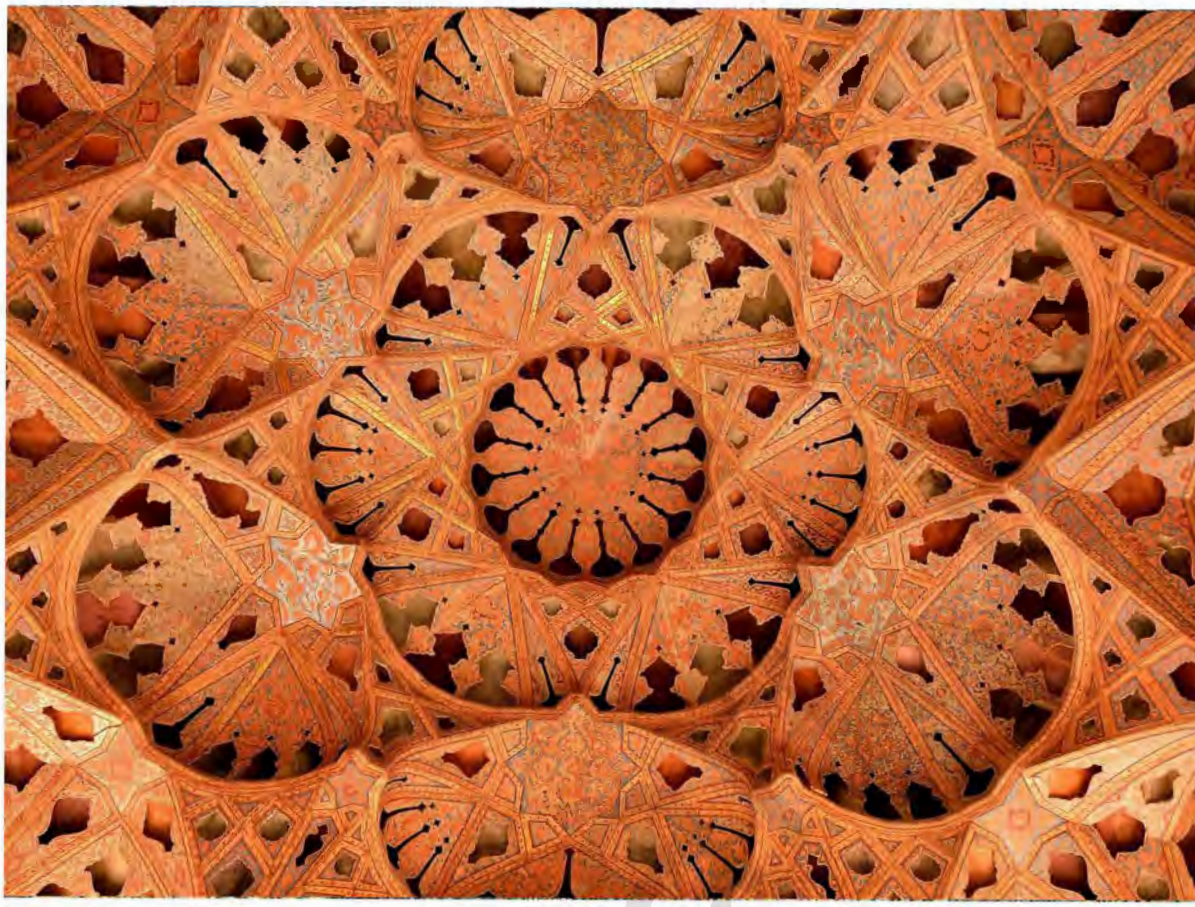
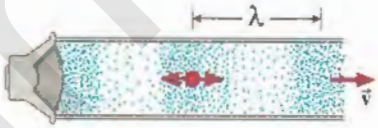


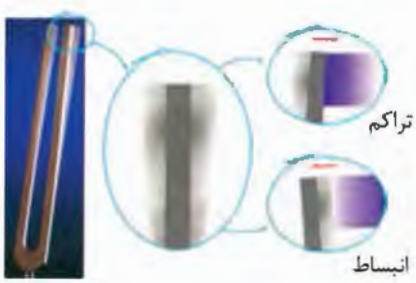
۵ صوت

همان‌گونه که در ابتدای مبحث موج مکانیکی بیان شد، دو نوع موج مکانیکی وجود دارد: *امواج عرضی* که به نوسانی عمود بر جهت حرکت موج مربوط می‌شود؛ و *امواج طولی* که در آن ذرات محیط در راستای انتشار موج نوسان می‌کنند.



صوت، یکی از بهترین نمونه‌ها برای امواج طولی است که در آن، مولکول‌ها یا اتم‌های محیط انتشار، در راستای انتشار صوت، در جای خود نوسان می‌کنند.

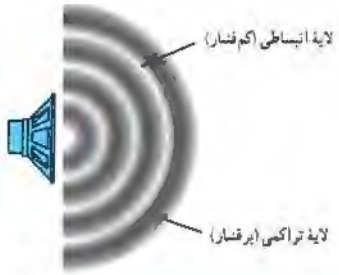
دستگاه‌های لرزه‌نگار برای بررسی پوسته‌ی زمین، کشتی‌ها برای تشخیص موانع زیر آب و ... همگی از امواج صوت استفاده می‌کنند.



یک منبع صوت مانند دیاپازون را در نظر می‌گیریم که هوای مجاور آن در تعادل است و چگالی و فشار آن در همه جا ثابت و به ترتیب برابر ρ_0 و P_0 است. هنگامی‌که شاخه‌های دیاپازون شروع به ارتعاش می‌نماید، لایه‌های هوای اطراف خود را ابتدا متراکم می‌کند و فشار و چگالی آن را نسبت به حالت تعادل اندکی افزایش می‌دهد. این لایه‌های تراکمی نیز لایه‌های مجاور

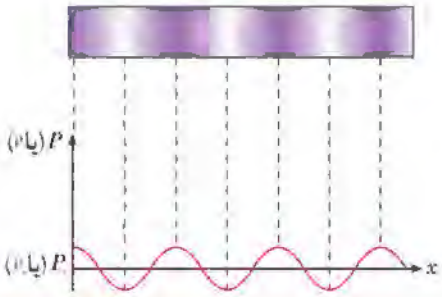
Sanatisharif
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

خود را متراکم می‌نمایند و این آشفتگی، به صورت تپ پرفشار در محیط منتشر می‌شود. سپس شاخه‌ی دیاپازون برمی‌گردد و لایه‌ی هوای آن منبسط می‌شود و چگالی و فشار هوای مجاور آن نسبت به حالت تعادل کاهش می‌یابد.



این لایه‌ی هوای کم‌فشار نیز به صورت یک تپ در محیط انتشار می‌یابد. بنابراین ارتعاش یک منبع صوت مانند دیاپازون سبب می‌شود که تپ‌های متوالی تراکم و انبساط در هوا منتشر شوند.

دقت داریم که این لایه‌های تراکم و انبساط، در همه‌ی جهت‌ها منتشر می‌شوند. بنابراین انتشار صوت در سه بعد صورت می‌گیرد و جبهه‌های موج، به صورت کروی منتشر می‌شوند.



نکته: گاهی اوقات برای نشان دادن موج‌های طولی، از نمودار تغییرات فشار یا چگالی برحسب مکان استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل مقابل دیده می‌شود، قله‌های موج، نقاطی هستند که تراکم و افزایش فشار نسبت به حالت تعادل وجود دارد.

۵-۱. سرعت انتشار صوت

می‌دانیم سرعت انتشار موج، جزء ویژگی‌های محیط انتشار موج است. انتشار صوت در محیط به صورت پیش‌روی تراکم و انبساط‌های متوالی انجام می‌شود. هر چه محیط متراکم‌تر باشد، سرعت انتشار صوت در آن بیشتر است؛ زیرا تپ ایجاد شده در زمان کمتری به نقطه‌ی مجاور منتقل می‌شود. بنابراین سرعت انتشار صوت در جامدها بیش‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها بیش‌تر از گازها است.

می‌توان نشان داد سرعت انتشار صوت در گازها از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V=\sqrt{\gamma\frac{RT}{M}} \qquad (۱-۵)$$

در این رابطه، T دمای مطلق گاز بر حسب کلوین (K)، M جرم مولکولی گاز برحسب ($\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{mol}}$) و R ثابت جهانی گازها ($R=۸/۳۱۴\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol.K}}$) و γ ضریب اتمیسیته است.

ضریب اتمیسیته، بنا به تعریف به صورت نسبت گرمای ویژه در فشار ثابت (C_P) به گرمای ویژه در حجم ثابت (C_V) تعریف می‌شود و طبق آنچه از ترمودینامیک به یاد داریم، این مقادیر بسته با آن دارد که گاز مورد نظر تک اتمی، دو اتمی یا چند اتمی باشد.

$$\gamma=\frac{C_P}{C_V} \qquad (۲-۵)$$

نکته: با توجه به آنکه معمولاً C_P و C_V برای گازهای تک اتمی، $\frac{۳}{۲}R$ و $\frac{۵}{۲}R$ و برای گازهای دو اتمی، $\frac{۵}{۲}R$ و $\frac{۷}{۲}R$ در نظر گرفته می‌شود، می‌توان ضریب اتمیسیته را برای گازهای تک اتمی و چند اتمی به صورت $\gamma_{\text{تک اتمی}}=\frac{۵}{۳}$ و $\gamma_{\text{دو اتمی}}=\frac{۷}{۵}$ در نظر گرفت.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۱

سرعت انتشار صوت در هوای با دمای $27^\circ C$ چند متر بر ثانیه است؟ (جرم مولی هوا $29\frac{g}{mol}$ است و هوا را یک گاز دو اتمی در نظر بگیرید.)

مثال ۲

اگر سرعت انتشار صوت در هیدروژن با دمای $-3^\circ C$، ۲۰ ٪ بیشتر از سرعت انتشار صوت در گاز اکسیژن باشد، دمای گاز اکسیژن چند درجه‌ی سلسیوس است؟ (جرم مولی اکسیژن، ۱۶ برابر جرم مولی هیدرژن است.)

نکته: اگر محیط انتشار صوت، یک گاز کامل باشد، با استفاده از قانون عمومی گازها، می‌توان رابطه‌ی زیر را برای تعیین سرعت انتشار صوت تعیین کرد:

$$V = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \qquad (۳-۵)$$

مثال ۳

اگر فشار هوا $1\ atm$ و چگالی آن $1/4\frac{kg}{m^3}$ باشد، سرعت صوت در هوا تقریبا چند متر بر ثانیه است؟

مثال ۴

فشار مقداری گاز دو برابر می‌شود. در هرکدام از حالت‌های زیر تعیین کنید سرعت صوت در آن چند برابر می‌شود؟

الف) اگر افزایش فشار در دمای ثابت باشد.

ب) اگر افزایش فشار در حجم ثابت باشد.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

نکته: اگر سرعت انتشار صوت در هوای با دمای $0^\circ C$ را با V_0 نمایش دهیم، به ازای تغییرات کوچک دما، می‌توان رابطه‌ی تقریب زیر را برای تعیین سرعت انتشار صوت در هوا به کار برد:

$$V \simeq V_0 + 0/61\theta \qquad (۴-۵)$$

مثال ۵

رابطه‌ی تقریبی ۵-۳ را ثابت کنید.

۵-۲. لوله‌های صوتی (تشکیل امواج ایستاده)

از فصل قبل به خاطر دارید که روی ریسمان کشیده‌ی با دو انتهای ثابت می‌توان موج استاده به وجود آورد. علت به وجود آمدن امواج استاده، بازتاب موج رونده از دو طرف ریسمان است. اگر طول ریسمان تطبیق مناسبی با طول ریسمان داشته باشد، برهم‌نهی امواجی که در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند، یک الگوی موج ایستاده به وجود می‌آورند. طول موج لازم برای چنین تطبیقی با یک *فرکانس تشدید* ریسمان متناظر است. مزیت ایجاد امواج ساکن این است که تار مرتعش می‌تواند نوسانی با دامنه‌ی پایدار و بزرگ داشته باشد و با پیش و پس راندن هوای اطراف، یک موج صوتی با همان فرکانس تار را ایجاد کند!

به نحوی مشابه می‌توانیم در یک لوله‌ی صوتی نیز امواج ایستاده تشکیل دهیم. هنگامی‌که در دهانه‌ی لوله می‌دمیم، در هوای درون آن موج صوتی منتشر می‌شود و درون آن پیش می‌رود. این موج هنگامی‌که به انتهای لوله می‌رسد، بازتاب شده و باز می‌شود. از برهم‌نهی موج‌های فرودی و بازتاب، موج ایستاده تشکیل می‌شود.

توجه داریم که بازتاب حتی در صورت باز بودن انتهای لوله نیز رخ می‌دهد، ولی این بازتاب بر خلاف بازتاب از انتهای بسته‌ی لوله، یک بازتاب کامل نیست. بسته به آنکه انتهای لوله، باز یا بسته باشد، رفتار موج بازتاب متفاوت خواهد بود:

- اگر انتهای لوله بسته باشد، مولکول‌های هوا نمی‌توانند در این انتها نوسان طولی داشته باشند و در نتیجه در انتهای بسته، گره ایجاد می‌شود. در این نقاط، لایه‌های هوا ساکن می‌مانند.
- اگر انتهای لوله باز باشد، مولکول‌ها می‌توانند آزادانه در آن نقاط نوسان کنند و در صورتی که قطر لوله در مقایسه با طول موج، کوچک باشد، در این انتها شکم تشکیل می‌شود. در این نقاط، ذرات محیط با بیشترین دامنه نوسان می‌کنند.

۵-۲-۱. لوله‌ی صوتی با دو انتها باز

همانگونه که قبلا بیان شد، در دو انتهای باز لوله، شکم تشکیل خواهد شد. در ساده‌ترین حالت (حالت اصلی) تنها دو شکم و یک گره وجود دارد. اگر طول لوله را با L، و طول موج ایجاد شده در این حالت را با λ_1 نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\lambda_1 = 2L \qquad (۵-۵)$$

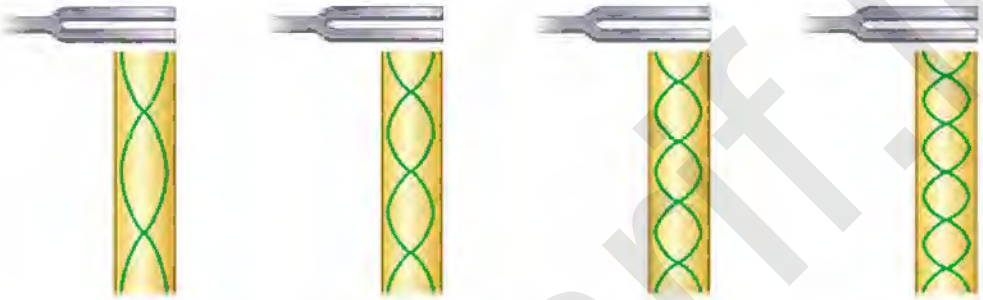
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

و با توجه به رابطه‌ی بین طول موج، سرعت انتشار موج (V) و بسامد آن، می‌توان نوشت:

$$f_1 = \frac{V}{2L} \qquad (۶-۵)$$

بسامد صوت تشدید شده در این لوله‌ی صوتی (f_1) را **بسامد صوت اصلی** یا **هماهنگ اول** می‌نامیم. این بسامد، کم‌ترین بسامدی است که می‌تواند در این لوله تشدید شود.

هماهنگ‌های دیگر زمانی صورت می‌گیرد که در طول لوله‌ی صوتی به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ... گره تشکیل شده باشد. در اینصورت مشاهده می‌شود که تعداد گره‌ها همواره یکی کم‌تر از تعداد شکم‌ها است.



برای صوت هماهنگ n اُم که در آن n گره و $n+1$ شکم تشکیل شده است، می‌توان نوشت:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} = \frac{\lambda_1}{n} \qquad (۷-۵)$$

$$f_n = \frac{nV}{2L} = nf_1 \qquad (۸-۵)$$

نکته: از دقت در روابط بالا می‌توان نتیجه گرفت:

- اگر طول موج صوت تشدید شده در لوله، λ باشد، طول لوله **مضرب زوجی** از $\frac{\lambda}{4}$ بوده و در اینصورت $L = 2n\frac{\lambda_n}{4}$ است.
- لوله‌ی صوتی دو سر باز، تنها با بسامدهای معیّنی می‌تواند صوت تولید کند که همگی مضرب صحیح بسامد صوت اصلی هستند.
- لوله‌ی صوتی دو سر باز همه‌ی **هماهنگ‌های زوج** و **فرد** را می‌تواند تولید کند.
- طول موج صوت اصلی، متناسب با طول اولیه لوله است و به عامل دیگری بستگی ندارد.
- بسامد صوت اصلی با طول لوله نسبت عکس و با سرعت انتشار صوت در گاز داخل لوله نسبت مستقیم دارد.

مثال ۶

در یک لوله‌ی صوتی، ۴ شکم و ۳ گره تشکیل شده و فاصله‌ی میان هر دو گره متوالی، $10\,cm$ است. اگر سرعت انتشار صوت در این لوله $330\,\frac{m}{s}$ باشد، بسامد صوت اصلی این لوله چند هرتز است؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

۵-۲-۲. لوله‌ی صوتی با یک انتها باز (یک انتها بسته)

در این حالت درانتهای باز لوله، شکم و در انتهای بسته‌ی آن گره تشکیل خواهد شد. در ساده‌ترین حالت (حالت اصلی) تنها یک شکم و یک گره وجود دارد. اگر طول لوله را با L، و طول موج ایجاد شده در این حالت را با λ_1 نشان دهیم، خواهیم داشت:

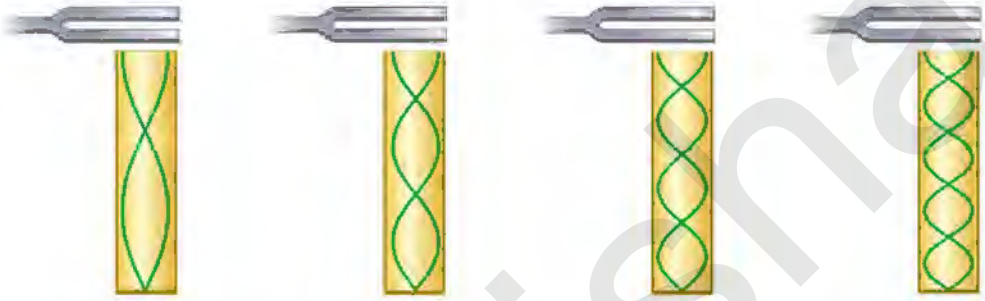
$$\lambda_1 = 4L \qquad (۹-۵)$$

و با توجه به رابطه‌ی بین طول موج، سرعت انتشار موج (V) و بسامد آن، می‌توان نوشت:

$$f_1 = \frac{V}{4L} \qquad (۱۰-۵)$$

بسامد صوت تشدید شده در این لوله‌ی صوتی (f_1) را **بسامد صوت اصلی** یا **هماهنگ اول** می‌نامیم. این بسامد، کم‌ترین بسامدی است که می‌تواند در این لوله تشدید شود.

هماهنگ‌های دیگر زمانی صورت می‌گیرد که در طول لوله‌ی صوتی به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ... گره تشکیل شده باشد. در اینصورت مشاهده می‌شود که تعداد گره‌ها همواره با تعداد شکم‌ها برابر است.



برای صوت هماهنگ $2n-1$ام که در آن n گره و n شکم تشکیل شده است، می‌توان نوشت:

$$\lambda_{2n-1} = \frac{4L}{2n-1} = \frac{\lambda_1}{2n-1} \qquad (۹-۵)$$

$$f_{2n-1} = (2n-1)\frac{V}{4L} = (2n-1)f_1 \qquad (۱۰-۵)$$

نکته: از دقت در روابط بالا می‌توان نتیجه گرفت:

- اگر طول موج صوت تشدید شده در لوله، λ باشد، طول لوله **مضرب فردی** از $\frac{\lambda}{4}$ بوده و در اینصورت $L = (2n-1)\frac{\lambda_{2n-1}}{4}$ است.
- لوله‌ی صوتی یک انتها باز، تنها با بسامدهای معیّنی می‌تواند صوت تولید کند که همگی مضرب فرد بسامد صوت اصلی هستند.
- لوله‌ی صوتی یک سر باز، فقط **هماهنگ‌های فرد** را می‌تواند تولید کند.
- طول موج صوت اصلی، متناسب با طول اولیه لوله است و به عامل دیگری بستگی ندارد.
- بسامد صوت اصلی با طول لوله نسبت عکس و با سرعت انتشار صوت در گاز داخل لوله نسبت مستقیم دارد.

sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

نکته: هنگام تشکیل موج ایستاده در لوله‌های صوتی، در محل گره‌ها، نوسان‌های فشار، شدید و در در محل شکم‌ها، نوسان‌ها فشار ناچیز است.

نکته: در هر دو نوع لوله صوتی داریم:

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{\text{شماره‌ی هماهنگ}} \qquad (۱۱-۵)$$

$$f = \text{شماره‌ی هماهنگ} \times f_1 \qquad (۱۲-۵)$$

در این رابطه‌ها، شماره‌ی هماهنگ برای لوله‌ی صوتیِ دو سر باز، n و برای لوله‌ی صوتیِ یک انتها باز، $2n-1$ است.

مثال ۷

در یک لوله صوتی هنگام تولید صوت با بسامد $900\,\text{Hz}$ ، تعداد ۳ گره و ۳ شکم تشکیل شده است.

الف) برای تولید صوت با بسامد $1260\,\text{Hz}$، چند گره در لوله ایجاد می‌شود؟

ب) اگر در لوله ۵ گره ایجاد شده باشد، بسامد صوت تولید شده چند هرتز می‌شود؟

ج) اگر سرعت صوت در گاز داخل لوله $360\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ باشد، طول لوله چند سانتی‌متر است؟

مثال ۸

اگر سرعت صوت در هوا $340\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ و طول یک لوله صوتی $85\,\text{cm}$ باشد، بسامد اصلی لوله و بسامد چهار هماهنگ بعدی را در هر کدام از حالت‌های زیر حساب کنید:

الف) لوله‌ی صوتی، دو سر باز باشد.

ب) لوله‌ی صوتی، یک انتها باز باشد.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۹

یک دیاپازون در مقابل دهانه‌ی لوله‌ی صوتی یک سر باز قرار دارد و در اثر تشدید، درون لوله ۵ گره تشکیل می‌شود.

اگر انتهای دیگر لوله را باز کنیم و همین دیاپازون را در مقابل لوله قرار دهیم، در لوله چند شکم ایجاد می‌شود؟

مثال ۱۰

بسامد دو هماهنگ متوالی یک لوله صوتی، $750\,Hz$ و $1050\,Hz$ است.

الف) این لوله از چه نوعی است؟

ب) وقتی در این لوله ۵ گره تشکیل شود، بسامد صوت حاصل چند هرتز می‌شود؟

مثال ۱۱

بسامد دو هماهنگ متوالی یک لوله صوتی، $600\,Hz$ و $900\,Hz$ است.

الف) این لوله از چه نوعی است؟

ب) وقتی در این لوله ۴ گره تشکیل شود، بسامد صوت حاصل چند هرتز می‌شود؟

مثال ۱۲

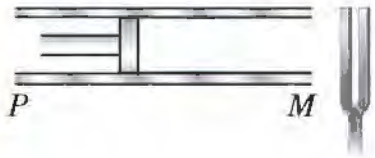
لوله‌ی صوتی A دو سر باز و بسامد صوت اصلی آن $400\,Hz$ است. لوله‌ی صوتی B یک انتها بسته و بسامد اصلی آن $300\,Hz$ است. اگر این لوله‌ها را پشت سرهم ببندیم، بسامد اصلی لوله‌ی حاصل چند هرتز می‌شود؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۱۳

یک دیاپازون با بسامد $850\,Hz$ در مقابل دهانه یک لوله صوتی به طول $90\,cm$ قرار دارد و در اثر تشدید، در لوله گره و شکم به‌وجود می‌آید. می‌خواهیم قطعه‌ای از لوله ببُریم. حداقل چند سانتی‌متر و از کدام قسمت طول لوله را کوتاه کنیم تا باز هم لوله بتواند صوت با بسامد $850\,Hz$ را تقویت کند؟ (سرعت صوت $340\,\frac{m}{s}$ است.)

مثال ۱۴

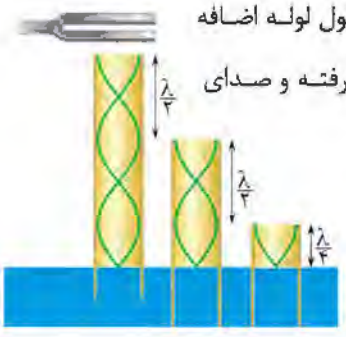


در شکل مقابل، سرعت صوت $330\,\frac{m}{s}$ و بسامد دیاپازون $850\,Hz$ است. پیستون را به آرامی از نقطه‌ی M به نقطه‌ی P حرکت می‌دهیم و از P خارج می‌کنیم. در هر یک از حالت های زیر چند مرتبه تشدید اتفاق می‌افتد؟

الف) $PM = 100\,cm$

ب) $PM = 103\,cm$

نکته: در شکل مقابل، اگر لوله را از وضعیتی که کاملاً در آب قرار دارد، به تدریج بالا ببریم، یک یلوله‌ی صوتی یک انتها بسته ایجاد می‌شود. هنگامی که طول قسمت بیرونی لوله، $\frac{\lambda}{4}$ می‌شود، صدای دیاپازون در لوله تشدید شده و بلندتر شنیده می‌شود. به تدریج که لوله را بیرون می‌بریم، به ازای هر $\frac{\lambda}{2}$ که به طول لوله اضافه می‌شود، یک بار دیگر تشدید صورت گرفته و صدای دیاپازون بلندتر شنیده خواهد شد.

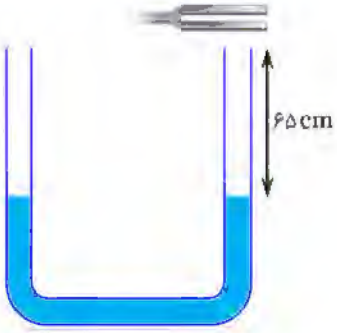


Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۱۵

در شکل مقابل، سرعت انتشار صوت $۳۲۰\frac{m}{s}$ و بسامد دیاپازون $۵۰۰Hz$ است. اگر با بازکردن شیر پایین لوله، ارتفاع آب با سرعت $۲\frac{cm}{s}$ کاهش یابد، در چه لحظاتی صدای دیاپازون توسط لوله تشدید می‌شود؟

مثال ۱۶ سراسری ریاضی ۹۴



در شکل مقابل، بسامد دیاپازون $۶۸۰Hz$ و سطح مقطع لوله در هر شاخه $۱cm^۲$ است. اگر سرعت انتشار صوت برابر $۳۴۰\frac{m}{s}$ باشد، برای اینکه درون لوله تشدید حاصل شده و در آن سه شکم تشکیل شود، باید چند سانتی‌متر مکعب آب در لوله‌ی سمت چپ بریزیم؟

۵-۳. شدت صوت

در بخش مربوط به موج مکانیکی دیدیم که موج با خود انرژی حمل می‌کند و این انرژی با مجذور دامنه و مجذور بسامد موج متناسب است. این بیان در مورد موج‌های صوتی نیز درست است.

بنا به تعریف، مقدار انرژی‌ای که در واحد زمان به واحد سطح عمود بر راستای انتشار موج می‌رسد، شدّت صوت نامیده می‌شود. بنابراین اگر در مدّت Δt به مقدار انرژی E به سطحی با مساحت A که بر راستای انتشار موج عمود است برسد، شدّت صوت در این محل که آن را با I نشان می‌دهیم، برابر است با:

$$I=\frac{E}{A.\Delta t}=\frac{P}{A} \qquad (۱۳-۵)$$

یکای شدت صوت در این رابطه، وات بر متر مربع ($\frac{W}{m^۲}$) است.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

از آنجا که در محیط‌های همسان‌گرد و یکنواخت، صوت به صورت کروی منتشر می‌شود، لذا می‌توان شدت صوت ایجاد شده از یک چشمه‌ی نقطه‌ای، در فاصله‌ی r از منبع صوت را به صورت زیر تعیین کرد:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad (۱۴-۵)$$

این رابطه نشان می‌دهد که با چشم پوشی از اتلاف انرژی در هوا ـ که فرض چندان درستی نیست! ـ شدت صوت در هر نقطه، با مجذور فاصله تا چشمه‌ی صوت رابطه‌ی عکس دارد.

مثال ۱۷

به سطح یک میکروفون که مساحت آن $3\,cm^2$ است، در مدت یک دقیقه $0/18\,nJ$ انرژی صوتی می‌رسد. شدت صوت در سطح میکروفون چند میلی وات بر متر مربع است؟ (سطح میکروفون عمود بر راستای انتشار صوت است.)

مثال ۱۸

در محلّی که شدّت صوت $0/5\,\frac{W}{m^2}$ است، یک گیرنده‌ی صوتی به مساحت $1000\,cm^2$ طوری قرار گرفته که سطح آن با راستای انتشار موج زاویه 37° می‌سازد. در مدّت ۵ دقیقه، چند ژول انرژی به این گیرنده می‌رسد؟

نکته: برای دو شنونده‌ی A و B که به ترتیب در فاصله‌های r_A و r_B از یک چشمه‌ی صوت با توان ثابت قرار داشته باشند، می‌توان نوشت:

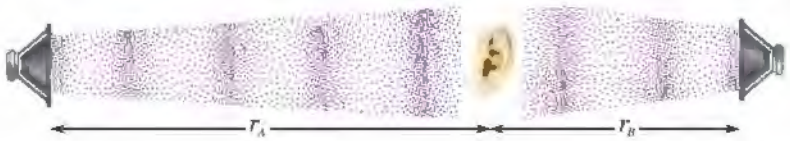
$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^2 \qquad (۱۵-۵)$$

نکته: برای دو شنونده‌ی A و B که به ترتیب در فاصله‌های r_A و r_B از دو چشمه‌ی صوت متفاوت قرار دارند، می‌توان نوشت:

$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{f_B}{f_A}\right)^2 \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2 \left(\frac{r_A}{r_B}\right)^2 \qquad (۱۶-۵)$$

در این رابطه، A دامنه‌ی نوسانات چشمه‌ها و f بسامد نوسانات آنها است.

طبیعی است که می‌توان این رابطه را برای یک ناظر که در فاصله‌ی مختلفی از دو چشمه‌ی متفاوت قرار دارد، نیز به کار برد.



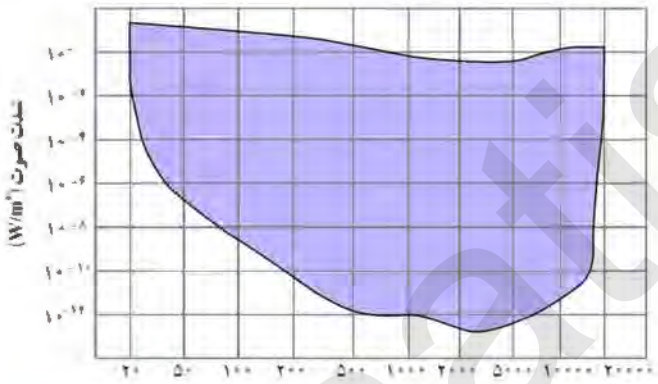
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۱۹

شدت صوت حاصل از یک چشمه‌ی صوتی در فاصله‌ی d از آن برابر $۵\ \frac{W}{m^۲}$ است. اگر طول موج صوت نصف و دامنه‌ی آن دو برابر شود، شدت صوت در فاصله‌ی $۲d$ از آن چقدر می‌شود؟ (محیط انتشار صوت تغییر نکرده و از جذب انرژی توسط هوا صرف نظر می کنیم.)

نکته: برای شنوایی انسان سالم محدودیت‌هایی وجود دارد. گوش انسان سالم نمی‌تواند بسامدهای خارج از بازه‌ی $۲۰Hz$ تا $۲۰۰۰۰Hz$ را بشنود. به همین دلیل صوت‌های با بسامد بیش از این محدوده را فراصوت و صوت‌های با بسامد کم‌تر از $۲۰Hz$ را فروصوت می‌نامند.

از سوی دیگر، محدودیت دیگری برای شنیده شدن صدا، از نظر شدت صوت نیز وجود دارد. آهسته‌ترین صدایی را که انسان می‌تواند بشنود، آستانه‌ی شنوایی و بلندترین صدایی که انسان می‌تواند بشنود، بدون آنکه به گوش او به درد آید، آستانه‌ی دردناکی نامیده می‌شود.



توجه به این نکته ضروری است که آستانه‌ی شنوایی و آستانه‌ی دردناکی، به بسامد صوت بستگی دارد.

به عنوان مثال، آستانه‌ی شنوایی و دردناکی برای صوت با بسامد $۱۰۰Hz$ به ترتیب حدود $۱۰^{-۹}\ \frac{W}{m^۲}$ و $۵۰\ \frac{W}{m^۲}$ است. اما برای صوت با بسامد $۱۰۰۰Hz$ به ترتیب $۱۰^{-۱۲}\ \frac{W}{m^۲}$ و $۱\ \frac{W}{m^۲}$ است.

۵-۴. تراز شدت صوت

دیدیم که دامنه‌ی شنوایی گوش انسان برحسب شدت صوت، بین $۱۰^{-۱۲}\ \frac{W}{m^۲}$ تا $۱\ \frac{W}{m^۲}$ است. معمولاً برای کار با مقادیری در چنین گستره‌ی وسیعی از لگاریتم استفاده می‌نماییم. به همین خاطر به جای صحبت از شدت صوت (I) بهتر است از تراز شدت صوت (β) با تعریف زیر بهره بگیریم:

$$\beta = ۱۰\log\frac{I}{I_۰} \qquad (۱۷-۵)$$

در این رابطه، یکای تراز شدت صوت دسی‌بل (dB) در نظر گرفته شده است. همچنین، یک شدت مرجع استاندارد و برابر $I_۰ = ۱۰^{-۱۲}\ \frac{W}{m^۲}$ است. علت انتخاب این مقدار، نزدیکی آن به حد پایین شنوایی (آستانه‌ی شنوایی در بسامد $۱۰۰۰Hz$) است. $I_۰$ را شدت صوت مبنا نیز می‌نامیم.

SanatiSharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۰

شنونده‌ای، صوتی با بسامد $25\,Hz$ را با شدت $8\times10^{-3}\ \frac{\mu W}{m^2}$ می‌شنود. تراز شدت این صوت چند دسی‌بل است؟

$(I_0=10^{-12}\ \frac{W}{m^2}$ و $\log2=0/3)$

مثال ۲۱

یک منبع صوت با توان ۱۲ وات، صوتی را در همه‌ی جهات پخش می‌کند. با چشم پوشی از تلفات انرژی، تراز شدت صوت دریافتی در فاصله‌ی ۲۰ متری از این منبع صوت چند دسی‌بل است؟ $(I_0=10^{-12}\ \frac{W}{m^2}$، $\log2=0/3$ و $\pi=3)$

نکته: اختلاف تراز شدت صوت ایجاد شده توسط دو منبع، یا تغییر تراز شدت صوت حاصل از یک منبع، در اثر تغییر محل ناظر را می‌توان به کمک رابطه‌ی زیر تعیین کرد:

$$\Delta\beta=\beta_2-\beta_1=10\log\frac{I_2}{I_1} \qquad (۱۸-۵)$$

مثال ۲۲

اگر در فاصله‌ی ۵ متری از یک منبع صوت با بسامد f، تراز شدت صوت دریافتی $60\,dB$ باشد، شخصی با آستانه‌ی شنوایی ۲۰ دسی‌بل برای بسامد f، حداکثر تا چه فاصله‌ای از منبع صوت می‌تواند صدای آن را بشنود؟ (از اتلاف انرژی چشم‌پوشی نمایید.)

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۳

اگر در فاصله‌ی ۲ متری از یک چشمه‌ی صوت نقطه‌ای، تراز شدت صوت دریافتی $50\,dB$ باشد، این شخص چند متر از چشمه دور شود تا تراز شدت صوت دریافتی $36\,dB$ شود؟ (از اتلاف انرژی چشم‌پوشی نمایید و $\log 2 = 0/3$)

مثال ۲۴

شخصی در فاصله‌ی ۳۰ متری یک چشمه‌ی صوت قرار دارد. اگر دامنه و بسامد یک موج صوتی را هم‌زمان، ۲ برابر و نیز فاصله‌ی شخص تا چشمه را ۱۰ متر کاهش دهیم، تراز شدت صوت برای شنونده چند دسی‌بل تغییر می‌کند؟ (از اتلاف انرژی چشم‌پوشی نمایید، $\log 2 = 0/30$ و $\log 3 = 0/48$)

مثال ۲۵

در فاصله ۵ متری از یک بلندگو تراز شدّت صوت دریافتی $80\,dB$ است. اگر ۱۰ بلندگوی مشابه از همین نوع را با هم روشن کنیم، تراز شدّت صوت در فاصله‌ی ۲۰ متری چند دسی‌بل می‌شود؟

مثال ۲۵

اگر بسامد یک چشمه‌ی صوت، ۴۰ درصد افزایش و فاصله تا چشمه‌ی صوت، ۳۰ درصد کاهش یابد، تراز شدت صوت چگونه تغییر می‌کند؟ ($\log 2 = 0/3$)

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

۵-۵. اثر دوپلر (ویژه‌ی دانش آموزان رشته‌ی ریاضی)

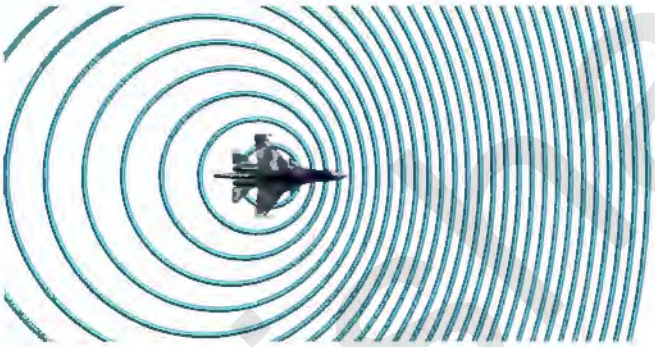
هرگاه چشمه‌ی صوت و شنونده نسبت به هم حرکت کنند، بسامد و طول موجی که شنونده (ناظر) دریافت می‌کند، ممکن است با آنچه چشمه ارسال می‌کند، متفاوت باشد. این پدیده با نام اثر دوپلر معروف است. در ادامه به طور مستقل به بررسی تغییر طول موج و بسامد دریافت شده توسط ناظر می‌پردازیم:

الف) تغییر طول موج: اگر چشمه‌ی صوت با سرعت V_S به ناظر نزدیک یا از آن دور شود، چشمه در بازه‌ی زمانی بین گسیل یک جبهه‌ی موج و جبهه‌ی موج بعدی، به اندازه‌ی $V_S T_S$ جابه‌جا می‌شود. بنابراین طول موجی که ناظر دریافت می‌کند، به اندازه‌ی $V_S T_S$ نسبت به حالتی که ناظر ساکن باشد، تغییر می‌کند و لذا می‌توان نوشت:

$$\lambda_O = \lambda_S \pm V_S T_S = \frac{V \pm V_S}{f_S} \qquad (۱۸-۵)$$

در این رابطه، V سرعت صوت در محیط انتشار است.

همانگونه که در شکل مقابل دیده می‌شود، اگر ناظر در جلوی چشمه قرار داشته باشد، طول موج کوتاه‌تر (علامت منفی در رابطه‌ی ۵-۱۸) و اگر در پشت چشمه قرار داشته باشد، طول موج بلندتر (علامت مثبت در رابطه‌ی ۵-۱۸) دریافت می‌کند.



نکته: توجه به این نکته بسیار ضروری است که تغییر طول موج دریافتی، فقط به سرعت چشمه‌ی صوت وابسته است و سرعت حرکت ناظر (V_O) هیچ تغییری در طول موج دریافت شده توسط ناظر نخواهد داشت. (چرا؟)

مثال ۲۷

اگر یک منبع صوت با $\frac{۱}{۵}$ سرعت صوت حرکت کند، طول موج در پشت سر آن $۴۸\,cm$ می‌شود. اگر سرعت صوت در هوا $۳۴۰\,\frac{m}{s}$ باشد،

الف) بسامد چشمه‌ی موج چند هرتز است؟

ب) ناظری که در جلوی چشمه قرار دارد، طول موج را چند سانتی‌متر اندازه گیری می‌کند؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۷

یک منبع صوت با سرعت ثابت حرکت می‌کند و طول موج صوت در جلوی آن $60\,cm$ و طول موج در پشت آن $90\,cm$ است. بسامد صوتی که چشمه تولید می‌کند، چند هرتز است؟ (سرعت صوت در هوا $340\,\frac{m}{s}$ است.)

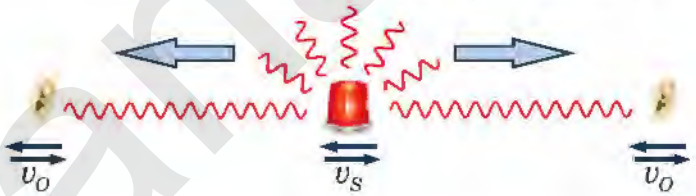
مثال ۲۸

یک چشمه‌ی موج، صوتی با بسامد $500\,Hz$ تولید می‌کند و با سرعت V_S در مسیر مستقیم در حرکت است. اگر اختلاف طول موج بین جلو و عقب چشمه، $4\,cm$ باشد، V_S چند متر بر ثانیه است؟

ب) تغییر بسامد: می‌توان نشان داد اگر یک چشمه‌ی صوت که با بسامد f_S در حال نوسان است، با سرعت V_S و ناظر با سرعت V_O در حرکت باشند، بسامدی که ناظر دریافت می‌کند (f_O) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{f_S}{V-V_S}=\frac{f_O}{V-V_O} \qquad (۱۸-۵)$$

در این رابطه، V سرعت انتشار صوت در محیط است. باید توجه داشت که در آن، کمیت‌های V_S و V_O دارای علامت هستند. برای تعیین علامت این دو کمیت، جهت انتشار صوت از منبع به ناظر را مثبت در نظر می‌گیریم و جهت کمیت مورد نظر را با آن مقایسه می‌نماییم.



مثال ۲۹ کتاب درسی

خودروی پلیس در حالی‌که صوتی با بسامد $4000\,Hz$ گسیل می‌کند، با سرعت $72\,\frac{km}{h}$ به یک عابر ساکن نزدیک شده و سپس از آن دور می‌شود. بسامدی که عابر در دو حالت می‌شنود را تعیین کنید. (سرعت صوت در هوا را $340\,\frac{m}{s}$ در نظر بگیرید.)

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۳۰

یک ماشین آتش‌نشانی صوتی با بسامد $855\,Hz$ منتشر می‌کند و با سرعت $144\,\frac{km}{h}$ به یک خودور که با سرعت $72\,\frac{km}{h}$ در حرکت است نزدیک شده و از آن سبقت می‌گیرد. بسامد صوتی را که راننده در هرکدام از حالت‌های زیر می‌شوند را تعیین کنید: (سرعت صوت در هوا را $340\,\frac{m}{s}$ در نظر بگیرید.)

الف) قبل از رسیدن ماشین آتش‌نشانی به خودرو.

ب) پس از عبور ماشین آتش‌نشانی از خودرو.

مثال ۳۱

خودوری A منبع صوتی با بسامد $990\,Hz$ را حمل می‌کند. اگر سرعت صوت در هوا $330\,\frac{m}{s}$ باشد، در هر یک از حالت‌های زیر بسامد صوتی که سرنشین خودروی B دریافت می‌کند چند هرتز است؟

الف) خودوری A ساکن باشد و خودروی B با سرعت $30\,\frac{m}{s}$ به آن نزدیک شود.

ب) خودوری B ساکن باشد و خودروی A با سرعت $30\,\frac{m}{s}$ به آن نزدیک شود.

ج) هر دو خودور با سرعت‌های یکسان $15\,\frac{m}{s}$ به هم نزدیک شوند.

نکته: در مثال بالا مشاهده می‌شود که هر چند سرعت نسبی متحرک‌ها در همه‌ی حالت‌ها یکسان است، اما نتایج به دست آمده متفاوت است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حل مسائل مربوط به اثر دوپلر، نمی‌توان از حل نسبی کمک گرفت.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۳۲

منبع صوتی با بسامد ۱۰۰۰Hz با $\frac{۱}{۲۰}$ سرعت صوت روی خطّ راست حرکت می‌کند. این منبع به ناظر ساکنی نزدیک می‌شود و از آن می‌گذرد. بسامد صوتی را که ناظر دریافت می‌کند، در هنگام دور شدن و نزدیک شدن حساب کنید. (سرعت صوت در هوا $۳۴۰ \frac{m}{s}$ است.)

نکته: وقتی شنونده ساکن است و چشمه با سرعت v_S به آن نزدیک و سپس با همان سرعت دور می‌شود، بسامد صوتی که شنونده هنگام نزدیک شدن چشمه می‌شنود را f_n و بسامد صوتی که شنونده هنگام دورشدن چشمه می‌شنود را f_f می‌نامیم و در اینصورت داریم:

$$\frac{f_n}{f_f}=\frac{V+|V_S|}{V-|V_S|} \qquad (۵-۱۹)$$

مثال ۳۳

منبع صوتی با سرعت ثابت حرکت می‌کند. بسامد صوتی که ناظرهای ساکن در جلوی منبع دریافت می‌کنند $\frac{۹}{۸}$ برابر بسامدی است که ناظرهای ساکن در پشت منبع دریافت می‌کنند. اندازه سرعت منبع چه کسری از سرعت انتشار صوت است؟

مثال ۳۴ کتاب درسی

خودرویی با سرعت $۷۲ \frac{km}{h}$ در جاده‌ای در حرکت است. صدای آژیر خودرو با بسامد ۶۸۰Hz به صخره‌ای واقع در جلوی مسیر خودرو برخورد می‌کند. صوت بازتاب شده به چه بسامدی به گوش راننده می‌رسد؟ (سرعت صوت $۳۴۰ \frac{m}{s}$ را در نظر بگیرید.)

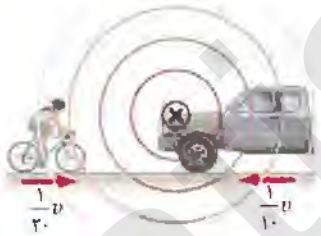
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۳۵ کتاب درسی

سرعت صوت در بافت‌های بدن تقریباً برابر سرعت صوت در آب دریا و برابر $۱۵۰۰ \frac{m}{s}$ است. قسمتی از یک موج فراصوت که به داخل خون فرستاده می‌شود، به وسیله‌ی گلبول‌های خون بازتابیده می‌شود. اگر بسامد پژواک بازگشتی $۴۰۰Hz$ بیشتر از بسامد $۲MHz$ اولیه باشد، سرعت حرکت خون چه مقدار است؟

مثال ۳۵

صوتی با فرکانس $f_S = ۹۰۰Hz$ توسط اتومبیل تولید می‌شود. پس از باز تابش از دوچرخه دوباره به سرنشین اتومبیل می‌رسد بسامدی که سرنشین اتومبیل برای این صوت باز گشته دریافت می‌کند چند هرتز است؟ (V سرعت صوت در هوا است.)



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir