیط سه بعدی، موج کروی است که به صورت کره های هم مرکز از یک نقطه مرکزی دور می شوند.
- در یک موج کروی عرضی، هر نقطه از یک لایه کروی به موازات آن لایه نوسان می کند، در حالی که در یک موج کروی طولی، نقاط روی یک لایه به طور شعاعی به طرف داخل و خارج و حول مواضع تعادل آنها نوسان می کنند. اگر جابه جایی یک موج کروی در راستای هر خط شعاعی به طور سینوسی تغییر کند، آن موج را یک موج کروی سینوسی می نامند.



انتشار موج طولی در هوا

- موقعی که یک موج طولی در هوا منتشر می شود، اجزاء یا عناصر هوا حول موضع تعادل به پس و پیش می روند. شکل زیر جابه جایی ها در یک موج سینوسی، و جهت حرکت عنصرهای هوا را نشان می دهد. جابه جایی مثبت مربوط به جابه جایی یک عنصر به طرف چپ، و جابه جایی منفی مربوط به حرکت عنصر به طرف راست است.

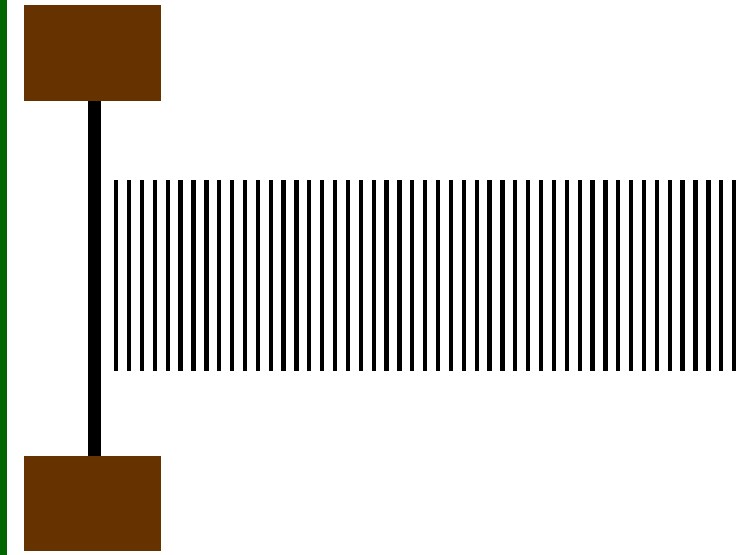
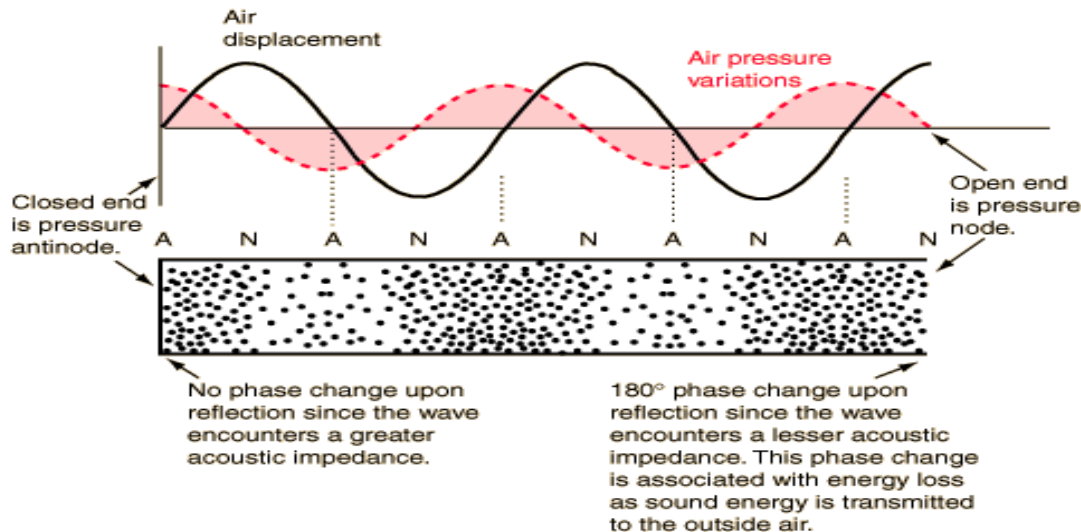
Production of a standing wave in an air column involves reflections from both the closed end and the open end of the column.



فشار در موج طولی

- توجه کنید که عناصر موجود در دو طرف گره متناظر با فشار مثبت در شکل زیر به طرف محل گره حرکت می کنند، در نتیجه چگالی و فشار هوا در این نقطه بیش از حد متعارف است. به همین ترتیب، عناصر هر دو طرف گره متناظر با فشار منفی از این نقطه دور می شوند، در نتیجه چگالی و فشار در این نقطه کمتر از حد متعارف است.
- همان طوری که عناصر هوا حول مواضع تعادلشان نوسان می کنند، فشار هم حول مقدار متعارف خود نوسان می کند. اگر P_0 فشار متعارف و P فشار در نقطه خاصی از یک موج باشد، تغییر فشار Y_p به صورت زیر تعریف می شود:
- $Y_p = P - P_0$
- یک موج طولی، همان طوری که نقش جابه جایی ها است، نقش تغییرات فشار نیز است.

Production of a standing wave in an air column involves reflections from both the closed end and the open end of the column.



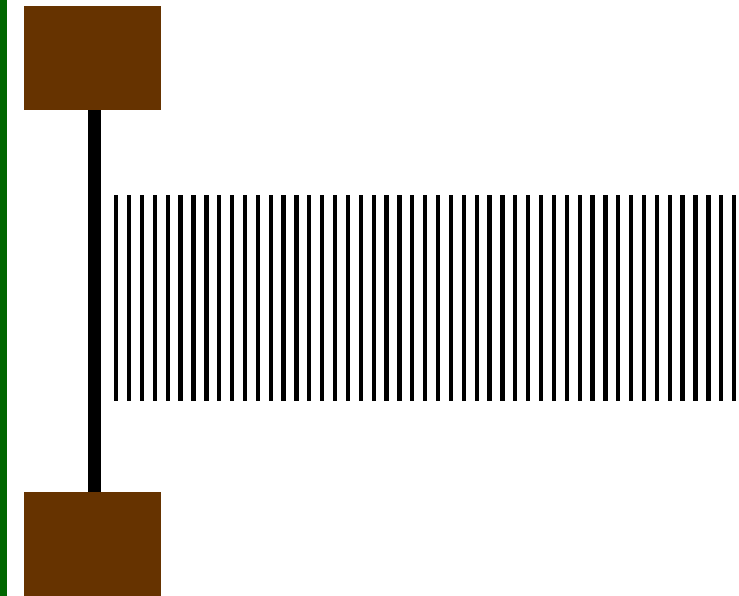
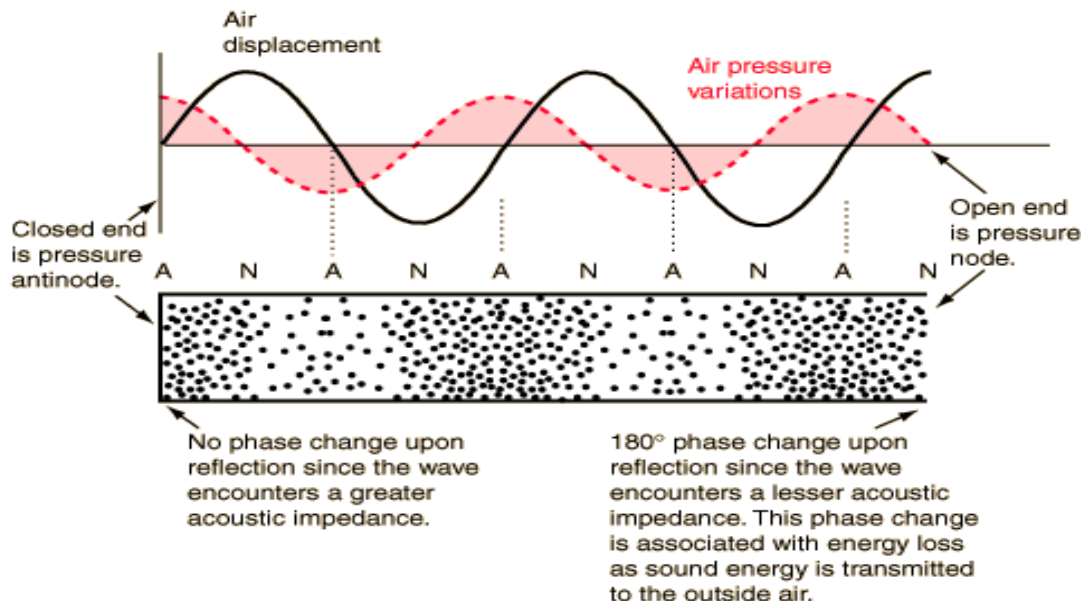
تغییرات فشار موج طولی

- تغییرات فشار برای موج طولی در شکل زیر نشان داده شده است. می بینیم که منحنی این تغییرات درست مانند موج جابه جایی به صورت سینوسی است، با این تفاوت که شکم های آن بر گره های موج جابه جایی منطبق است و بر عکس.
- موج فشار را می توان به صورت زیر نوشت :

- $$Y_p = A_p \sin[2\pi(x/\lambda)]$$

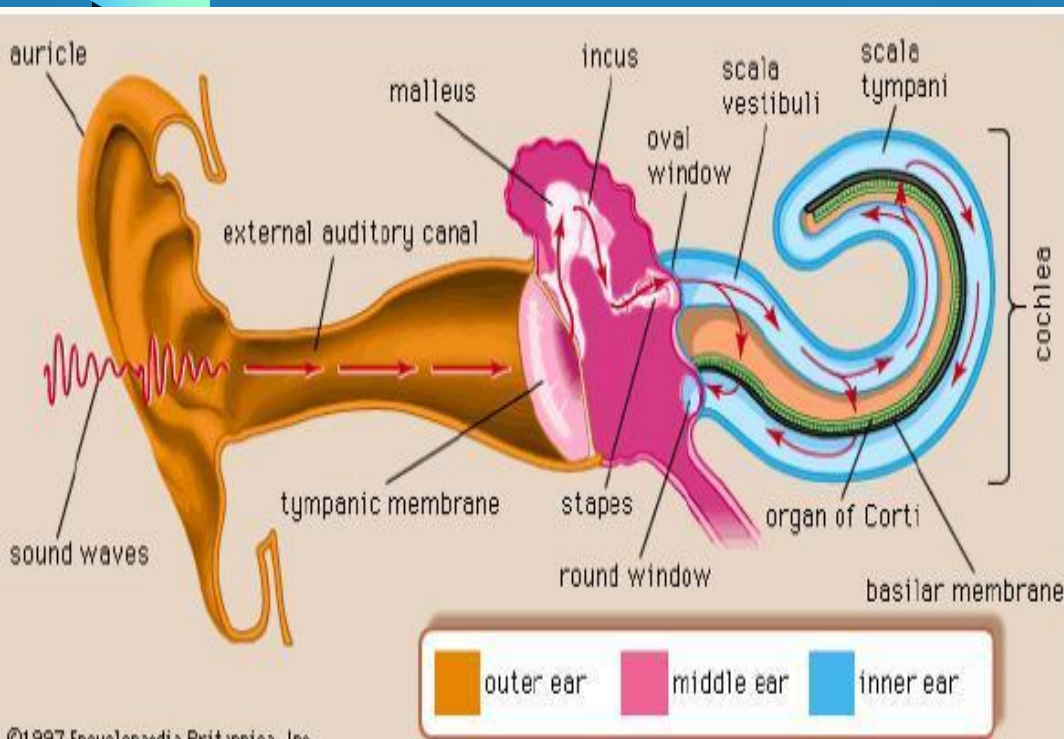
- که در آن دامنه فشار **A_p** معرف حداکثر اختلاف میان فشار موج و فشار متعارف است. غالباً بهتر است که یک موج طولی را به جای جابه جایی، مانند یک موج فشار در نظر بگیریم، زیرا معمولاً ما تغییرات فشار را آشکار و اندازه گیری می کنیم.

Production of a standing wave in an air column involves reflections from both the closed end and the open end of the column.

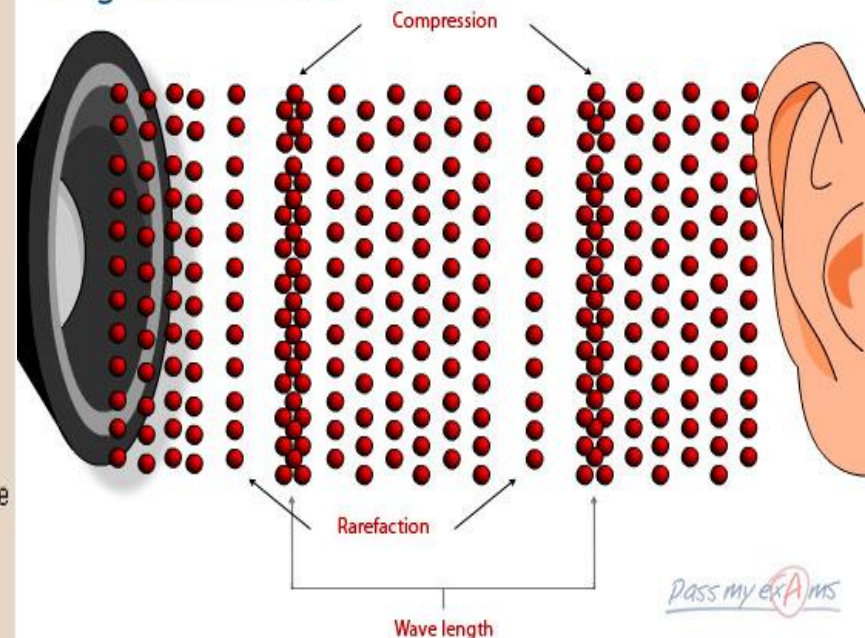


امواج مکانیکی طولی و گوش انسان

- امواج مکانیکی طولی که بسامد آنها در گستره میان ۲۰ و ۲۰۰۰۰ هرتز قرار دارد، توسط گوش انسان به صورت صوت شنیده می شود.
- امواجی با بسامدهای بالاتر از ۲۰۰۰۰ هرتز را امواج فرا صوتی، و امواجی با بسامدهای کمتر از ۲۰ هرتز را امواج فرو صوتی می نامند. چون این دسته بندی به سازوکار شنوایی انسان بستگی دارد، از این رو معنی فیزیکی ویژه ای ندارد. اما معنی و مفهوم عملی دارد زیرا ما برای آشکارسازی امواج فرا صوتی و فرو صوتی، به وسیله خاصی نیازمندیم.

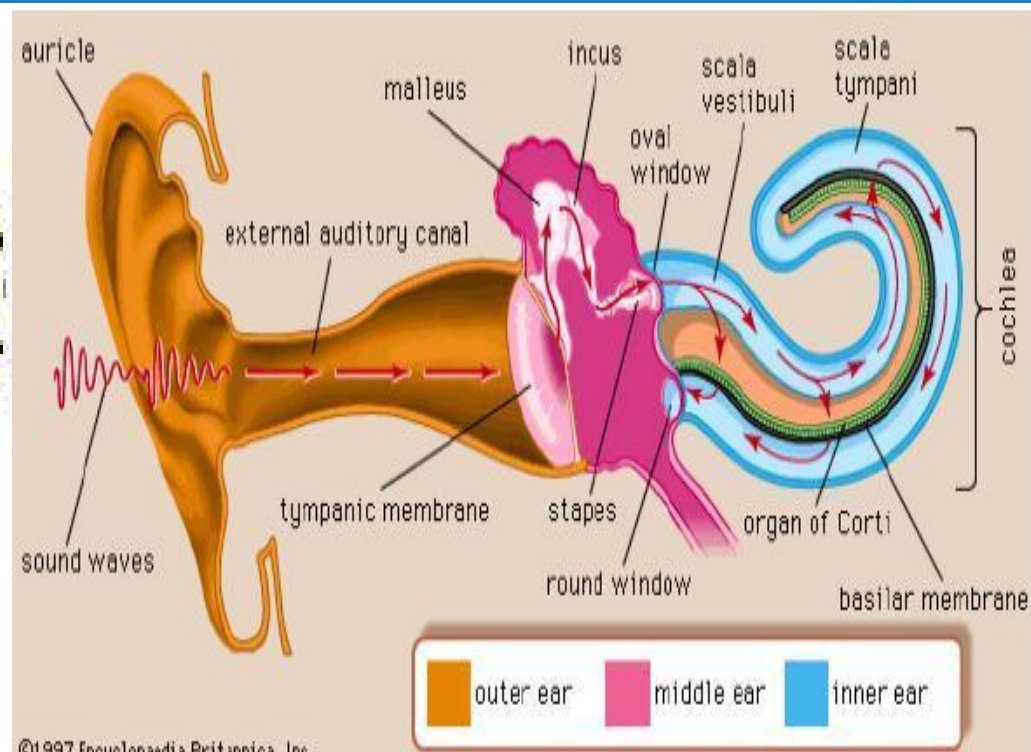
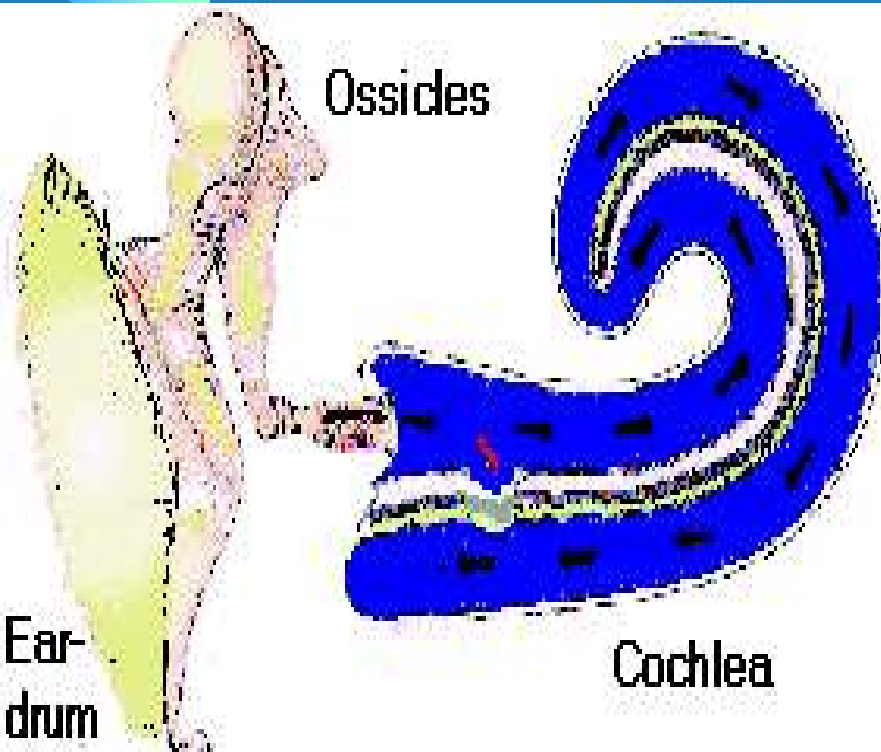


Longitudinal Waves

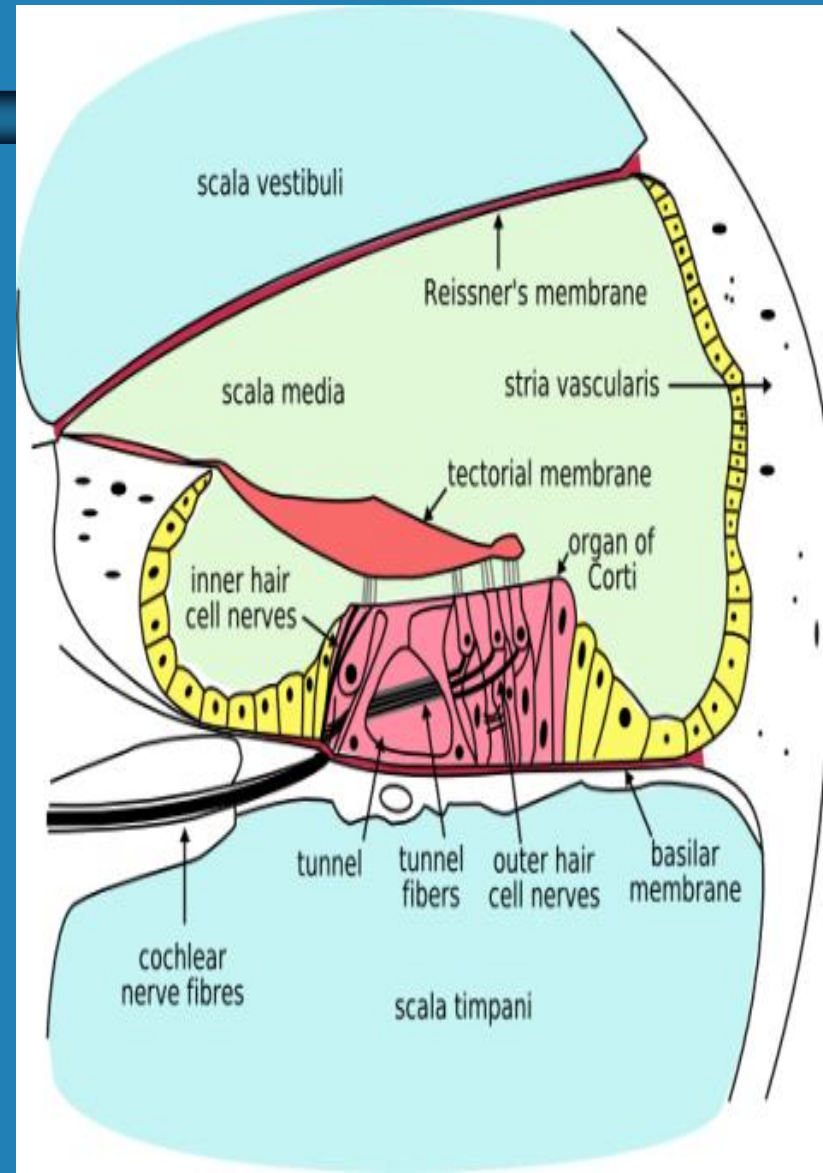
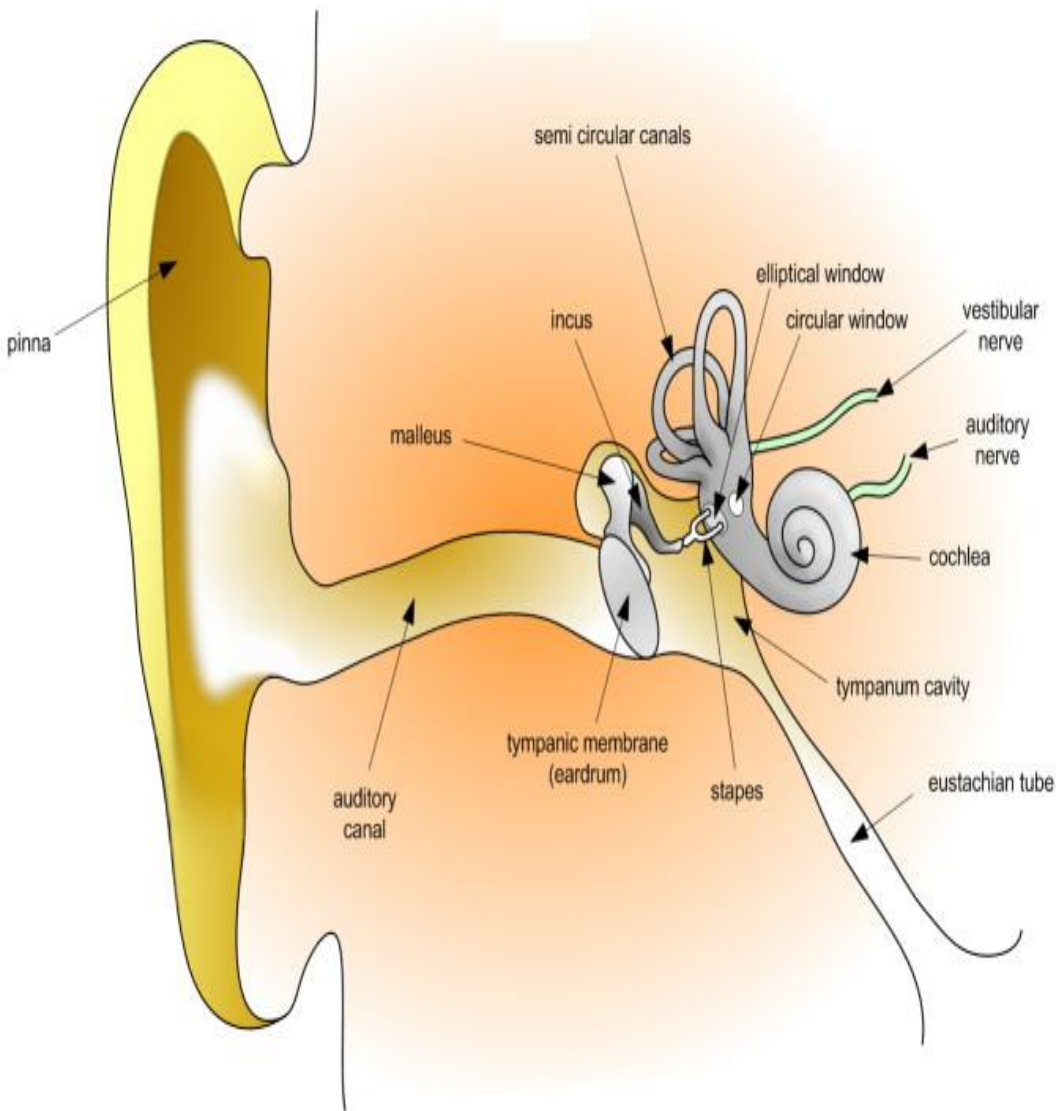


شنوایی انسان

- صوت توسط مجرای گوش خارجی وارد شده و سبب لرزش پرده گوش می شود.
- سه استخوان کوچک در گوش میانی این لرزش را از پرده گوش به بخش حلزونی گوش در گوش داخلی هدایت می کنند. وقتی سه استخوان کوچک حرکت می کنند، امواجی در مایع مجرای حلزونی به وجود می آورند، و این امواج بیش از ۱۶۰۰۰ سلول ظریف شنوایی (سلول های مویی) را تحریک می کنند و حرکت این سلول های مویی باعث تولید یک جریان الکتریکی در عصب شنوایی می شود. این جریان از طریق سیستم عصبی تا مناطق شنوایی مغز رسیده و در آنجا به شکل صوت شناخته می شود.



شنوایی انسان



سرعت صوت

- امواج طولی (صوت) در محیط های مختلف با سرعت مربوط به آن محیط منتشر می شوند. در یک محیط جامد، سرعت صوت برابر است با :

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- در اینجا **E** مدول یانگ محیط جامد و **ρ** چگالی محیط است.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

- سرعت صوت در یک مایع برابر است با :

- که در آن **B** مدول کپه ای است.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

- سرعت صوت در یک گاز از رابطه زیر به دست می آید :

- که در آن **P** فشار بدون آشفته گی گاز و **γ** مساوی با $\frac{c_p}{c_v}$ یعنی نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به گرمای ویژه آن در حجم ثابت است. برای گازهای دو اتمی مانند اکسیژن، ازت و هوا، مقدار **γ** مساوی با ۱.۴ است.

شدت صوت

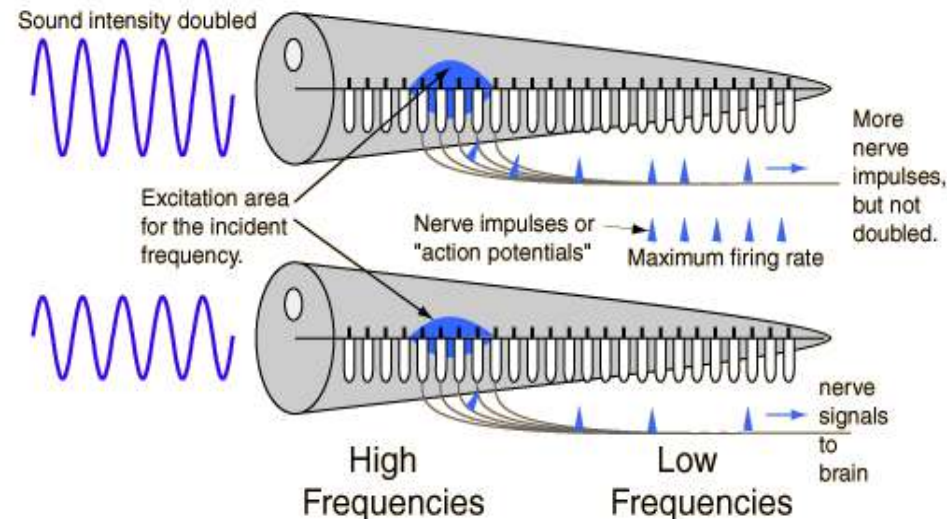
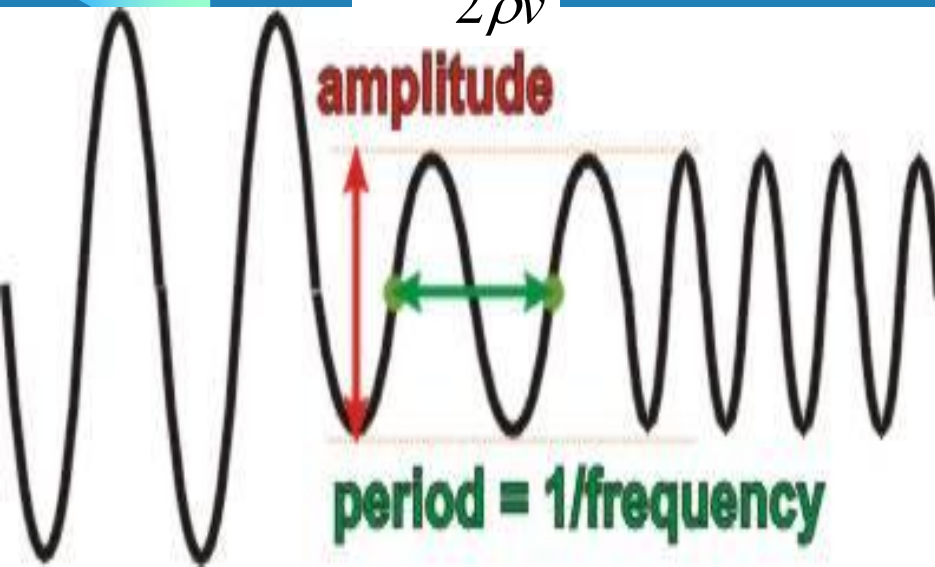
- بلندی یک صوت به انرژی موج صوتی بستگی دارد. بلندی صدا یک احساس درونی و ذهنی است که شنونده به یک صوت خاص نسبت می دهد، در حالی که انرژی موج صوتی یک کمیت فیزیکی صوری است. ارتباط میان این کمیت ها در شاخه ای از روانشناسی که روان - فیزیک نام دارد، بررسی می شود.

- شدت | یک موج مقدار انرژی است که در واحد زمان از واحد سطح می گذرد. این کمیت به طور تجربی با اندازه گیری انرژی E که در مدت زمان t به یک آشکارساز (مثلاً میکروفون) می تابد، تعیین می شود. پس، شدت موج از تقسیم انرژی بر زمان و بر مساحت آشکارساز به دست می آید:

$$I = [E/(At)]$$

- یکای شدت در دستگاه **SI**، ژول بر متر مربع بر ثانیه یا وات بر متر مربع است.
- در یک موج سینوسی، شدت به دامنه فشار A_p بستگی دارد:

$$I = \frac{A_p^2}{2\rho v}$$



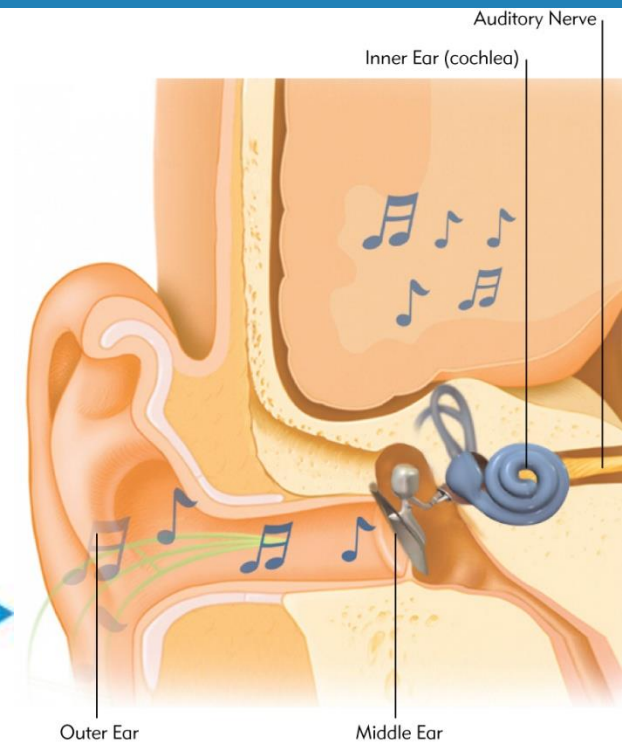
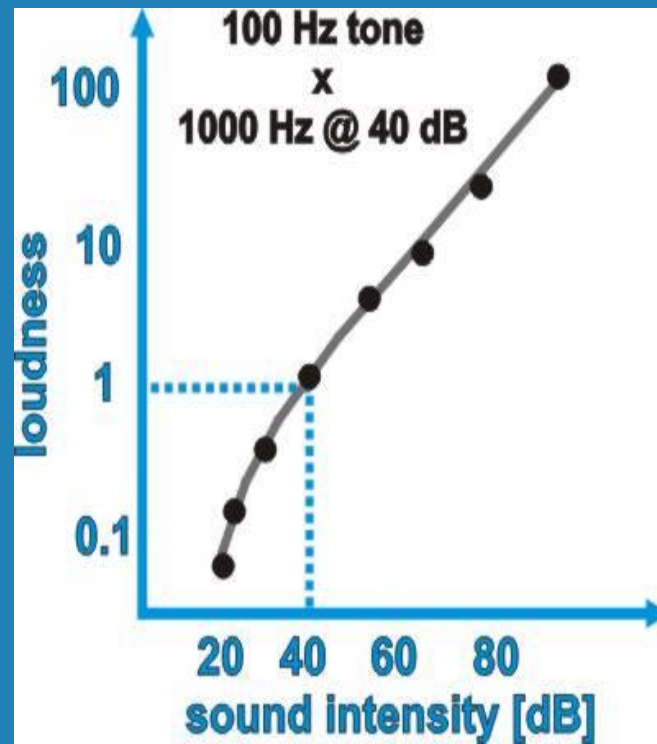
dB

- چون گوش انسان به گستره وسیعی از شدت صوت حساس است ، شدت صوت را معمولاً با مقیاس لگاریتمی تراز شدت که مقیاس دسی بل نامیده می شود اندازه گیری می کنند.
- گوش انسان اصواتی با شدت های 10^{-12} تا ۱ وات بر متر مربع را می تواند بشنود

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

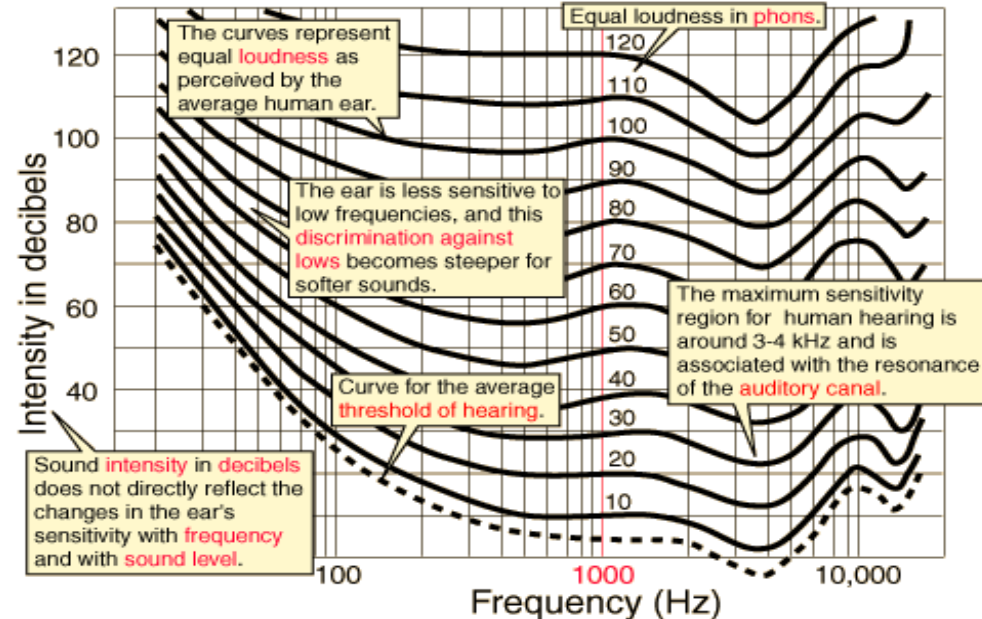
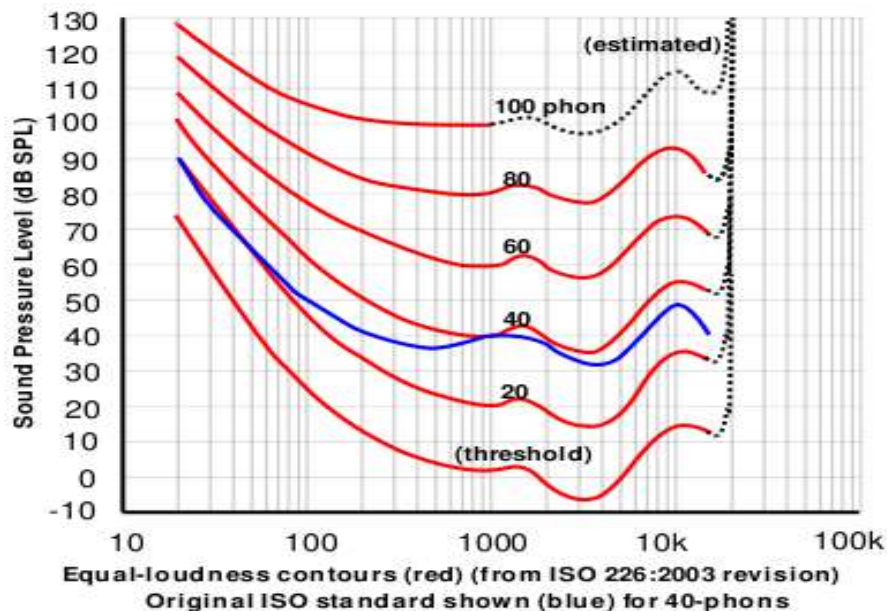
روان - فیزیک شنیدن

- اگر چه نسبت شدت بلندترین صوت شنیده شدنی به شدت ضعیف ترین صوت شنیده شدنی 10^{12} است، ولی ما در مورد بلندی اصواتی که می شنویم متوجه چنین تغییری نمی شویم. علت امر این است که رابطه میان شدت که یک احساس فیزیکی صوت است، و بلندی صوت که یک احساس ذهنی و درونی است، به فرایندهای فیزیولوژیکی و روانشناسی در گوش و مغز بستگی دارد.



روان - فیزیک شنیدن

- شخصی یک صوت استاندارد را که مثلاً دارای بسامد ۱۰۰۰ هرتز و تراز شدت ۶۰ دسی بل است، با صوت آزمونی که بسامدش **f** است مقایسه می کند. شدت صوت آزمون را می توان آن قدر تغییر داد تا شخص شنونده قضاوت کند که بلندی آن با بلندی صوت استاندارد ۱۰۰۰ هرتز یکسان است. این عمل را برای گستره ای از بسامدها تکرار می کند تا یک منحنی شبیه منحنی شماره ۶۰ در شکل زیر به دست آید.
- هر نقطه از این منحنی، تراز شدت مربوط به بسامد سیگنال خاصی را که بلندی آن با بلندی سیگنال استاندارد (۱۰۰۰ هرتز با تراز شدت ۶۰ دسی بل) مساوی است، نشان می دهد.
- برای نمونه، یک سیگنال ۱۰۰۰۰ هرتز باید دارای تراز شدت ۷۲ دسی بل باشد تا بلندی آن با بلندی سیگنال ۱۰۰۰ هرتز با تراز شدت ۶۰ دسی بل یکسان باشد.



تغییر شدت با فاصله

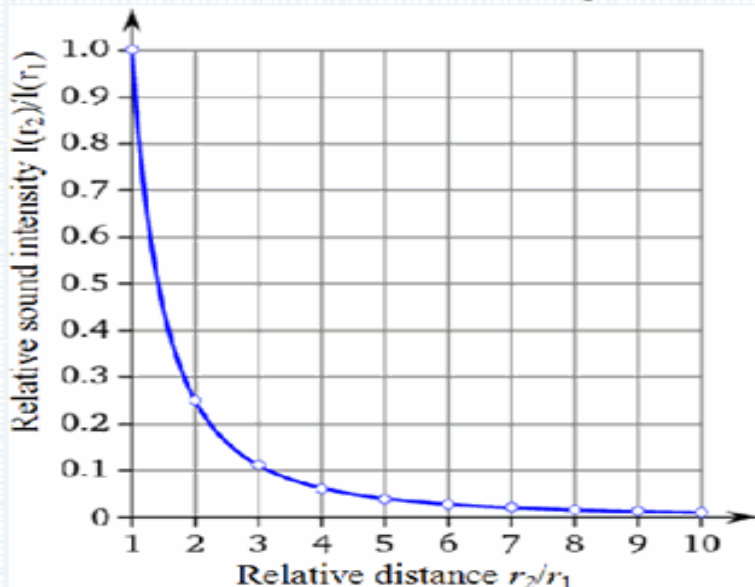
- شدت صوت تولید شده از یک چشمه، با دور شدن از آن چشمه کم می شود. اگر چشمه کوچک باشد، صوت به صورت امواج کروی پخش می شود و در فاصله d_1 از چشمه، شدت I_1 در تمام نقاط کره یکسان است. چون شدت با انرژی گذرنده از واحد سطح در واحد زمان مساوی است، انرژی در هر ثانیه، یا توان P_1 ، که از کره ای به شعاع d_1 و به مرکز چشمه صوتی می گذرد، با حاصل ضرب شدت I_1 در این فاصله و مساحت کره، برابر است با :

$$P_1 = A_1 I_1 = 4\pi d_1^2 I_1$$

- به همین ترتیب، توان P_2 که از کره ای به شعاع d_2 می گذرد برابر است با :

$$P_2 = 4\pi d_2^2 I_2$$

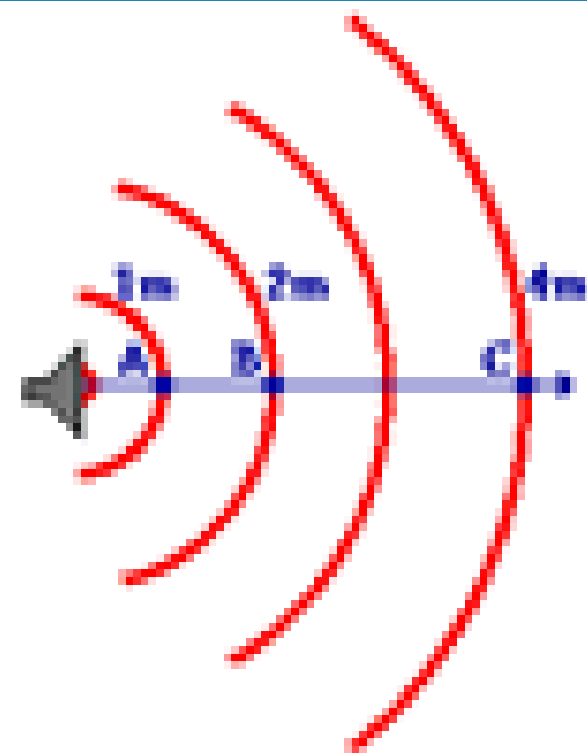
Inverse square law $1/r^2$



Law for Sound Energy Quantities	
Distance ratio	Sound Intensity $I \propto 1/r^2$
1	$1/1^2 = 1/1 = 1.0000$
2	$1/2^2 = 1/4 = 0.2500$
3	$1/3^2 = 1/9 = 0.1111$
4	$1/4^2 = 1/16 = 0.0625$
5	$1/5^2 = 1/25 = 0.0400$
6	$1/6^2 = 1/36 = 0.0278$
7	$1/7^2 = 1/49 = 0.0204$
8	$1/8^2 = 1/64 = 0.0156$
9	$1/9^2 = 1/81 = 0.0123$
10	$1/10^2 = 1/100 = 0.0100$

Calculating sound intensity with the inverse square law

$$I_1 I_2 = r_2^2 I_1^2$$

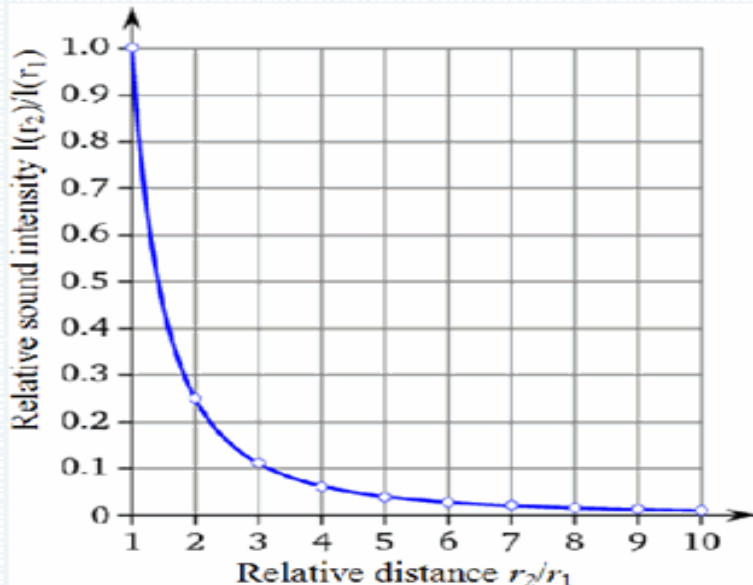


تغییر شدت با فاصله

- هنگام انتقال صوت از **d1** به **d2** مقداری از انرژی آن به وسیله هوا جذب می شود، اما اگر فاصله **d1** تا **d2** خیلی زیاد نباشد، این مقدار جذب شده نا چیز است. اگر به طور کلی از این اتلاف انرژی چشم پوشی کنیم، تمام انرژی گذرنده از کره ۱ باید از کره ۲ نیز بگذرد.
- انرژی که در هر ثانیه از کره ۱ می گذرد (یعنی **P1**)، با انرژی گذرنده از کره ۲ در هر ثانیه (یعنی **P2**) مساوی است. در نتیجه از دو معادله اخیر داریم :

$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1$$

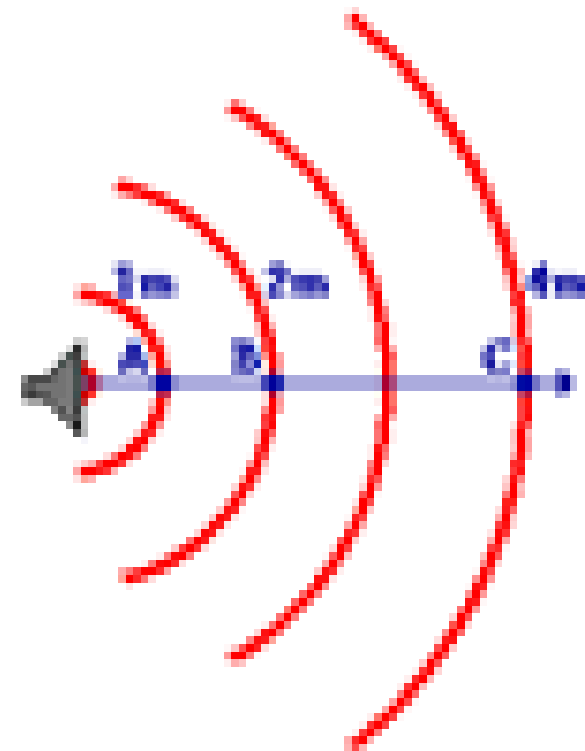
Inverse square law $1/r^2$



Law for Sound Energy Quantities		
Distance ratio	Sound Intensity $I \propto 1/r^2$	
1	$1/1^2 = 1/1 = 1.0000$	
2	$1/2^2 = 1/4 = 0.2500$	
3	$1/3^2 = 1/9 = 0.1111$	
4	$1/4^2 = 1/16 = 0.0625$	
5	$1/5^2 = 1/25 = 0.0400$	
6	$1/6^2 = 1/36 = 0.0278$	
7	$1/7^2 = 1/49 = 0.0204$	
8	$1/8^2 = 1/64 = 0.0156$	
9	$1/9^2 = 1/81 = 0.0123$	
10	$1/10^2 = 1/100 = 0.0100$	

Calculating sound intensity with the inverse square law

$$I_1 I_2 = r_2^2 I_1^2$$

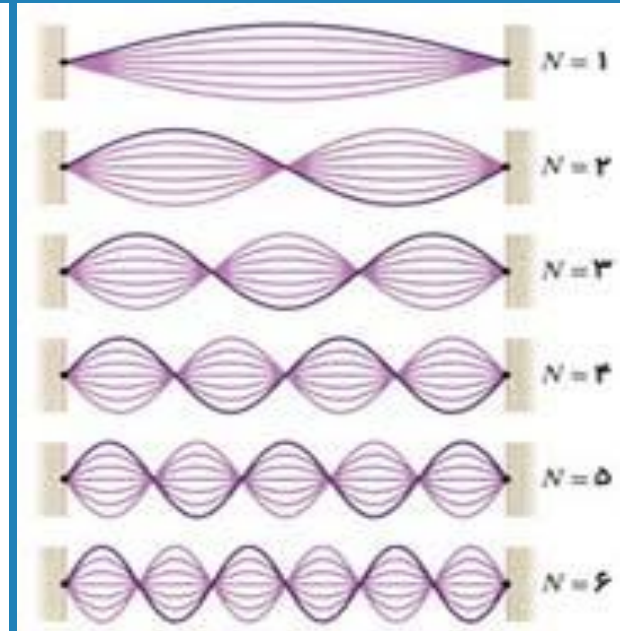
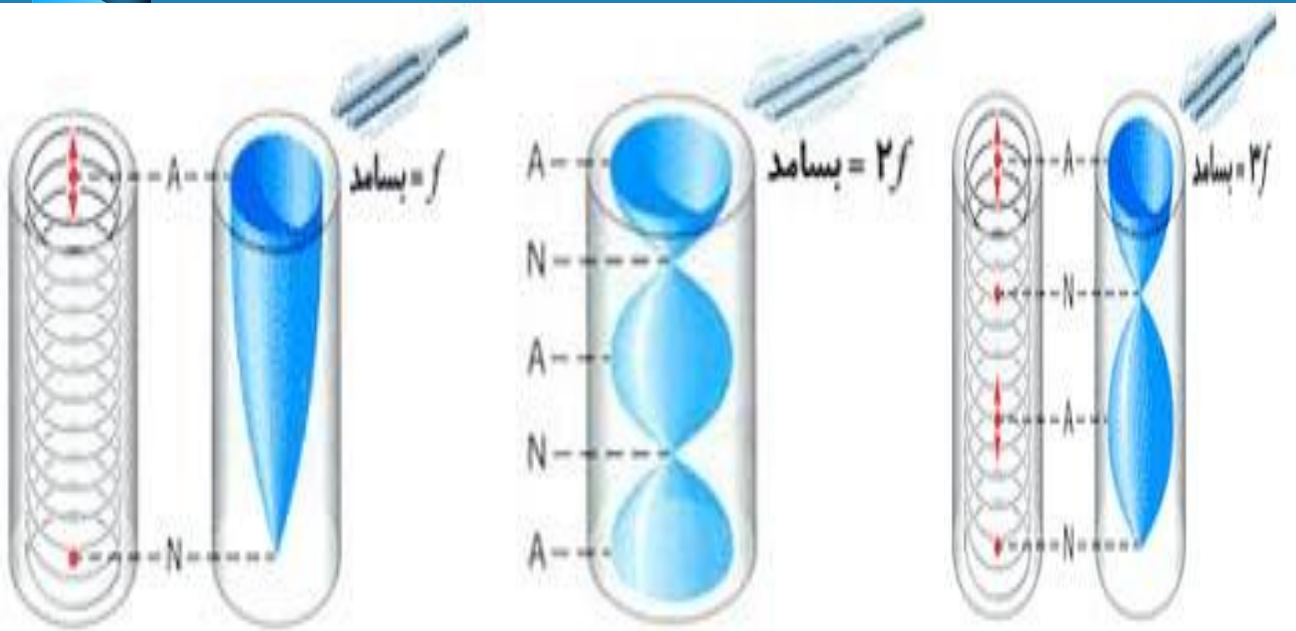


امواج ایستاده

- مانند ریسمانی که دو انتهای آن ثابت شده است، هوای داخل یک حفره (کاوک) نیز فقط با بسامدهای مشخصه حفره ارتعاش می کند.
- در بخش قبل نشان دادیم که ریسمانی که دو انتهای آن ثابت، فقط با بسامدهای متناظر با بسامد امواج ایستاده روی ریسمان ارتعاش می کند.
- بنابراین، در یک حفره فقط امواج ایستاده ای با طول موج و بسامدهای معین می توانند تولید شوند. بسامد این امواج به اندازه و شکل حفره بستگی دارد.

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$



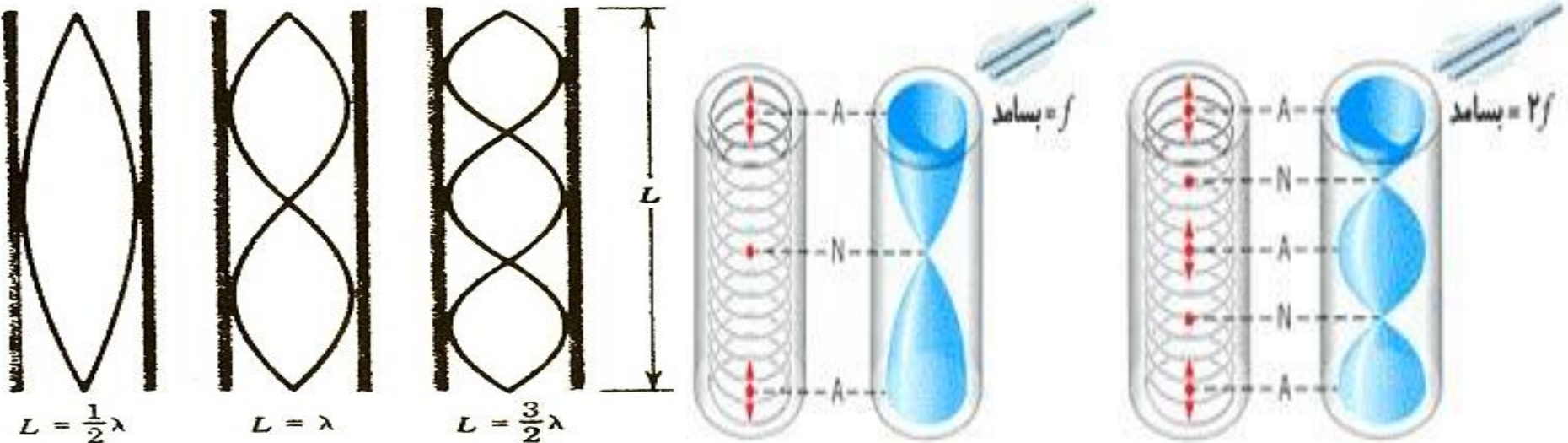
امواج ایستاده

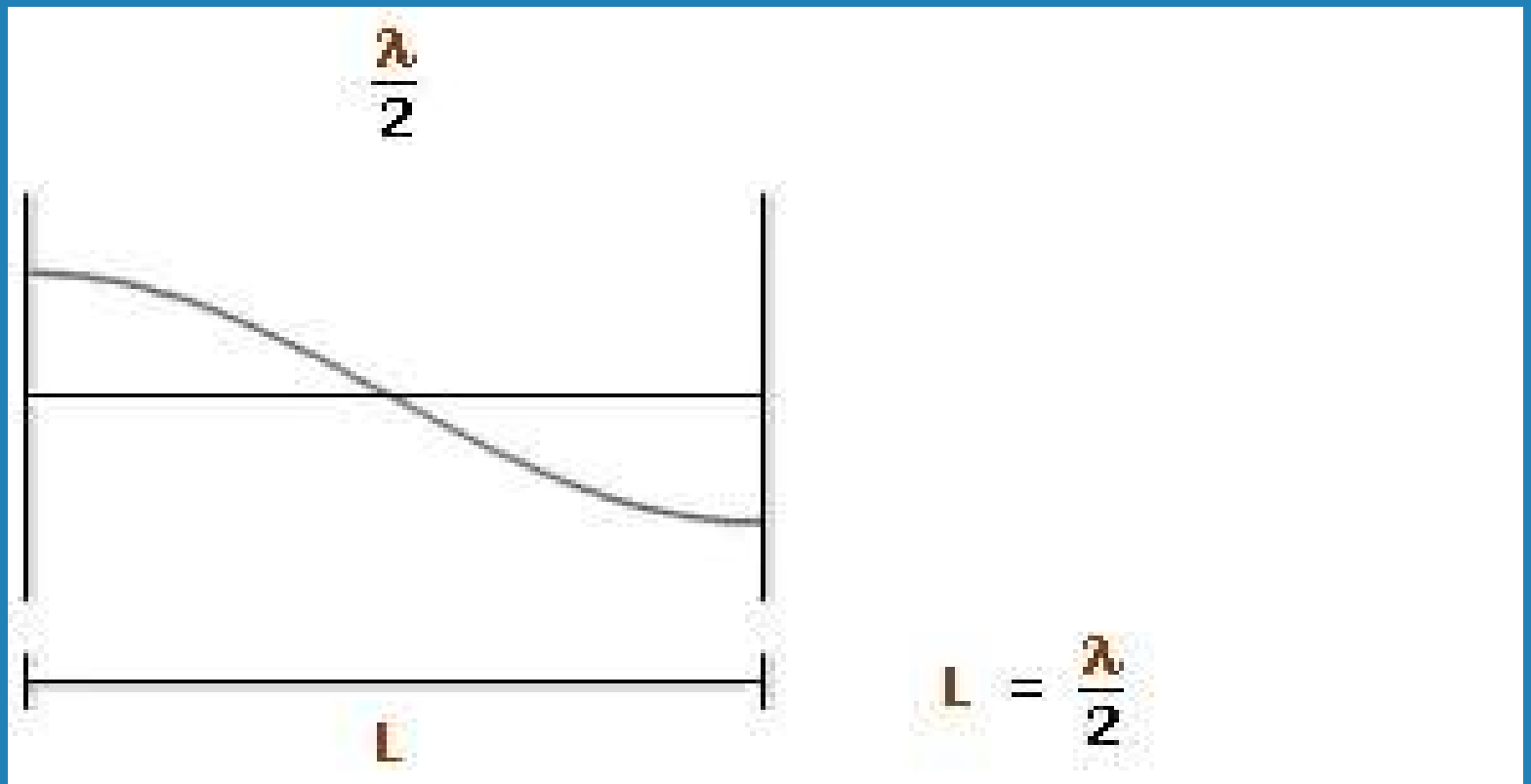
- یک حالت خاص و مهم، حفره ای استوانه ای به طول L و با دو انتهای باز (لوله باز) است.
- با دمیدن هوا از یک انتهای استوانه، امواجی در آن تولید می شوند که در طول استوانه حرکت می کنند. اگر قطر استوانه در مقایسه با طول موج این امواج کوچک باشد، این امواج هنگام رسیدن به انتهای دیگر استوانه به عقب باز می تابند. بر هم نهش امواجی با دامنه و بسامد مساوی که در خلاف جهت یکدیگر حرکت می کنند، یک نقش موج ایستاده تولید می کند. فشار در دو انتهای استوانه با فشار جو برابر است زیرا دو انتهای استوانه باز است. بنابراین، تنها امواج ایستاده ای که گره های فشار آنها در دو انتهای استوانه قرار دارند، می توانند در استوانه به وجود بیایند. این حالت با وضع ریسمانی که دو انتهایش ثابت شده است مشابه است: یعنی تنها امواج ایستاده ای می توانند به وجود آیند که طول موج و بسامدهای آنها از رابطه زیر به دست آید:

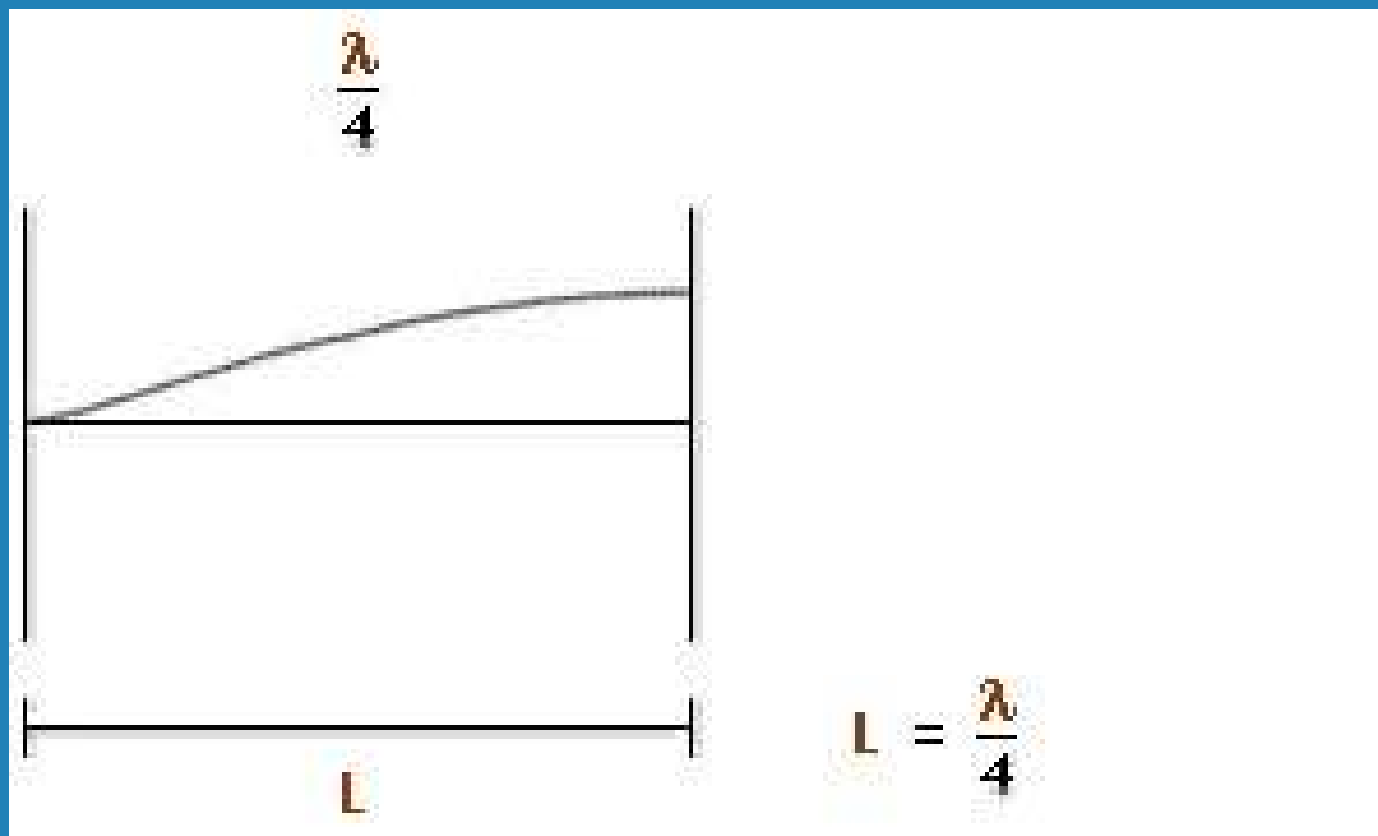
$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$

- مانند بسامدهای یک ریسمان مرتعش، این مجموعه شامل بسامد اصلی f_1 و همه هماهنگ های fn است.

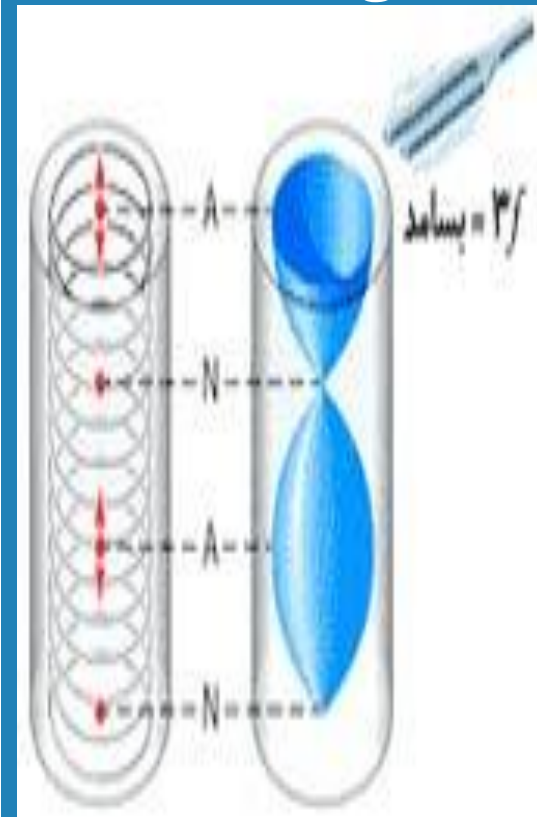
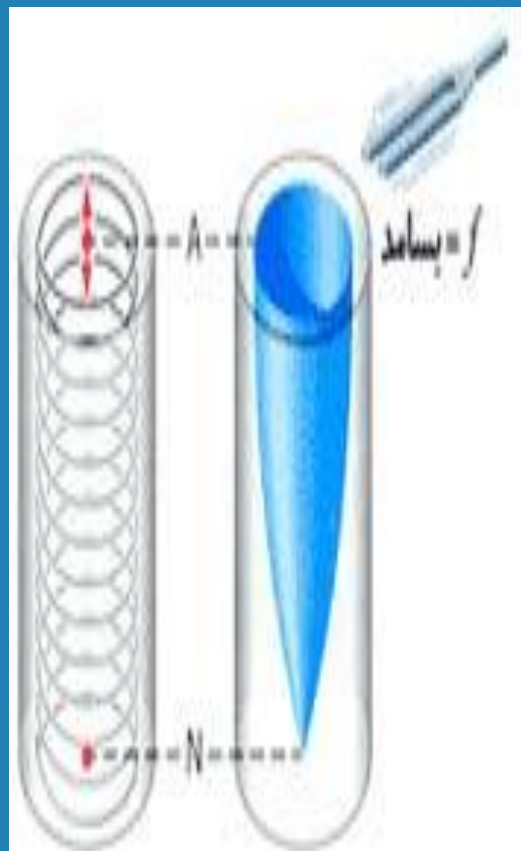
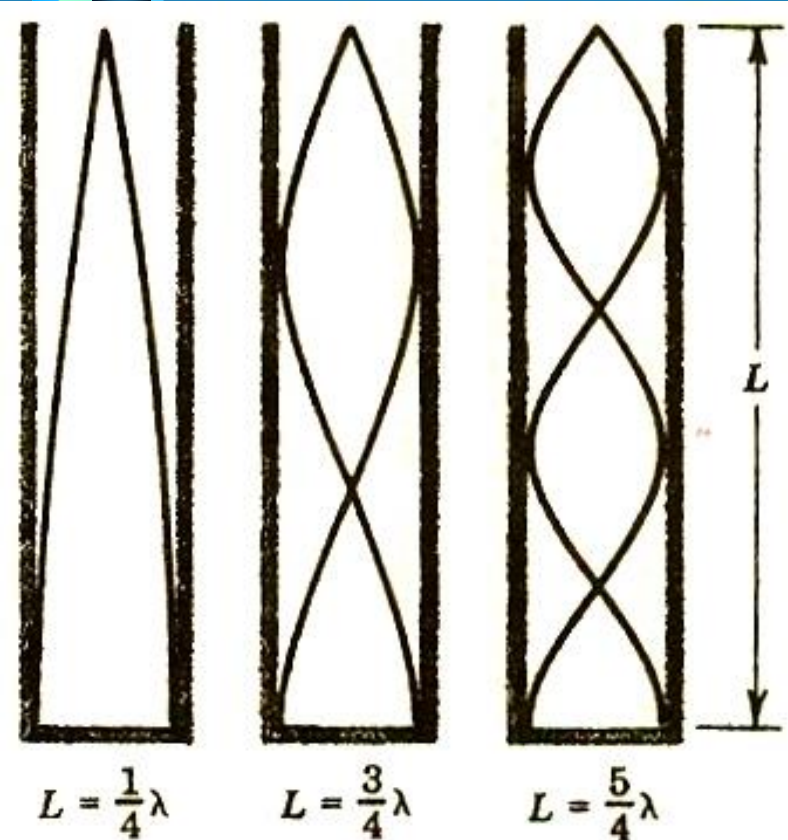






امواج ایستاده

- لوله های صوتی ارگ و دیگر وسایل موسیقس بادی، از جمله دهان انسان با تولید امواج ایستاده در حفره ها تون (آهنگ) به وجود می آورند. با وجود این، بسامدهای مشخصه موقعی یک رشته هماهنگ تشکیل می دهند که حفره یک استوانه کامل بوده و دو انتهای آن باز باشد (لوله باز). در حفره هایی با شکل های دیگر، بسامدهای تولید شده یک رشته هماهنگ تشکیل نمی دهند.



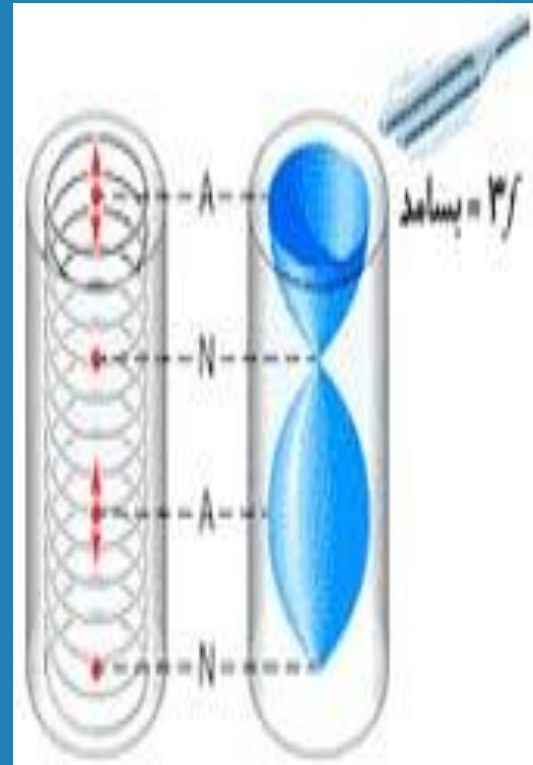
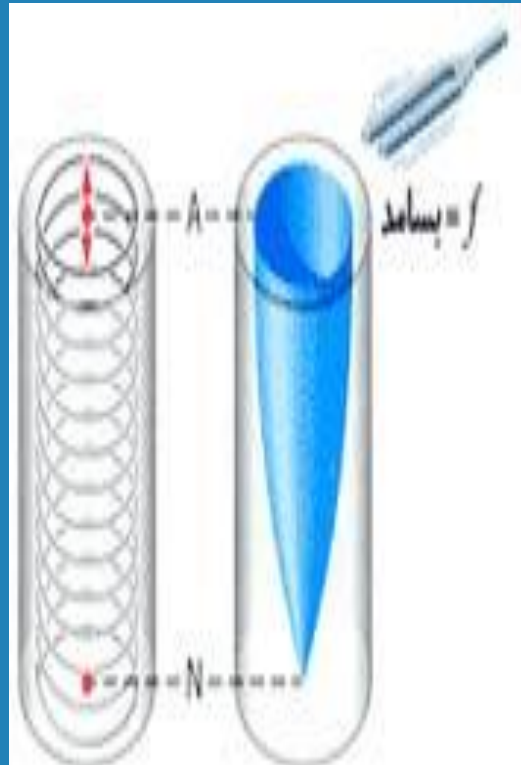
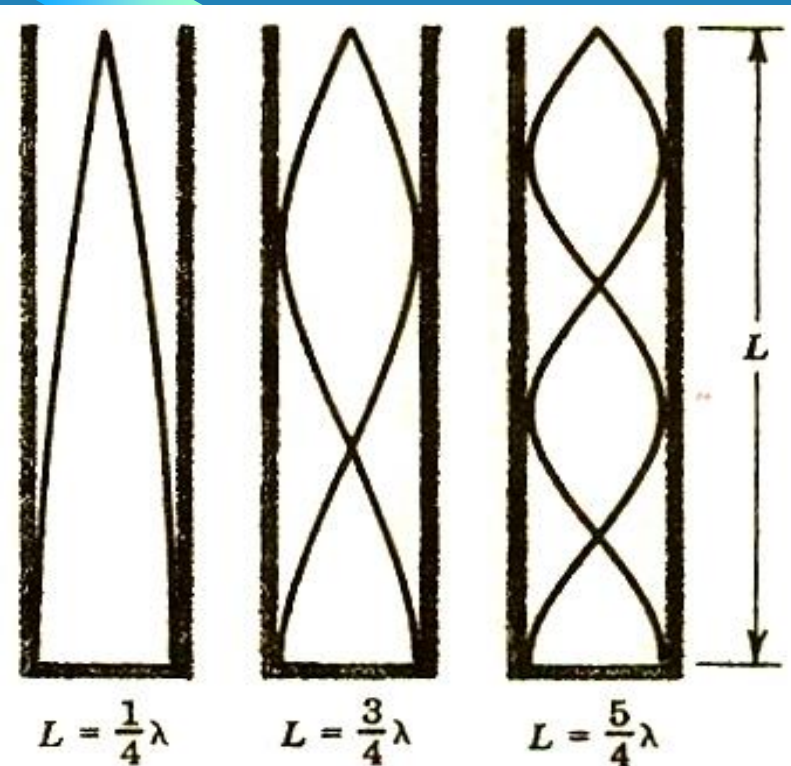
امواج ایستاده

- یک انتهای بعضی از لوله های صوتی بسته و انتهای دیگر آنها باز است (لوله های بسته). در چنین لوله هایی شکم های فشار در انتهای بسته تولید می شوند زیرا در آنجا جابه جایی هوا صفر است (در هر جایی که فشار دارای شکم است، جابه جایی در آنجا دارای گره است).

- امواج ایستاده در این لوله ها یک گره در انتهای باز و یک شکم در انتهای بسته دارند. شکل زیر سه موج ایستاده اول را که دارای این شرایط هستند، نشان می دهد.

$$\lambda_n = \frac{4L}{m} \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{mv}{4L}$$

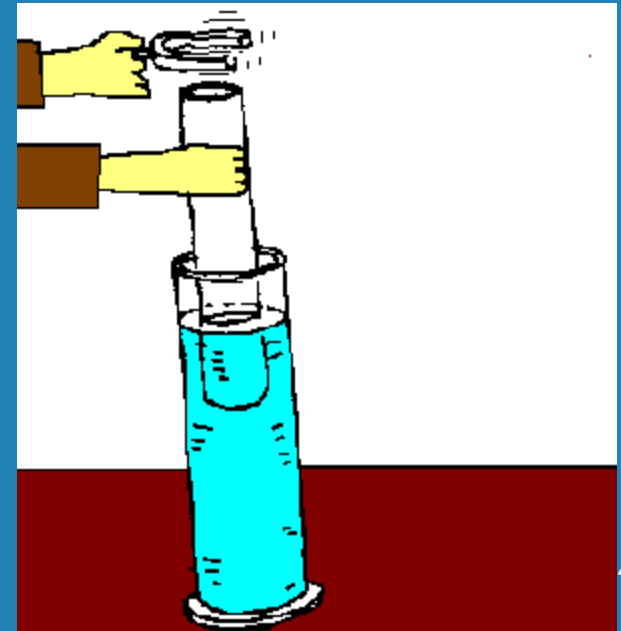
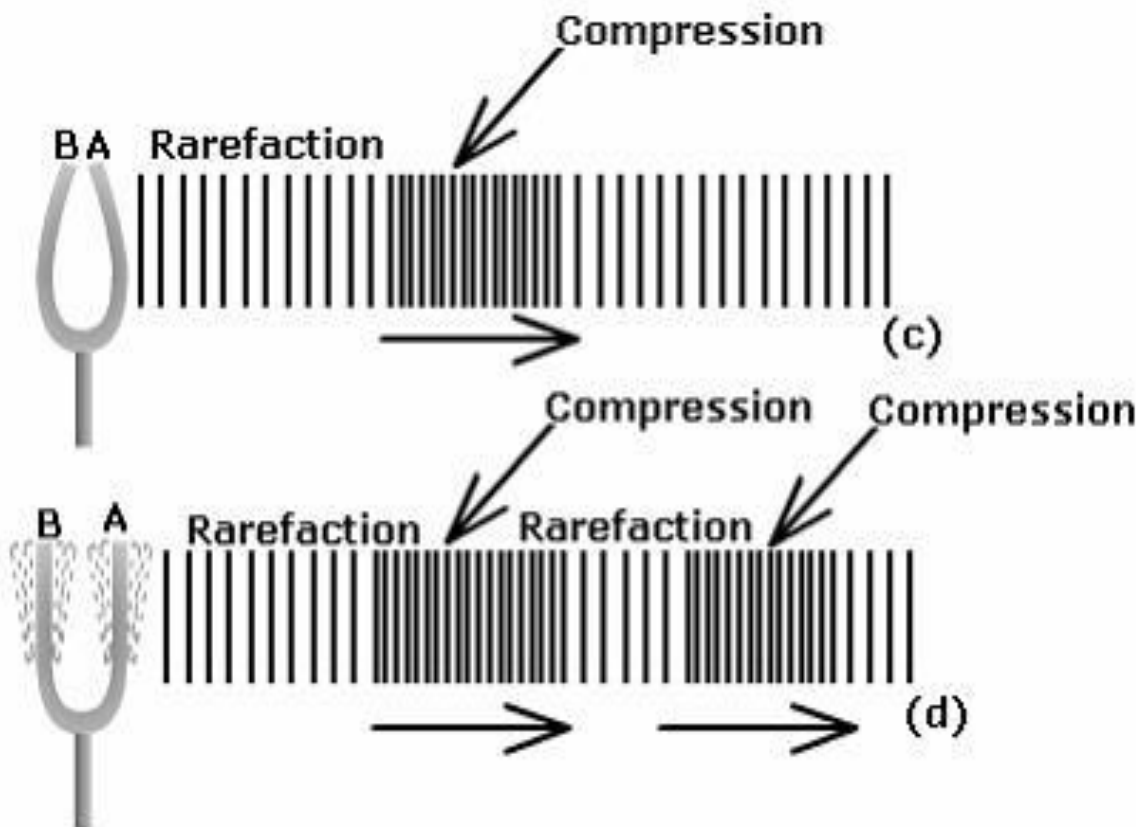
- که m یک عدد درست فرد است ($m = 1, 3, 5, 7, \dots$).





تشدید

- برای آنکه در یک حفره، موج ایستاده تولید شود، لازم است که هوای حفره با بسامدی نزدیک به یکی از بسامدهای مشخصه حفره ارتعاش کند.
- برای این منظور دیپازون وسیله مناسبی است، زیرا هنگامی که به آن ضربه می زنیم، با بسامد ثابت f ارتعاش می کند و امواج صوتی با همان بسامد تولید می کند. اما موقعی که دیپازون به طور آزاد ارتعاش می کند، فقط کسر کوچکی از انرژی مکانیکی آن به صوت تبدیل می شود و بقیه به صورت انرژی درونی هوا ظاهر می شود. بنابراین، دیپازون یک موج صوتی ضعیف تولید می کند.

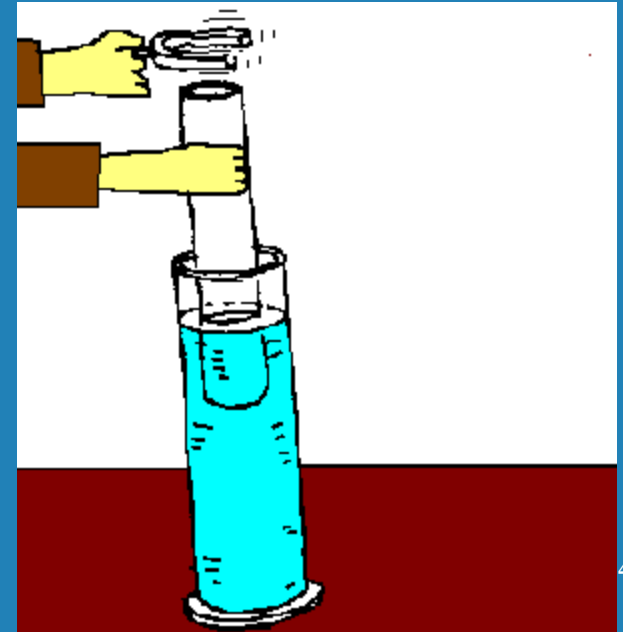
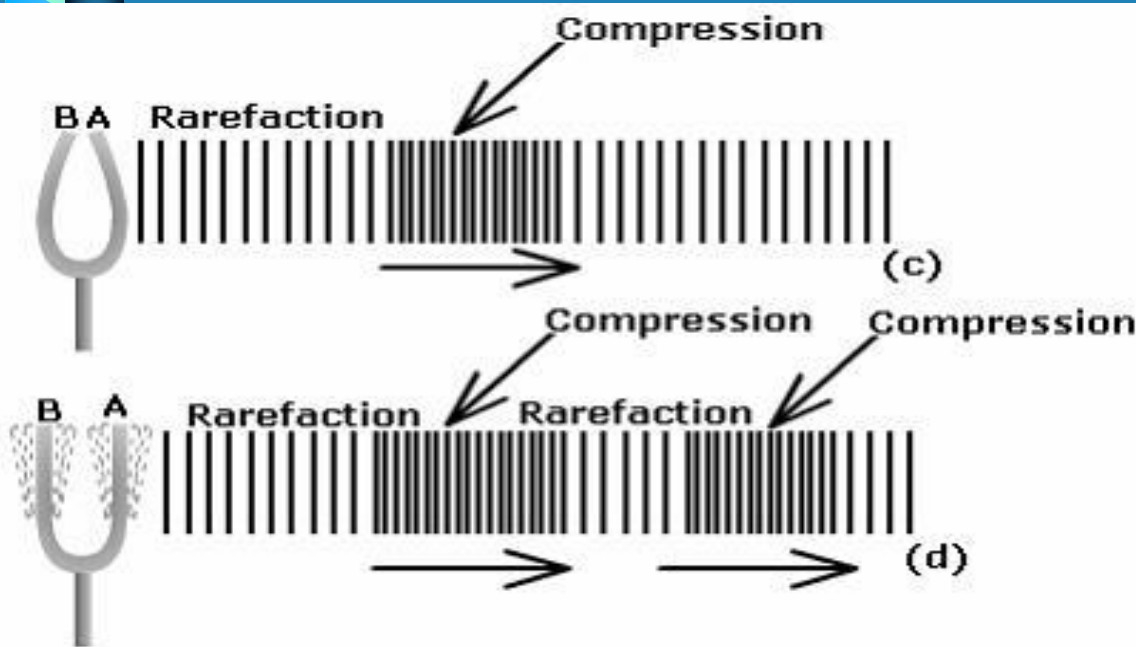


تشدید

- اما اگر یک دیپازون را در نزدیکی انتهای باز حفره ای که بسامد مشخصه آن در حدود f است قرار دهیم، کسر بزرگی از انرژی مکانیکی آن به یک موج صوتی با دامنه زیاد تبدیل می شود. این پدیده را تشدید می نامند که به وسیله استوانه ای که مطابق شکل زیر به مخزن آبی وصل شده است، به آسانی تولید می شود.
- یک دیپازون مرتعش را بالای انتهای باز استوانه قرار می دهیم، و سپس طول L لوله بسته را با بالا و پایین بردن مخزن تنظیم می کنیم. هنگامی که طول لوله بسته به حدی می رسد که بسامد مشخصه آن با بسامد دیپازون مساوی می شود، صدا به طور محسوس بلندتر به گوش می رسد، زیرا در حالت تشدید کسر بزرگی از انرژی مکانیکی دیپازون به انرژی صوتی تبدیل می شود.

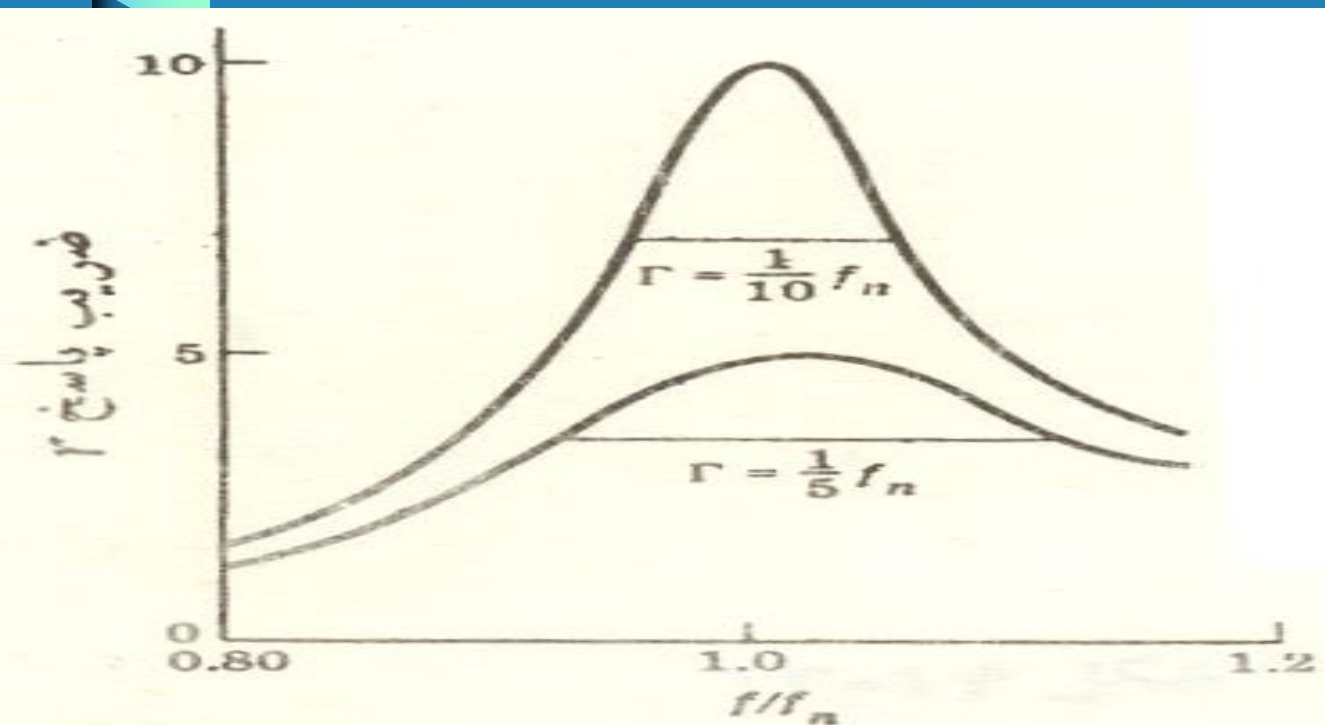
$$\lambda_n = \frac{4L}{m}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{mv}{4L}$$



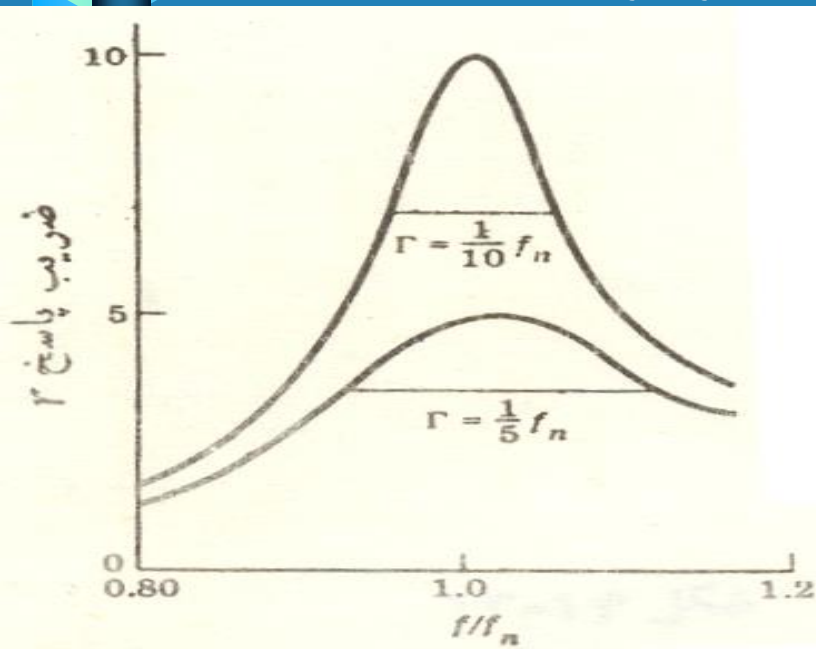
تشدید

- در وسایل موسیقی سیمی، مانند گیتار و ویولن، یک حفره تشدید کننده در زیر سیم ها قرار دارد که شدت صوت را افزایش می دهد. البته، بسامدهای مشخصه حفره نمی توانند با همه بسامدهای نواخته شده در سیم مساوی باشند، اما خوشبختانه حتی موقعی که بسامد موجود f دقیقاً با بسامد مشخصه f_n مساوی نیست، تشدید اتفاق می افتد. هنگامی که یک سیم مرتعش صوتی با دامنه A_p و بسامد f تولید می کند، حفره با همان بسامد f و با دامنه متفاوت A'_p مرتعش می شود. نسبت $r = (A'_p/A_p)$ را ضریب پاسخ می نامند. اگر ضریب پاسخ r از یک بزرگتر باشد، حفره صوت را تقویت می کند.
- اگر f به بسامد مشخصه f_n حفره خیلی نزدیک باشد، ضریب پاسخ r خیلی بزرگتر از ۱ می شود و اگر اختلاف f با f_n زیاد باشد، r کوچکتر از ۱ خواهد بود.



تشدید

- این موضوع با منحنی های پاسخ در شکل زیر، که منحنی های r بر حسب f/f_n برای دو حالت نمونه هستند، نشان داده شده است. قله این منحنی ها به ازای $f/f_n = 1$ به دست می آید. یعنی هنگامی که بسامد موجود f با بسامد مشخصه مساوی می شود، تشدید صورت می گیرد.
- بر طبق تعریف، کمیت Γ یعنی پهنای منحنی پاسخ، با 0.7 مقدار مربوط به قله منحنی برابر است. منظور این است که وقتی f در میان دو حد $f_n - (0.5\Gamma)$ و $f_n + (0.5\Gamma)$ قرار دارد، مقدار r مساوی با 70% درصد مقدار قله است. می توان نشان داد که حداکثر مقدار r مساوی با f_n/Γ است، یعنی میزان تقویت یک منحنی پاسخ پهن، از میزان تقویت یک منحنی پاسخ باریک کمتر است.
- بسامدهای f_n به اندازه و شکل حفره و Γ به ماده ای که حفره از آن ساخته شده است، بستگی دارند.



صدای انسان

- تولید صدا در دو مرحله مجزا صورت می گیرد: (۱) تولید صدای شنیده شدنی (۲) تنظیم این صدا برای تولید یک حرف صوتی (آوا) معین.
- یک حرف صوتی کوچکترین واحد صوتی است که نقش اصلی را در زبان محاوره ای بازی می کند. هر زبانی حروف صوتی مخصوص به خود دارد و شخصی که به زبان ویژه ای تکلم می کند، ممکن است در تلفظ حروف صوتی زبان دیگر دچار مشکل شود.



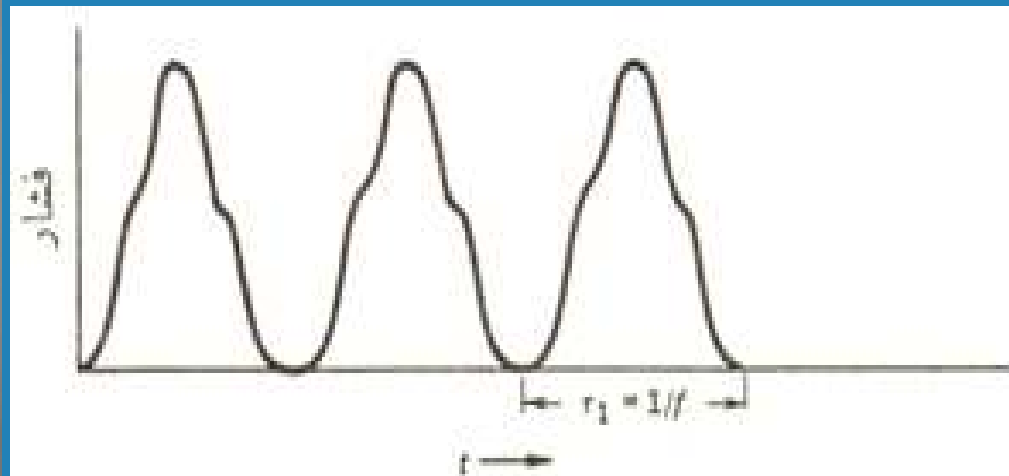
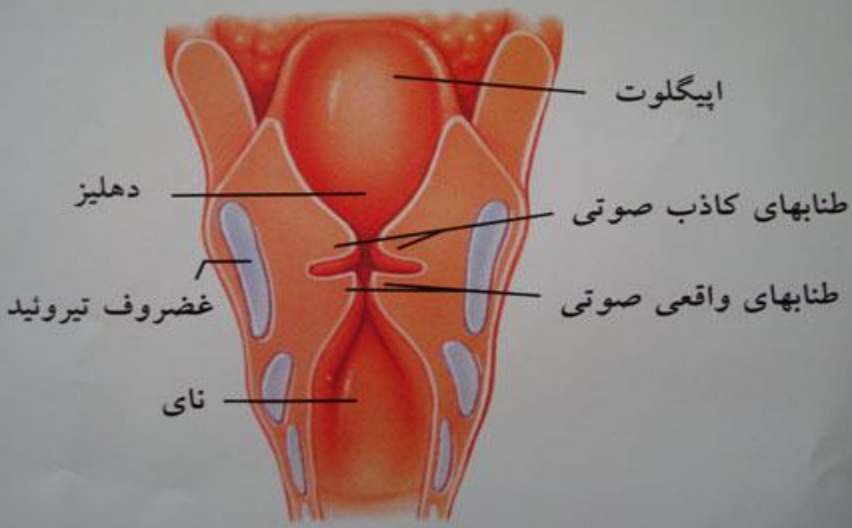
صدای انسان

- تمام حروف صوتی زبان انگلیسی در موقع بازدم تولید می شوند. وقتی هوا با فشار از ریه ها رانده می شود از نای گذشته و از طریق حنجره به حلق می رسد و از بینی و دهان خارج می شود.
- حلق قسمتی از مسیر عبور هوا است که بالای حنجره و در پشت حفره دهان و حفره بینی قرار دارد.
- حنجره از دسته ای غضروف تشکیل شده است که در میان حلق و نای واقع شده است و عبور جریان هوا از درون نای را تنظیم کرده و مانع ورود غذا به ریه ها می شود (یکی از غضروف های حنجره، سیب آدم است که در زیر گلو قرار دارد). هنگامی که شخصی چیزی می بلعد، اپی گلو (شراع الحنک) راه حنجره را می بندد و مانع عبور غذا از آن می شود.



صدای انسان

- جریان هوا به وسیله یک جفت رباط چند رشته ای در داخل حنجره، که تارهای صوتی نامیده می شوند، کنترل می شود.
- در موقع تنفس عادی، این تارها شل هستند و هوا آزادانه از حنجره عبور می کند. یک صوت صدادار موقعی تولید می شود که تارهای صوتی حنجره را مسدود کرده باشند. بنابراین، هنگام بازدم، هوا با فشار به تارهای صوتی برخورد می کند. اگر فشار هوا به قدر کافی زیاد باشد، مقداری از هوا از میان تارها عبور می کند و فشار هوا در پشت آنها کم می شود. به محض کم شدن فشار هوا، تارهای صوتی مجدداً بسته می شوند، در نتیجه فشار دوباره زیاد شده و این عمل تکرار می شود.
- به این ترتیب یک رشته تپ های صوتی با بسامدی که به کشش و جرم تارهای صوتی بستگی دارد، تولید می شوند. به طور کلی، بسامد اصوات در مردها از زن ها کمتر است، زیرا تارهای صوتی مردها سنگین تر است. اما هر کسی با تغییر کشش تارهای صوتی خود می تواند بسامد اصوات را تا ۳ برابر تغییر دهد



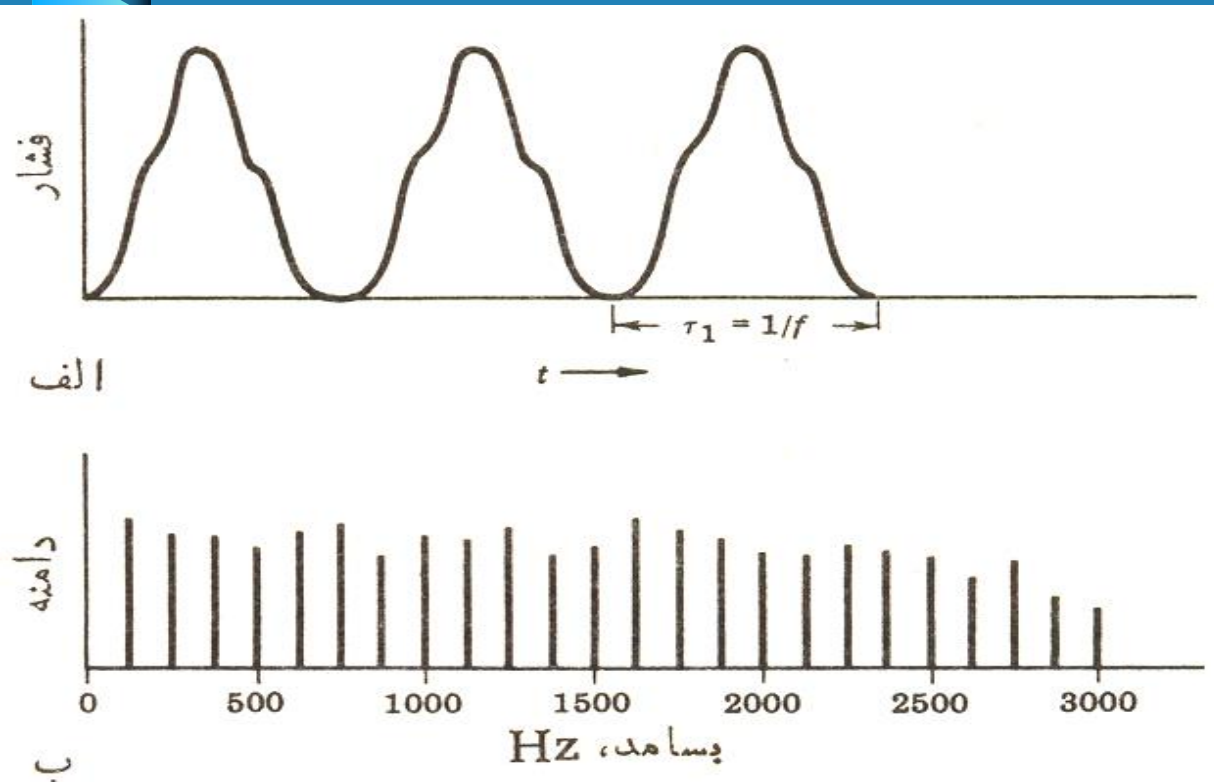
صدای انسان

- به ازای کشش معینی در تارهای صوتی، صوت ایجاد شده یک رشته دوره ای از تپ های فشار مثبت است.

- در مردها، بسامد f این تپ ها در حدود ۱۲۵ تپ در ثانیه است. چون نقش تپ ها دوره ای است، می توان آنها را بر هم نهشی از چند موج سینوسی در نظر گرفت که بسامدهای آنها یک رشته هماهنگ تشکیل می دهند :

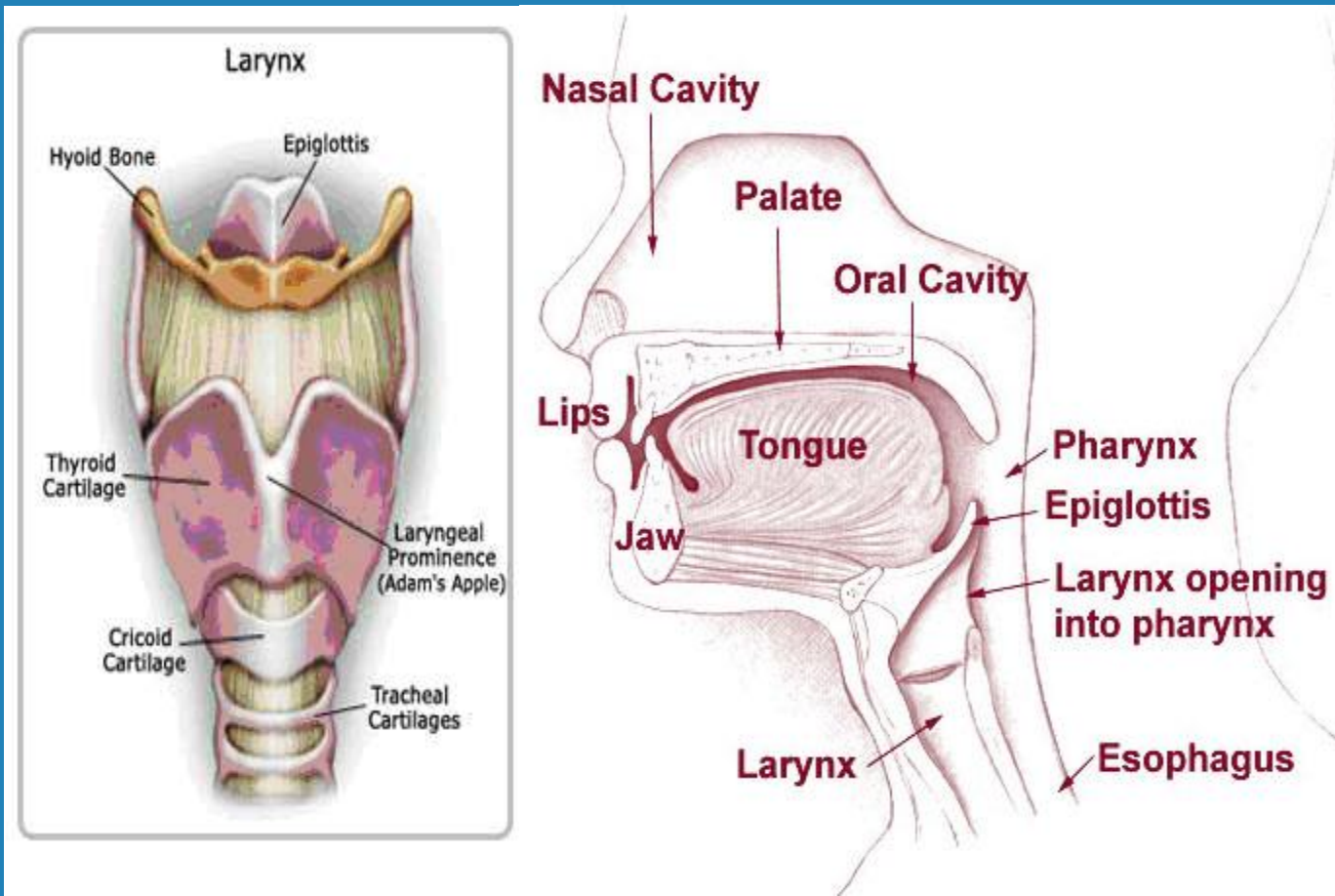
- $f_1=125\text{Hz}$, $f_2=2f_1$, $f_3=3f_1$

- طیف این موج شامل هماهنگ هایی با دامنه های تقریباً مساوی است. این اولین مرحله تولید یک صوت صدادار است.



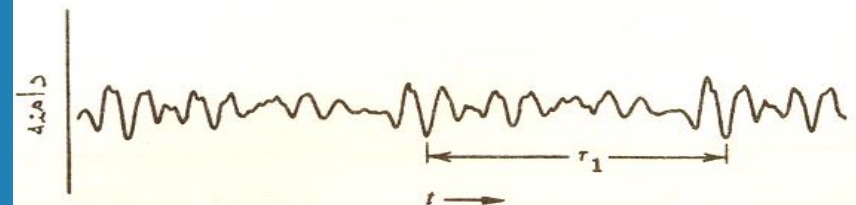
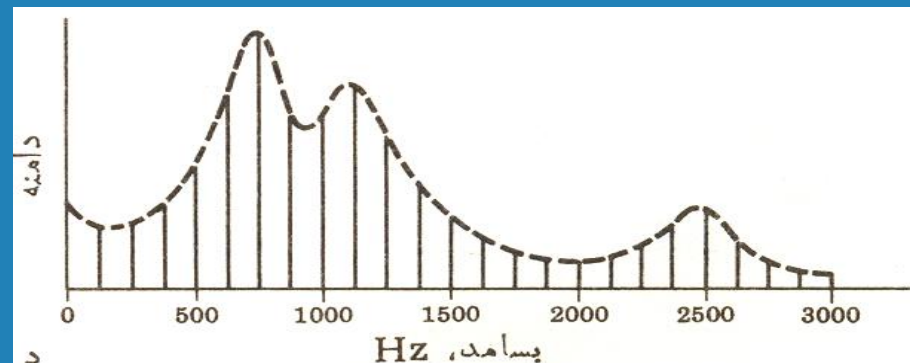
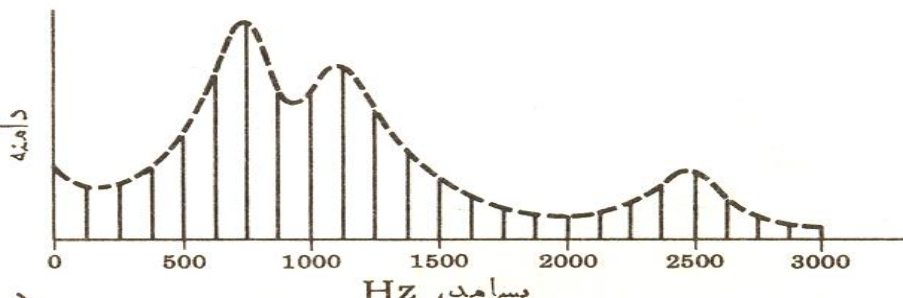
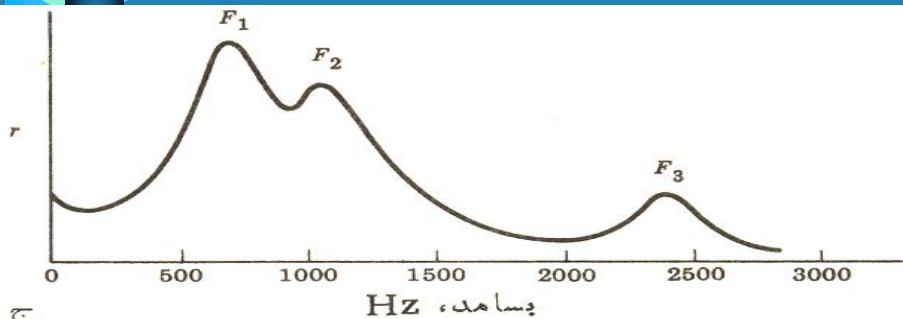
صدای انسان

- مرحله بعدی، یعنی هنر تبدیل این صوت به یک حرف صوتی، در حلق و حفره های دهان و بینی صورت می گیرد. همراه با این قسمت ها، حفره صدا سازی که اندازه و شکلش به وسیله زبان، لب ها و سقف دهان کنترل می شود، نقش عمده ای در تولید حروف صوتی دارد. برای یک اندازه و شکل معین، این حفره بسامدهای مشخصه خود را تولید می کند که آنها را بسامدهای شکلی یا ریختی می نامند. معمولاً دو یا سه بسامد شکلی کمتر از ۳۰۰۰ هرتز وجود دارد.



تولید صدا

- برای ساختن صدای "ah"، زبان را در جلو و پایین دهان قرار می دهیم. در این حالت، سه بسامد شکلی اول (در یک مرد) تقریباً ۷۳۰، ۱۰۹۰ و ۲۴۴۰ هرتز هستند.
- وقتی که موج صوتی به وسیله تارهای صوتی تولید می شود، به حفره صدا سازی راه می یابد و این حفره شروع به تشدید می کند. هر بسامد شکلی دارای یک منحنی پاسخ است و از این رو اگر چه هیچ یک از بسامدهای طیف موج صوتی دقیقاً با هیچ یک از بسامدهای شکلی مساوی نیست، ولی حفره صدا سازی با بسامدهای نزدیک به بسامدهای شکلی تشدید ایجاد می کند. شکل زیر ج منحنی پاسخ ترکیب شده سه بسامد شکلی در موقع ساختن صدای "ah" را نشان می دهد. به طور کلی، سه یا چهار هماهنگ نزدیک به هر بسامد شکلی وجود دارند که باید بر اثر تشدید تقویت شوند. این موضوع در شکل د که حاصل بر هم نهش شکل های ب و ج است، نشان داده شده است.

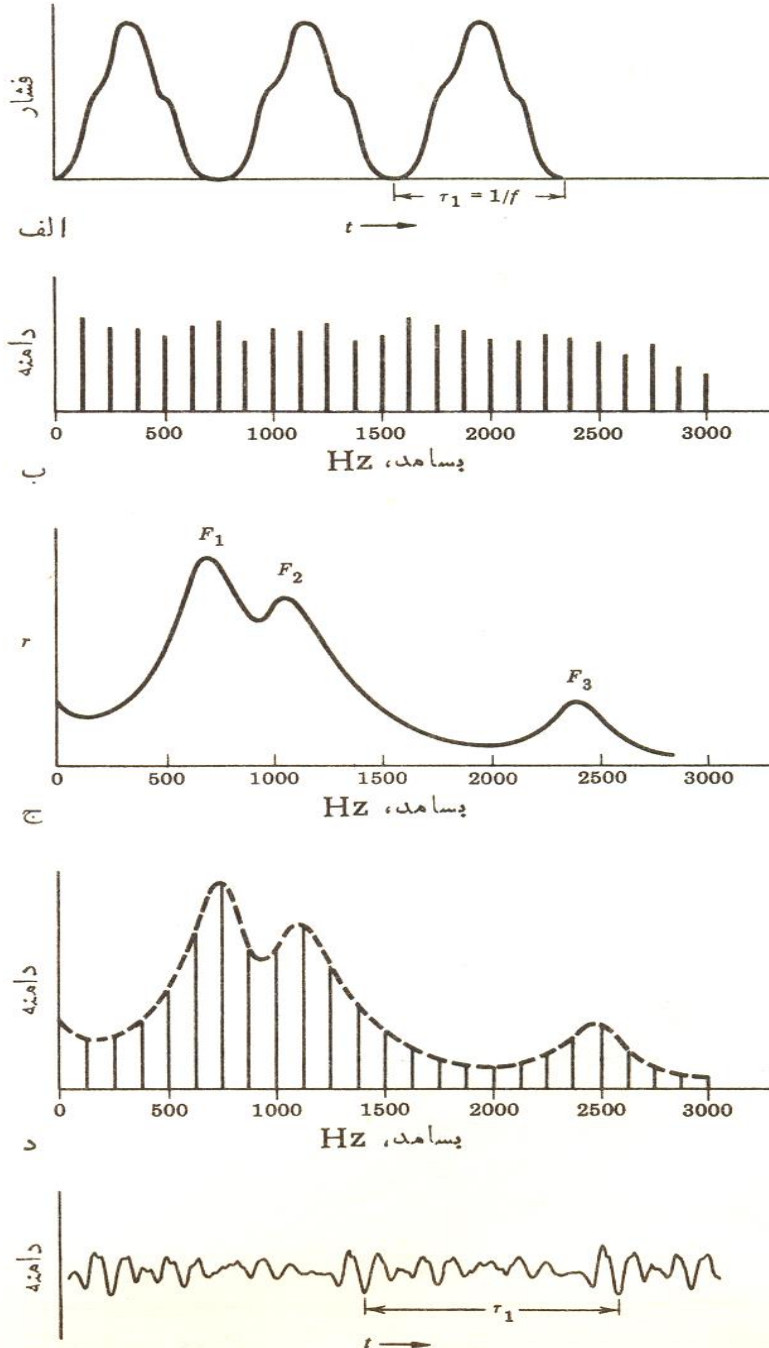


تولید صدا

- اگر بسامد اصلی **f1** مساوی با ۱۲۵ هرتز باشد، نزدیک ترین هماهنگ به اولین شکلی ۷۳۰ در صدای "ah" عبارت از ۱۲۵×۶ است.

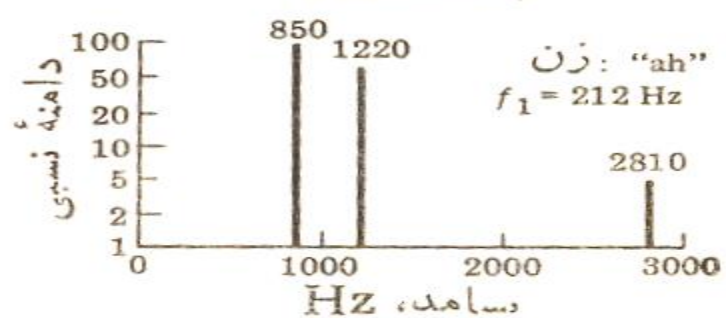
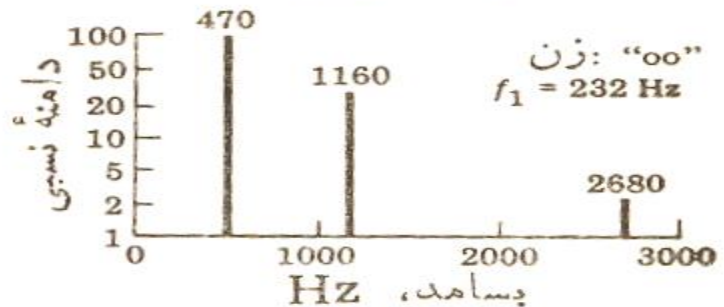
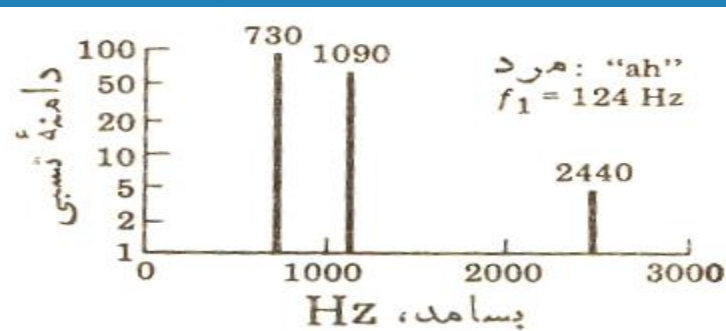
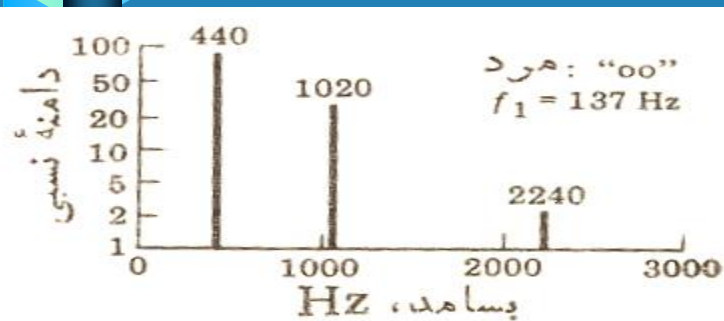
- همان طوری که در شکل د نشان داده شده است، دامنه این بسامد در حفره صدا سازی بزرگ است. واضح است که هماهنگ های مجاور، یعنی ۶۲۵ و ۸۷۵ نیز تقویت خواهند شد، اما نه به اندازه هماهنگ ۷۵۰. به این ترتیب، طیف صوتی بعد از وارد شدن به حفره صدا سازی اصلاح می شود.

- شکل های ب و د طیف های صدای "ah" را قبل و بعد از ورود به حفره صدا سازی نشان می دهد، و شکل های الف و ه نقش موج های مربوطه را نشان می دهد.



تولید صدا

- به طور خلاصه، مرحله اول در تولید حروف صدا دار تولید یک موج دوره ای و هماهنگ های تقریباً هم دامنه آن به وسیله تارهای صوتی است.
- مرحله دوم، تقویت انتخابی بعضی از این هماهنگ ها بر اثر تشدید در حفره صدا سازی است. اصوات صدا دار مختلف به کمک بسامدهای شکلی آنها، که با وضع قرار گرفتن زبان و شکل دهان کنترل می شوند، از هم متمایز می شوند.
- برای نمونه، صدای "ah" با قرار گرفتن زبان در جلو و پایین دهان (با دهان باز) ساخته می شود، در حالی که صدای "oo" با قرار گرفتن زبان در بالا و عقب دهان (با دهان تقریباً بسته) تولید می شود. شکل زیر بسامدهای میانگین و دامنه های نسبی سه بسامد شکلی اول (f_1, f_2, f_3) مربوط به اصوات صدا دار "ah" و "oo" را که توسط مردها و زن ها تلفظ شده اند، نشان می دهد. بسامد اصلی f_1 تارهای صوتی نیز در هر حالت مشخص شده است.



تولید صدا

- توجه کنید که در این حروف صدا دار که مردها و زن ها تلفظ می کنند، بسامدهای اصلی تفاوت زیادی با هم ندارند (اگر چه در مردها و زن ها متفاوت اند) و این موضوع نشان می دهد که بسامد اصلی در متمایز بودن حروف صدا دار نقشی ندارند.
- با این که بسامدهای شکلی نیز در مردها و زن ها با هم تفاوت دارند، ولی نسبت بسامدهای شکلی در یک حرف صدا دار، برای مردها و زن ها تقریباً یکی است. برای نمونه، نسبت های $f2/f1$ و $f3/f1$ برای صدای "ah" در مردها ۱.۴۹ و ۳.۳۴ و در زن ها ۱.۴۴ و ۳.۳۱ است. معلوم می شود که این نسبت ها در متمایز بودن اصوات صدا دار، نقش اصلی را بازی می کنند.
- نسبت های $f2/f1$ و $f3/f1$ برای صدای "oo" در مردها ۲.۳۱ و ۵.۰۹ و در زن ها ۲.۴۶ و ۵.۷ است.



و من الله توفيق