$$c=\sqrt{\frac{۱/۴۰\times۸/۳۱\times۱۰^{۷}\text{dyne}\cdot\text{cm}/\text{moledeg}\times۳۰۰\text{deg}}{۲۸/۸\text{gm}/\text{mole}}}=$$

$$=۳۴۸۰۰\text{cm}/\text{sec}=۳۴۸\text{m}/\text{sec}=۱۱۴۰\text{ft}/\text{sec}$$

که با نتایج حاصل از اندازه گیری کاملا موافق است .

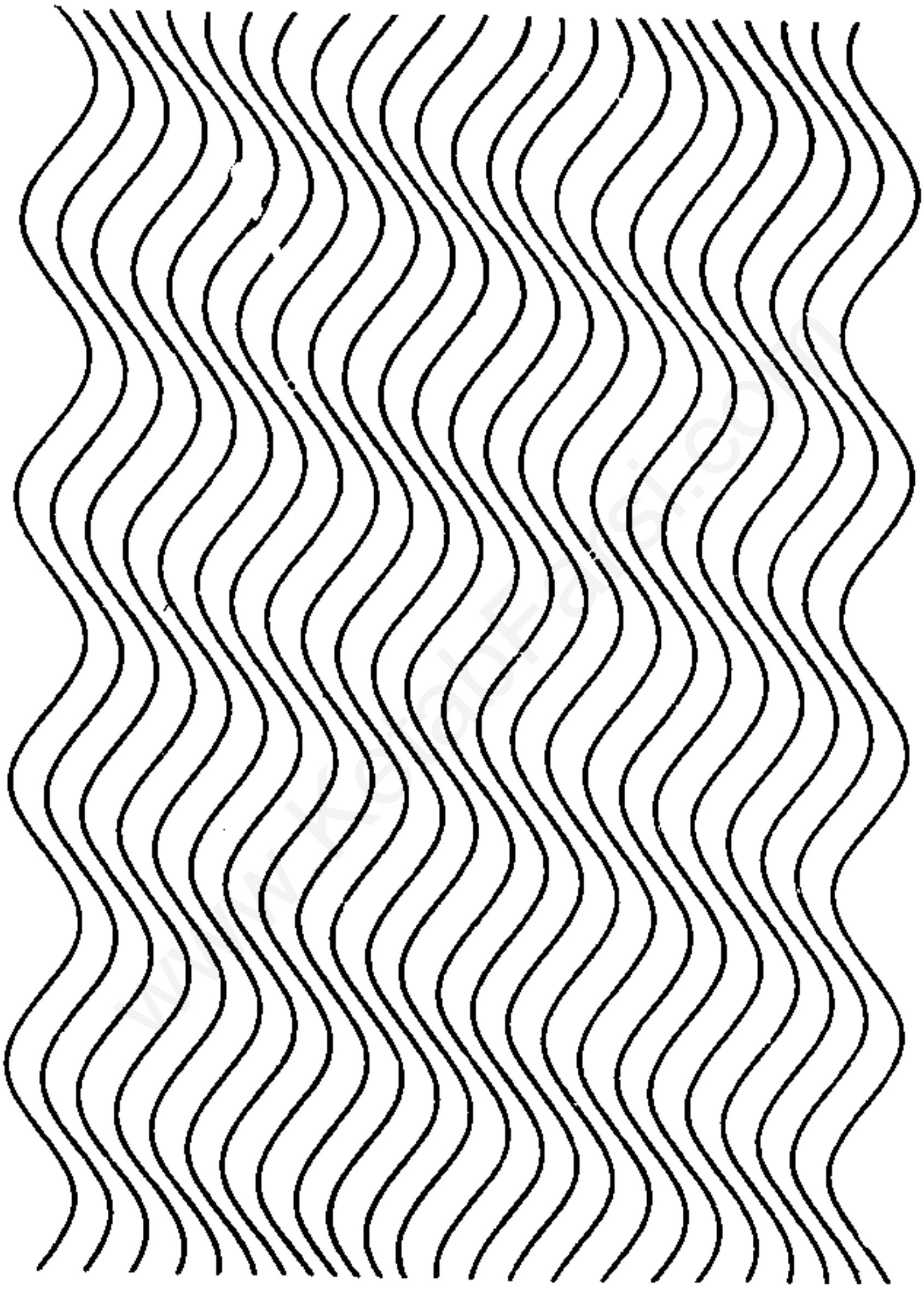
امواج طولی درهوا باعث احساس صوت میشوند . گوش به اصواتی با فرکانس‌های ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ سیکل بر ثانیه حساس است. از رابطه $c=f\lambda$ طول موج‌های نظیر این فرکانس‌ها برابر ۵۶ft (نظیر نت ۲۰cycle/sec) و ۰/۰۵۶ft یا ۵/۸in (نظیر ۲۰۰۰۰cycles/sec) بدست میاید .

طبیعت ملکولی گاز ، در بحث فوق‌الـذکر در نظر گرفته نشده و گاز را محیط متصل فرض کردیم . میدانیم گاز از ملکولهائی تشکیل شده که بطور اتفاقی و باسرعت زیاد در حرکت بوده فاصله ملکولها ازیکدیگر (نسبت بابعاد ملکول) بسیار زیاد است . حرکت ارتعاشی ملکولها بر حرکت اتفاقی آنها اضافه شده ملکولها با برآیند هردو سرعت حرکت میکنند. در دمای معمولی پویش آزاد میانگین $۱۰^{-۵}\text{cm}$ است درحالیکه دامنه موج صوت ممکن است درحدود ۱۰ هزارم این مقدار بـاشد . گازیرا که صوت در آن منتشر میشود میتوان بگروه کثیری ازپشه تشبیه کرد . گروه بطور کلی نوسان کم دامنه‌ای دارد ولی هریك از پشه‌ها در داخل گروه ، حرکت اتفاقی وسریعی دارند .

وقتی امواج انتقالی طولی ازسیالی عبورمیکند **شکل** آنرا تغییر نمی‌دهد . لذا امواج طولی را نمیتوان با وضوحی که امواج عرضی درسیم قابل رؤیت است مشاهده نمود . شکل ۲۱ـ۷ ممکن است در نشاندادن حرکت موجی کمك کند . شکافی در قطعه مقوا یا کاغذی ببرید که طول آن درحدود ۴/۵in و عرض آن $\frac{۱}{۱۶}\text{in}$ باشد شکاف را در بالای شکل قرار دهید و آنرا بـا سرعت ثابت پائین آورید . قسمتی ازمنحنی‌ها که ازمیان شکاف ، قابل رؤیت است به مجموعه‌ای ازذرات شبیه است که در آنها ارتعاش طولی سینوسی وجود دارد. تـوجه داشته بـاشید که هرذره ، حرکت نـوسانی ساده‌ای حول وضع تعادل خود دارد درحالیکه منطقه تراکم و نیز منطقه رقیق شده با سرعت ثابت بطرف راست درحرکت است . هرگاه مقوارا روبیالاحرکت دهیم حرکت موج ازراست بچپ خواهد بود .

۲۱ـ۶ ، موج در کانال‌ها

احتمالا موجهائی راکه دراثر وزش باد ویا دراثر محرك دیگری برسطح آب تشکیل میشود اولین موجی است که همه ما آنرا دیده‌ایم. تنها ملکول‌های واقع درسطح بالائی آب



شکل ۲۱–۷ دیاگرام جهت نشاندادن مواج انتقالی

بحرکت درنمی‌آیندبلکه‌مولکولهائی که درعمق‌هستندنیز بارتعاش درمیایند ولی دامنه ارتعاش، ازپائین ببالاکم میشود. علاوه براین، نوسان هم درامتداد طول وهم درامتداد عرض‌صورت

می‌گیرد. باین دلیل وبدلیل اینکه حرکت مذکور تابع قوانین هیدرودینامیك است، بدست آوردن معادلات حرکت محتاج به اطلاعات ریاضی قبلی است که‌از سطح این کتاب بالاتر است . ما فقط اساس فیزیکی امواج را مورد بررسی قرارمیدهیم

کانال بزرگی را درنظر گیرید که مقطع آن مربع مستطیل و دیواره های آن بدون اصطکاك است ومایع غیرقابل تراکم‌کاملی تا ارتفاع h درآن ریخته شده است. تـوده ویژه مایع ρ وکشش سطحی‌آن γ است. وقتی موجی درون مایع منتشر میشود هرذره آن ازوضع تعادل منحرف شده درامتدادهای افقی وقائم (تواماً) بحرکت ارتعـاشی در میآیند. نیروی ارتجاعی مؤثر برهر ذره ، (یـانیروی بـرگشتی restoring force) قسمتی در اثر اختلاف فشار حاصل ازتغییر ارتفاع‌ذره درحین حرکت‌استوقسمتی دیگر دراثر کشش‌سطحی حاصل انحناء سطح آزاد مایع میباشد. درنتیجه‌ایکه ازحل معادله دیفرانسیل حرکت بدست میآید باید شرائط اولیه نیزصادق باشد یعنی همیشه فشار درسطح آزادمایع برابر فشارجو وبعد ذرات درکف‌کانال‌همواره‌صفر باشد.همچنین درمعادله‌حرکت بایداصل‌بقاء نیزصادق‌باشد.

برای نوسانهای ساده‌که درآنها مؤلفه‌های x و y بعد ، توابع سینوسی یا کسینوسی $(x-ct)$ هستند c سرعت انتشار ازرابطه زیرنتیجه میشود .

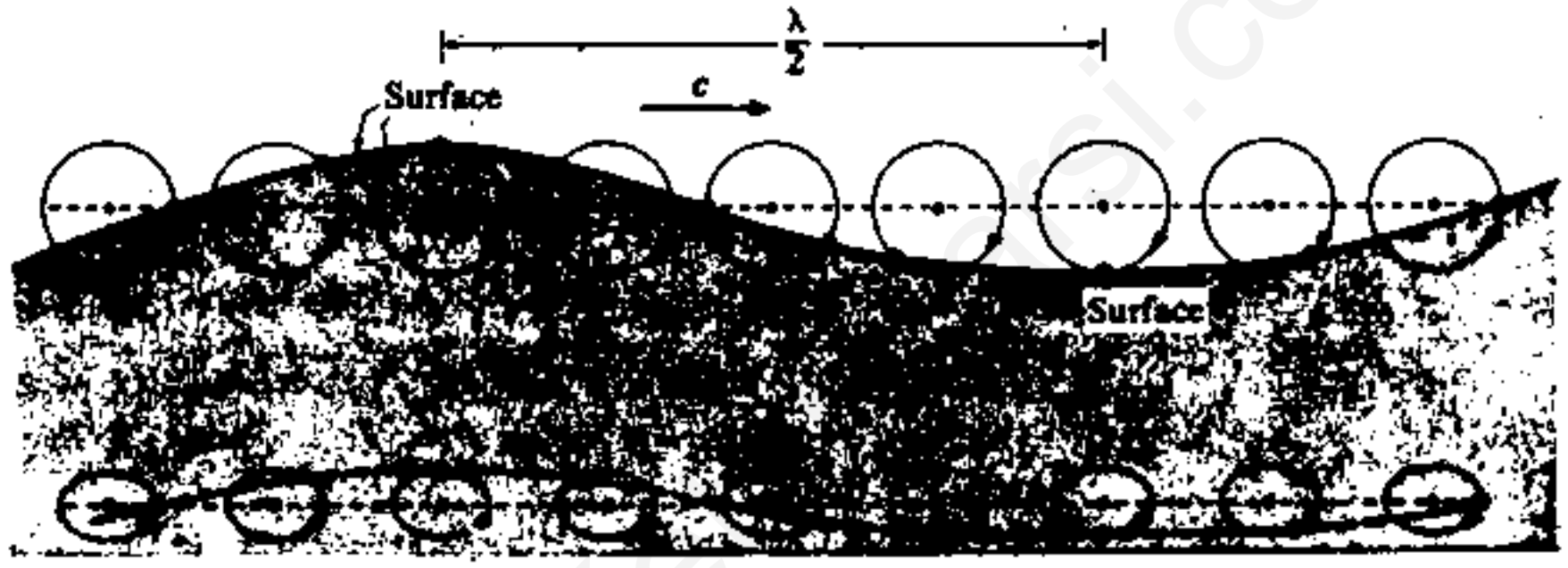
$$c^2=\left(\frac{g\lambda}{2\pi}+\frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}\right)\tanh\frac{2\pi h}{\lambda} \qquad (۱۴-۲۱)$$

که درآن g شتاب ثقل و λ طول موج است .

فوراً متوجه میشویم‌که‌یك اختلاف بسیاراساسی بین فرمول‌فوق وفرمول‌سرعت انتشار موج دریك سیم یا فرمول انتشارموج دریك سیال واقع درداخل یك لوله وجوددارد. سرعت انتشارموج درفرمول۲۱ـ۱۴ نه‌تنها تابع مشخصات محیط است **بلکه تابع طول‌موج** λ **نیزهست** . وقتی وضع چنین است ، گویند محیط بـاعث **تجزیه** امواج میشود و یـا dispersive است . دربسیاری از انواع موج مثلا در امواج نورانی‌که از منشورعبور میکند سرعت انتشار تابع طول موج است وبهمین علت نورسفید به طیف‌های رنگین تجزیه میشود وگویند شیشه نور را تجزیه میکند یا **dispersive** است . بطورکلی ، ذرات‌مایع برمحیط بیضی‌هائی‌که درصفحه قائم وموازی طول‌کانال قراردارند درحرکت‌اند . قطراطول این بیضی‌ها افقی است . این حرکت را میتوان تـرکیبی ازدوحرکت نوسانی ساده دانست که فرکانس‌آنها یکی است ولی دامنه حرکت‌آنهـا متفاوت است . یکی ازاین نوسانها در امتداد قائم و دیگری در امتداد افقی واختلاف فاز آنها °۹۰ است . یعنی موج ترکیب دو حرکت نوسانی‌ساده با اختلاف فاز °۹۰ ویا دامنه‌های مختلف است هرگاه طول موج کم و

یا لااقل ، کمتر ازعمق مایع باشد ، اقطار بیضی‌ها درسطح مایع باهم تقریباً مساوی‌هستند و ذرات درسطح مایع برمحیط دوائری حرکت میکنند . هرچه‌درعمق‌مایع بیشترفرو رویم هردو دامنه افقی وقائم موج‌کاهش مییابد ولی مؤلفه قائم بیشترازمؤلفه افقی‌کاهش میابد . درته ظرف مؤلفه قائم صفرشده نوسان فقط طولی است .

شکل ۲۱ـ۸ مسیرذراتی را درسطح‌آزاد مایع و نیزدر عمق معین زیر سطح‌آزادآن نشان میدهد. نقطه‌چین‌افقی‌سطح‌آزاد مایع رادرحال سکون نشان‌میدهد. وضع‌تعادل ملکولها در سطح‌آزاد مرکزدایره است. وقتی موج ازراست بچپ منتشرمیشود ذرات مذکوردرجهت عقربه ساعت برمسیرهای خود حرکت میکنند . خط پرشکل سطح‌آزادآب را درلحظه‌معین نشان میدهد .



شکل ۲۱ـ۸ حرکت ذرات وشکل موجی‌آنها درحین انتشار موج در کانال

نقطه‌چین‌پائینی،سطح‌دیگری ازمایع رادرحال سکون نشان‌میدهد. مسیر ذرات‌دراین‌حال بیضی است ومنحنی خط‌چین‌شکل‌موج‌رادرلحظه‌ایکه سطح‌آزادآب‌بشکل خط پراست، نشان‌میدهد.

همه موجها در خواص چندی مشترك هستند . انتشار ، انعکاس ، جذب ، تـداخل و و تجزیه شدن عمده‌ترین این خواص هستند . این پدیده‌ها را میتوان با دستگاه مخصوصی موردآزمایش قرارداد . دستگاه‌تشکیل‌شده است ازظرف‌کم عمقی‌که‌کف‌آنرا ، صفحه‌شیشه‌ای یا پلاستیکی شفاف تشکیل میدهد . ظرف ازآب یامایع دیگری پراست . منبع نورقوی از زیرظرف نور را از ظرف عبور داده برسطح سقف اطاق ، سایه‌ای از امواج تشکیل میشود موج را بدین ترتیب بوجود میاورندکه‌کره (یاکرات) کوچکی را متناوباً درون‌آب وارد کرده ازآن خارج میکند .

در فرکانس‌های کم ، ممکن است λ درحدود $10\,cm$ بـاشد چون‌کشش سطحی‌آب $70\,dynes/cm$ وچگالی‌آن $1\,gm/cm^3$ است وخواهیم داشت :

$$\frac{g\lambda}{2\pi} = \frac{980 \times 10}{6} = 1600 \qquad \frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda} = \frac{6 \times 70}{10} = 40$$

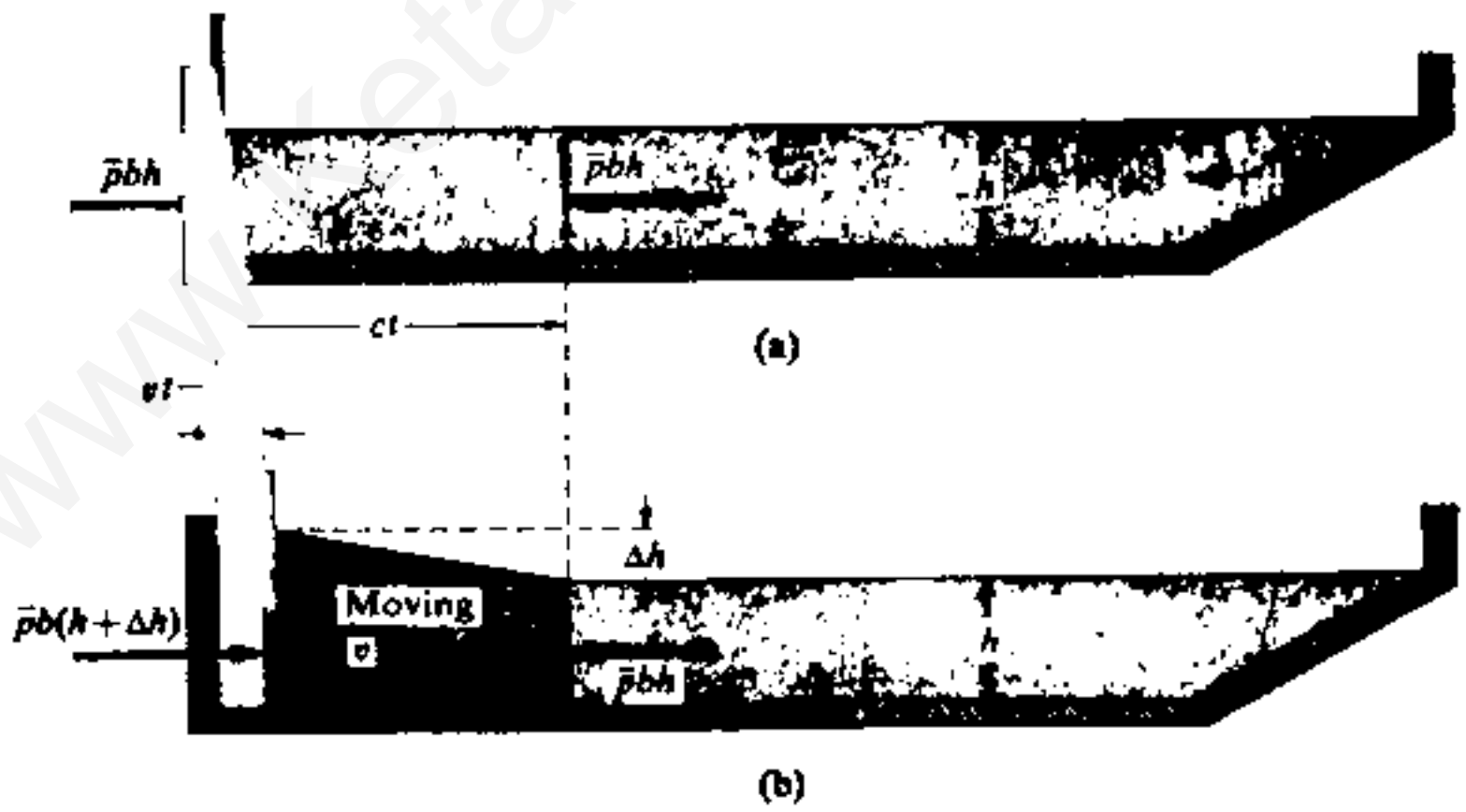
وازآنجا :

$$\frac{2\pi h}{\lambda} = \frac{6 \times 1}{10} = 0/6$$

درچنین شرائطی جمله دوم داخل پرانتزفرمول (۲۱-۱۴) درمقابل جمله اول قابل اغماض وبا درنظرگرفتن اینکه $\tanh \frac{2\pi h}{\lambda}$ تقریباً برابر $\frac{2\pi h}{\lambda}$ است .

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \frac{2\pi h}{\lambda}} = \sqrt{gh} \qquad (۲۱-۱۵)$$

یعنی برای امواج بلند ، سرعت انتشار تابع g شتاب ثقل و h عمقی که موج درآن منتشر میشود میباشد دراینجا سرعت تابع طول موج نیست وتجزیه موج صورت نمی گیرد .چون بنابرفرمول ۲۱-۱۵ هرچه عمق کمترباشد سرعت انتشار نیز کمترمیشود میتوان با شیب‌دار کردن کناره‌های ظرف از انعکاس نیزجلوگیری کرد . موجی که بساحل نزدیك میشود نیز چنین است یعنی سرعت انتشار آن کم شده بصفرمیرسد .



شکل ۲۱-۹ نحوه انتشار امواج در ناحیه توچکی ازظرف کم عمق بعرض b . فشار متوسط $\bar{p}$ عبارتست ازفشار درعمق $\frac{h}{2}$

چون فرمولهای ۲۱-۱۵ درشرائط خاص وساده‌ای بدست‌آمده است ازطریق ساده‌تری نیزمیتوان آنرا بدست آورد . فرض کنید انتهای چپ مایع در ظرف شکل ۲۱-۹ (a) را با سرعت v بطرف راست برانیم پس اززمان t موج حاصل فاصله ct (c سرعت انتشار) و

لایه سمت چپ مایع فاصله vt را طی میکند . چون مایع غیرقابل تراکم است سطح مایع در سمت چپ بناچار مثلا تا ارتفاع Δh بالامیآید . برای آسانی محاسبه ، فرض کنیم شیب سطح آب یکنواخت و بنابراین ارتفاع متوسط آن $\frac{h}{2}$ شود . پس برآیند نیروی افقی وارد برمایع منحرك عبارتست از :

$$\Sigma F_x = \bar{p}b(h+\Delta h) - \bar{p}bh = \bar{p}b\Delta h$$

اما چون $\bar{p} = \frac{1}{2}h\rho g$ پس داریم:

$$\Sigma F_x = \frac{1}{2}h\rho g b\Delta h$$

هر گاه طرفین رابطه فوق را در زمان ضرب کنیم سمت چپ فرمول به ضربه تبدیل میشود یعنی :

$$\text{ضربه} = \frac{1}{2}h\rho g b\Delta h \cdot t$$

جرم مایعی که باسرعت v بحرکت درآمده است برابر حاصلضرب توده ویژه ρ درحجم مایع است. پس :

$$\text{جرم} = \rho bhct$$

وبالاخره اندازه حرکت برابر است با :

$$\text{اندازه حرکت} = \rho bhctv$$

از تساوی اندازه حرکت وضربه نتیجه میشود :

$$\frac{1}{2}h\rho g b\Delta h\, t = \rho ghctv$$

ویا :

$$\frac{1}{2}g\Delta h = cv$$

هر گاه سمت چپ مایع فاصله vt را طی کند حجم مایع جابجاشده $bhvt$ است وچون مایع غیرقابل تراکم است ، این حجم باید برابر حجم منشور مثلث‌القاعده‌ای باشد که در بالای شکل ۲۱-۹ باخط چین رسم شده است پس داریم :

$$bhvt = b \times \frac{1}{2}\Delta hct$$

ویا :

$$v = \frac{c\Delta h}{2h}$$

هرگاه این‌مقدار v را فرمول قبلی‌قرار دهیم خواهیم‌داشت :

$$\frac{1}{2}g\Delta h = \frac{c^2\Delta h}{2h}$$

وبالاخره:

$$c = \sqrt{gh}$$

که همان فرمول ۲۱-۱۵ است .

مسائل

۲۱-۱ (a) ثابت‌کنیدکه $c = \omega/k$، (b) سیمی بطول ۶ متروبه جرم $60\,gm$ با کشش‌معادل $1000\,n$ کشیده میشود . سرعت انتشار امواج‌را درآن بدست‌آورید .

۲۱-۲ یکطرف سیم افقی بیکی از شاخه‌های دیاپازنی‌که با جریان الکتریسیته کار میکند ودرثانیه ۲۴۰ نوسان‌می‌نماید بسته شده است. بانتهای دیگرسیم که‌ازروی‌قرقره‌ای‌عبور کرده وزنه ۶ پوندی آویزان است . جرم هرفوت از سیم $0/00133\,lb$ است. (a) سرعت ارتعاش عرضی رادرسیم و (b) طول‌موج را بدست آورید .

۲۱-۳ معادله موج انتقالی‌عرضی عبارتست از:

$$y = 2\sin\left(\frac{t}{0/01} - \frac{x}{30}\right)$$

که درآن x و y برحسب سانتیمتر و t برحسب ثانیه است . (a) دامنه و(b) طول موج. (c) فرکانس و (d) سرعت انتشار را حساب‌کنید .

۲۱-۴ انتهای لوله‌لاستیکی بطول $50\,ft$ و به جرم $2\,lb$ به نقطه ثابتی وصل است به انتهای دیگرآن نخی‌وصل است‌که ازروی قرقره‌ای عبورکرده بوزنه ۲۰ پوندی‌آویزانی بسته‌میشود. دریکطرف برآن‌ضربه عرضی وارد میکنیم . ارتعاش حاصل پس ازچه زمانی به طرف دیگر میرسد .

۲۱ـ۵ مشخصات یك سیم فلزی ازاین قرار است . ضـ ... ریب انبساط طولی $(C^\circ)^{-1}-۱/۵\times۱۰^{-۵}$ مدول یونگ $۲\times۱۰^{۱۲}dynes/cm^۲$ توده ویژه $۹/۰gm/cm^۳$ وطرفین آن بدو نقطه ثابت بسته شده است . هرگاه دردمای $۲۰^\circ C$ کشش درآن صفر باشد، سرعت انتشار امواج درسیم دردمای $۸^\circ C$ چقدر است ؟

۲۱ـ۶ سیمی فلزی که توده ویژه آن $۲۰slugs/ft^۳$ مدول یونگ آن $۱۰^۶lb/in^۲$ است ، بین دو نقطه ثابت کشیده شده است . دردمای معین سرعت انتشار صوت در آن $۶۵۷ft/sec$ است. هرگاه دمای سیم را $۱۰۰^\circ F$ گرم کنیم سرعت انتشار در آن به $۶۵۷ft/sec$ تنزل می‌یابد ضریب انبساط طولی آن چه اندازه است .

۲۱ـ۷ موج سینوسی عرضی که دامنه آن $۱۰cm$ و طول موج آن $۲۰۰cm$ است . درامتداد سیمی ازچپ براست باسرعت $۱۰۰cm/sec$ منتشر میشودمبدء مختصات را انتهای سمت چپ سیم اختیار کنید . درلحظه $t=۰$ سمت چپ یعنی مبدء مختصات شروع بپائین رفتن میکند. (a) فرکانس (b) فرکانس زاویه ای. (c) ضریب ثابت انتشار. (d) معادله موج و (e) معادله حرکت انتهای چپ سیم را بنویسید. (f) معادله حرکت نقطه‌ای واقع در ۱۵۰ سانتیمتر درطرف راست مبدء را بنویسید. (g) سرعت ماکزیموم عرضی هرذره ازسیم را بدست آورید. (h_1) در لحظه $t=۳/۲۵sec$ نقطه واقع در ۱۵۰ سانتیمتری مبدء درچه فاصله‌ای از وضع تعادل قرار دارد (i) شکل سیم را درلحظه $t=۳/۲۵sec$ رسم کنید .

۲۱ـ۸ تنش (F/A) در سیمی که مدول یونگ آن Y است چقدر باشد که سرعت انتشار امواج طولی در آن ۱۰ برابر سرعت انتشار امواج عرضی باشد .

۲۱ـ۹ سرعت انتشار امواج طولی درآب $۱۴۵۰m/sec$ (در دمای $۲۰^\circ C$) است . ضریب تراکم آدیاباتیك B_{ad} آب را محاسبه وآنرا با B_{is} آن (جدول ۱۰ـ۲) مقایسه کنید .

۲۱ـ۱۰ هرگاه دامنه ارتعاش از حد معینی کمتر باشد گوش انسان میتواند فرکانسهای ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ را احساس کند. طول موج بطور این فرکانسها را، (a) برای امواج در هوا. (b) برای امواج درآب بدست آورید (به مسئله ۲۱ـ۳ رجوع شود)

۲۱ـ۱۱ در دمای $۲۷^\circ C$ سرعت انتشار امواج طولی را در (a) ارگن. (b) هیدروژن محاسبه کرده جوابها را با سرعت انتشار امواج درهوا مقایسه کنید .

۲۱ـ۱۲ تفاضل سرعت انتشار امواج عرضی را در هوا در دمای $-۳^\circ C$ و $۵۷^\circ C$ بدست آورید .

۲۱ـ۱۳ هرگاه طول موج صوت از امداد یك بلند گو بیشتر باشد صوت خارج شده ازبلندگو در تمام جهات بطور یکنواخت منتشر میشود . وقتی طول موج خیلی کمتر از ابعاد

بلندگو باشد قسمت اعظم صوت درجلو بلندگومنتشر میشود . هرگاه دهانه بلندگوی۱۰in باشد فرکانس‌هائی‌را که از بلندگوخارج ودرهوا منتشرمیشود و(a) طول‌موج آنها۱۰ برابر قطر بلندگو.(b) مساوی قطر بلندگوو (c) یك‌دهم‌قطر بلندگو باشد محاسبه کنید .

۲۱–۱۴ بیکطرف لوله آهنی بطول ۲۰۰ft ضربه‌ای وارد می‌آوریم ۰ دوصوت، یکی ازطریق هوا ودیگری ازطریق لوله بگوش شخصی که درطرف دیگر آن واقع است میرسد. فاصله زمانی بین شنیدن این دوصوت چه از ـــــ دازه است ؛ مدول یونگ فولاد را $۳۰ \times ۱۰^{۶} lb/in^{۲}$ فرض کنید .

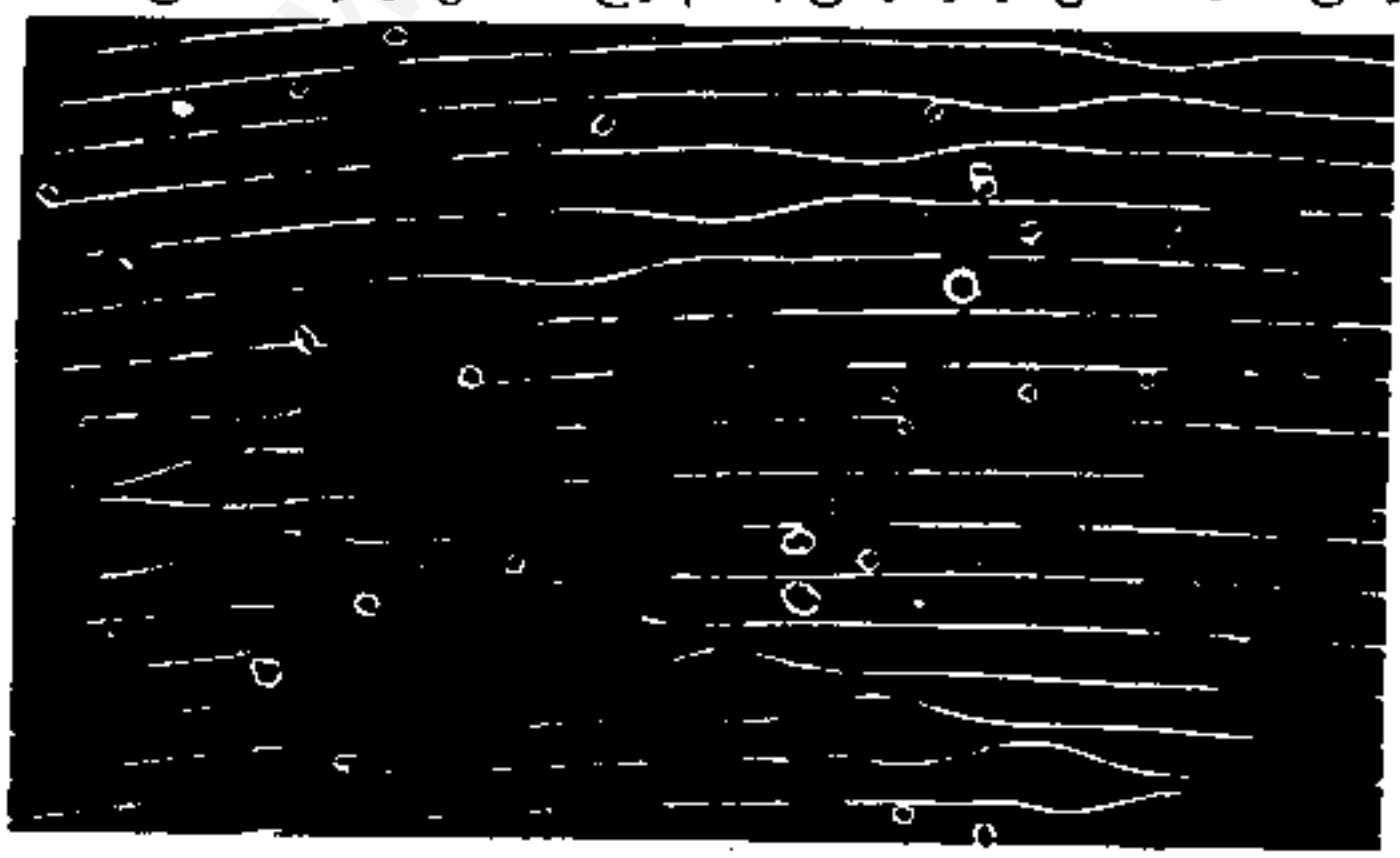
۲۱–۱۵ (a) هرگاه دمای هوای ۲۷°C را در حدود ۱°C کم و زیادکنند سرعت انتشار صوت در آن چند متر برثانیه تغییر میکند (توجه dc را برحسب dT را بکمك دیفرانسیل‌حساب‌کنید). (b) آیا برای تمام دماها تغییر نسبی‌سرعت صوت برحسب دما ثابت است .

www.KetabFarsi.com

امپدانس مرتعشی

۲۲ـ ، شرائطمرزی دریك سیم

اکنون به‌بینیم موجی‌که درسیمی منتشر شده است وقتی بانتهای آن برسد چگـونـه میشود. هرگاه سیم به‌نقطه صلبی وصل‌باشد این نقطه ازسیم، ساکن است. ارتعاشی که بایـن انتهای سیم میرسد نیروئی بدیوار واردمیکند و عکس‌العمل آن ازطرف دیوار برسیم‌وارد میشود وباعث میشودکه ارتعاشی درجهت مخالف درسیم تولیدشود یا باصطلاح مـوج منعکس میشود. ممکن است طرف دیگر بنقطه صلبی وصل‌نباشد (سیم آزادانه آویزان‌باشد) ـحالتی که دراین بحث بخصوص بی‌اهمیت جلوه‌میکند ولی درفهم انواع‌دیگرموج بماکمك میکنددر این‌حال وقتی‌موج‌بانتهای سیم‌میرسدانتهای‌سیم بجلوپرت‌میشود وبقیه سیم‌را بدنبال میکشد و باعث‌تولید موجی‌درجهت‌عکس میشود یعنی بازهم‌موج منعکس میشود. وضعی‌که درانتهای‌سیم

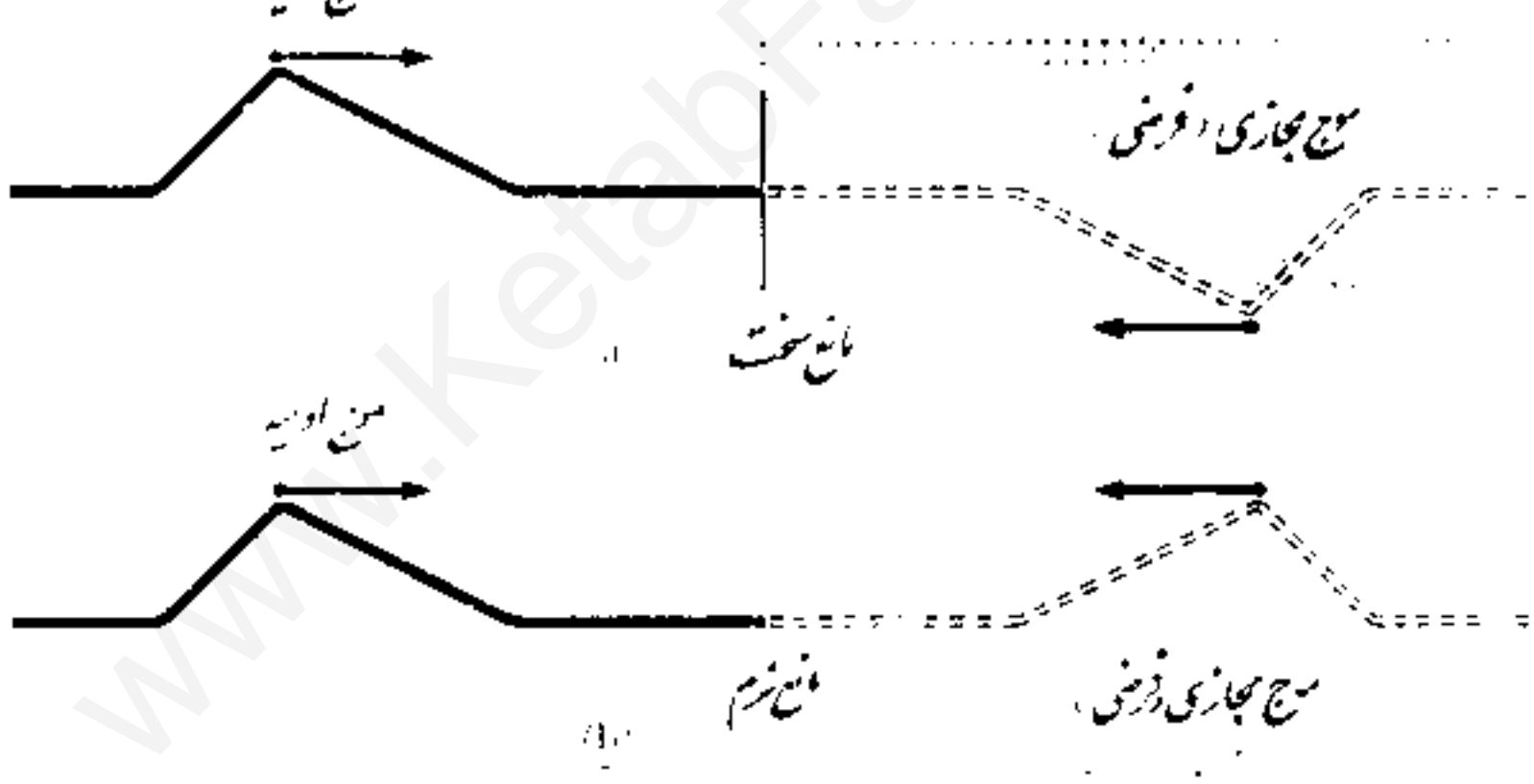


شکل ۲۲ـ۱ ارتعاشی ازانتهای چپ شروع و به انتهای راست منتقل میشود ودرآنجا منعکس میشود

بوجود میاید شرائط مرزی boundary conditions نامیده میشود .

درشکل ۲۲ـ۱ انعکاس یك ارتعاش را در انتهای یك طناب که بنقطه صلب وصل است نشان میدهد. این شکل ازطریق عکس‌برداری سریع تهیه شده است. عکس ها یکی بعد از دیگری‌زیرهم‌قرارداده‌شده‌اند. طناب ازلاستیك‌است‌و باوارد آمدن‌ضربه ، خمیدگی پیدامیکند دیده میشود که موج‌منعکس‌میشود‌ودرحین انعکاس، بعد وسرعت‌آن‌تغییر جهت‌داده‌است. هرگاه انتهای طناب‌آزاد باشد جهت بعد درحین انعکاس تغییر نمیکند وفقط‌جهت سرعت‌تغییرمینماید

بهتراست نحوه انعکاس را برای خود بطریق زیرتوجیه کنیم.فرض‌کنیم طناب بطـور نامحدود ادامه داشت. دراینصورت ارتعاش میتوانست درپشت مانع نیزادامه یابد. فرض‌کنیم یك ارتعاش مجازی‌که قرینه ارتعاش‌حقیقی است، ازسمت مجازی رو بمانع حرکت کند.وقتی ارتعاش حقیقی‌ازمانع عبورکرده وارد قسمت‌مجازی میشود ارتعاش‌مجازی نیزازقسمت‌مجازی پس‌ازعبور ازمانع وارد قسمت حقیقی میشود. دوحالت ممکن‌است‌اتفاق افتد وهردوحالت در شکل ۲۱ـ۲ نشانداده شده است.



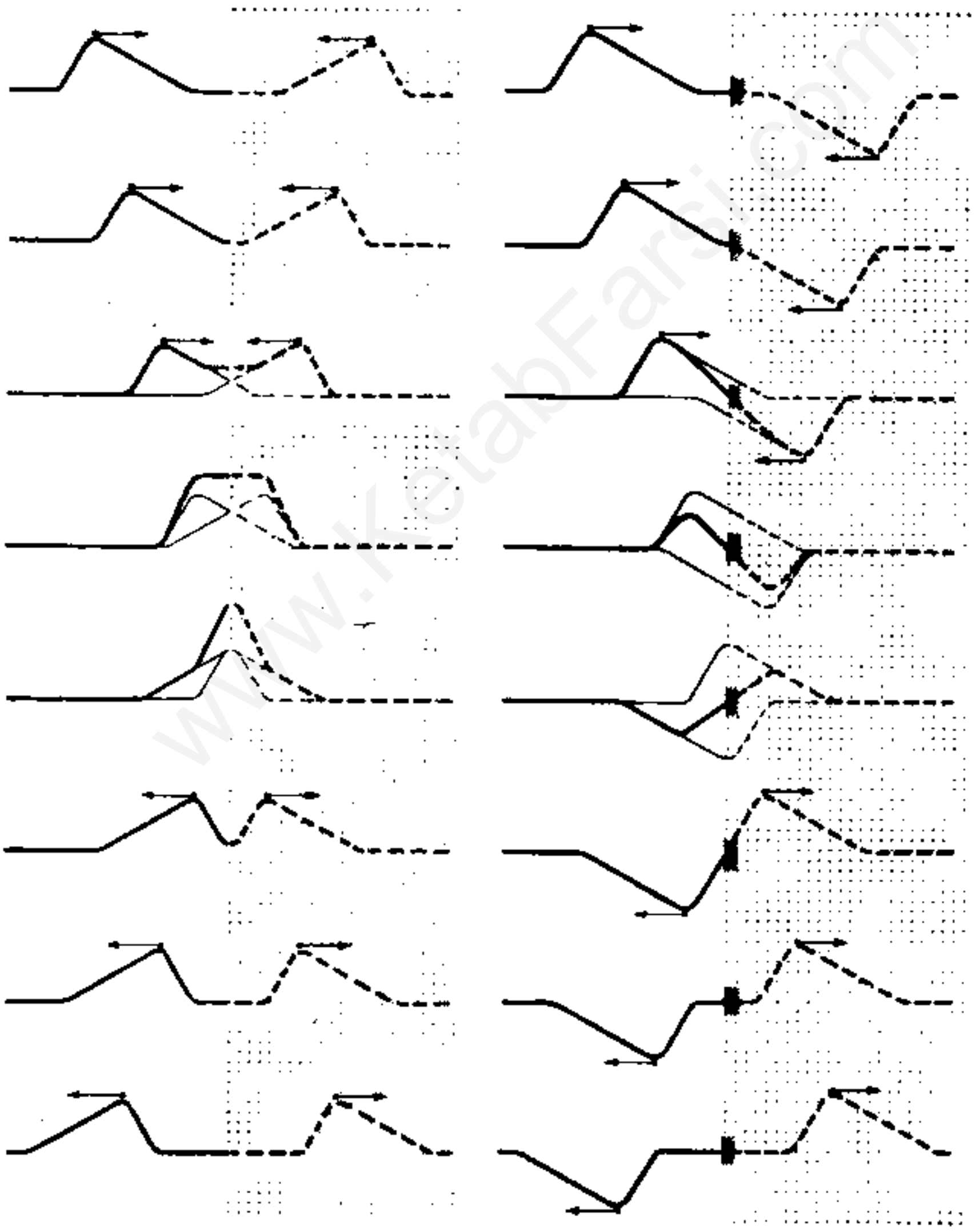
شکل ۲۲ـ۲ توجیه انعکاس یك ارتعاش‌با استفاده از ارتعاش مجازی (a)
برمانع سخت . (b) درانتهای آزاد طناب

بعد درنقطه‌ایکه دوارتعاش حقیقی ومجازی یکدیگررا قطع میکنند برابرجمع جبری بعد دوارتعاش مذکوراست. شکل‌های۲۲ـ۳ و ۲۲ـ۴ شکل انتهائی طناب را درحالت‌آزاد ودرحالت اتصال بمانع سخت نشان میدهد . شکل ۲۲ـ۳ انعکاس برانتهای آزاد و ۲۲ـ۴ انعکاس برمانع سخت‌را نشان میدهد.. درمانع سخت باید جهت بعد دوموج طوری‌باشدکه بعد درمحل مانع همیشه صفر باشد

۲۲ـ۲ ، امواج ساکن درسیم

وقتی موج متصلی ازیکطرف، سیمی بطرف دیگرمنتشرشود، پس‌ازرسیدن بـه انتهای

سیم، منعکس‌شده درطول سیم موجی درجهت عکس موج اولیه انتشارمییابد. هرگاه ارتعاش بیشتر ازحد ارتجاع سیم برآن نیرو واردنیآورد ونیردامنه نوسان کم باشد، پس از انتشارو انعکاس‌موج، بعدهر نقطه‌ازسیم جمع‌جبری بعدموج تابش‌وموج‌منعکس است. دراین‌حال گوئیم دوموج برهم سوار شده‌اند. این پدیده منحصربه امواجی‌که دریك‌سیم منتشرومنعکس‌میشود نیست بلکه‌درمورد امواج نور، صورت‌وبطور کلی‌درهرموردیکه‌دویا چندموج‌درآن‌واحددریك نقطه بهم‌میرسندپیدامیشود. درحالت کلی‌این‌پدیده‌راتداخل‌امواج یاinterferenceمینامند.



شکل ۲۲-۳ انعکاس درانتهای آزاد سیم

شکل ۲۲-۴ انعکاس درانتهای مقید سیم

نمیتوان حرکت موج تابش وموج منعکس راکه در دو جهت مخالف صورت میگیرد درسیم مشاهده نمود. هرگاه فرکانس بقدرکافی زیاد باشد بطوریکه چشم‌نتواند نحوه‌حرکت رابه‌بیند دیده می‌شودکه سیم به‌قسمتهای متعددی تقسیم میشود [شکل ۲۲ـ۴(a)]. این‌شکل باعکس برداری ازسیم مرتعش بدست آمده است. هرگاه عکس برداری خیلی سریع انجام شودشکلی نظیر۲۲ـ۴(b)حاصل میشود. جزدرحالتیکه سیم‌کاملا مستقیم است دربقیه احوال بشکل منحنی سینوسی‌است. اما بر خلاف امواج انتقالی‌که درآنها دامنه حرکت ثابت‌میماند ودرطول‌سیم‌پیش میرفت، دراینحـاشکل ارتعاش سیم ثابت میماند (درامتداد طول‌سیم) ودامنه نقاط مختلف آن یکسان نیست. نقاط خاصی‌که گره یا **node** نامیده میشوند همیشه ساکن میمانند. دروسط فاصله دوگره متوالی یك شکم وجود دارد (**loop** یا **antinode**)که درآن دامنه ارتعاش. ماکزیموم است . این نوع ارتعاش را بطورکلی موج **ساکن** مینامند.

(a)

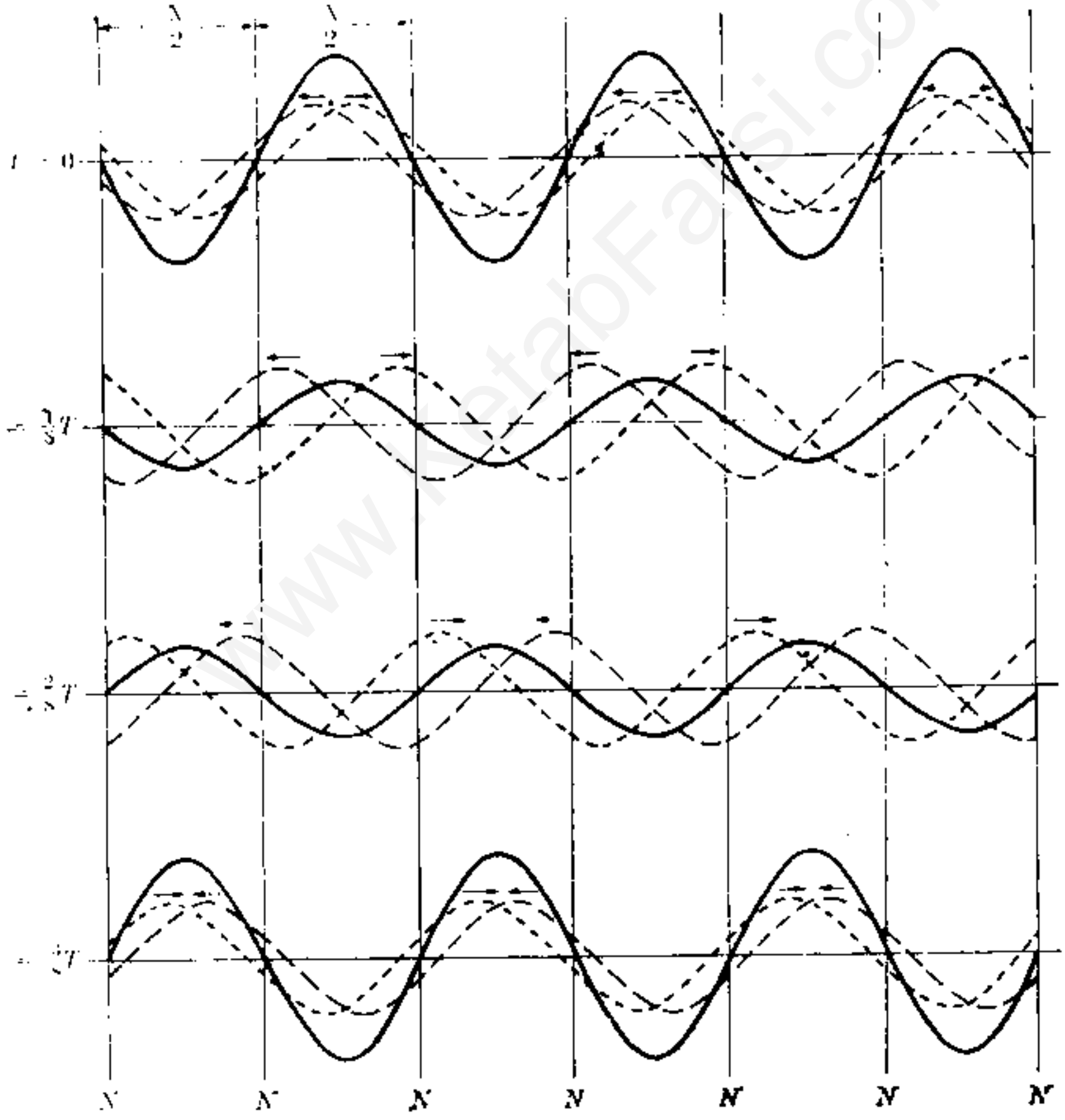
(b)

شکل ۲۲ـ۵ (a) امواج ساکن درطول یك‌سیم (b) عکس برداری سریع ازموج ساکن در یك سیم که دروسط ودوگوشه آن گره وجود دارد

برای فهم نحوه تشکیل امواج ساکن به چهارشکل مجزاکه درچهارلحظه بفاصله $\frac{1}{10}$ زمان تناوب ازموجی رسم شده [شکل ۲۲ـ۶]توجه کنید. منحنی‌خط چنین باخطهای‌کوتاه موجی‌رانشان میدهدکه بطرف راست درحرکت است. منحنی خط‌چین باخطهای بلندموجی را نشان‌میدهدکه باهمان طول موج، باهمان سرعت‌انتشاروباهمان‌دامنه‌بطرف چپ درحرکت است. منحنی برازتر کیب دوموج حاصل میشود بدین ترتیب **که درهر** نقطه ، بعددوموج‌اصلی را باهم جمع جبری میکنیم. درنقاطی‌که با N مشخص **شده‌اند بعد همیشه صفر** است. ایـن نقاط همان عقده‌ها یاگره‌ها هستند. درنقطه وسط دوگره متوالی **دامنه ارتعاش** ماکزیموم است واین نقاط همان بطن‌ها یاشکم‌ها هستند. ازشکل پیداست که

λ ⋮ { فاصله دو گره متوالی / یا / فاصله دو بطن متوالی }

معادله امواج ساکن را میتوان باجمع جبری بعدهای دوموج که دامنه، پریود وطول موج آنها مساوی ولی جهت انتشار آنها مخالف یکدیگر است بدست آورد. بنابر این اگر داشته باشیم



شکل ۲۲–۶ تشکیل امواج ساکن

$$y_1 = A\sin(\omega t - kx) \quad \text{(درجهت مثبت محور}x\text{ها)}$$

$$y_2 = -A\sin(\omega t + kx) \quad \text{(درجهت منفی محور}x\text{ها)}$$

خواهیم‌داشت:

$$y_1 + y_2 = A[\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx)]$$

هرگاه روابط درون کروشه را مطابق دستورهای سینوس مجموع و سینوس تفاضل دوقوس بسطداده نتیجه را مختصر کنیم خواهیم‌داشت :

$$y_1 + y_2 = -[2A\cos\omega t]\sin kx \qquad (۱-۲۲)$$

بنابراین درلحظه معین ، شکل سیم بشکل یك منحنی سینوسی است که دامنه آن برابرمقدار داخل کروشه درآن لحظه بخصوص است که بازمان تغییرمیکند

۲۲-۳ ، ارتعاش سیمی با دوانتهای ثابت

تا اینجادرباره سیمی طویل که یکطرف‌آن ثابت‌بود و ازتداخل امواج تابش‌ومنعکس، دراین‌انتهای‌سیم‌امواج‌ساکن‌تولیدمیشدصحبت کردیم. اینك‌درباره‌سیمی بحث‌میکنیم که‌دوانتهای آن ثابت باشد. هرگاه موجی درچنین سیمی منتشرشود انعکاسهای متوالی پیداخواهدکرد ولی‌آنچه مسلم این است که دردوطرف‌سیم‌حتماً گره ایجاد میشود. چون فاصله دوگره‌متوالی برابر نصف طول‌موج است. بنابراین طول سیم برابر $\frac{\lambda}{2}$ ، $\frac{2\lambda}{2}$ ، $\frac{3\lambda}{2}$ ودرحالت‌کلی مضرب صحیحی ازنصف طول موج میباشد. همچنین میتوان گفت وقتی درسیمی بطول L امواج‌ساکن ایجاد شود فرکانس امواج مذکور بایکدیگر مختلف است و طول موج هریك از این امواج برابر $2L$ ، L ، $\frac{2L}{2}$ و $\frac{2L}{3}$ و...است

از فرمول $v = \lambda f$ بادرنظرگرفتن اینکه v سرعت انتشارامواج‌برای تمام فرکانس‌ها یکسان است. بنابراین فرکانس‌های ممکن عبارتست از :

$$\frac{c}{2L} \quad , \quad \frac{2c}{2L} \quad , \quad \frac{3c}{2L} \quad , \quad \ldots\ldots$$

پائین‌ترین فرکانس‌ها یعنی $\frac{c}{2L}$ را فرکانس **اصلی** نامیده آنرا با f_1 نمایش میدهیم فرکانس های بعدی را **اصوات بالا** یا **overtones** مینامند فرکانس اصوات بالا $2f_1$ ، $3f_1$ و $4f_1$ و ... است. اصوات بالا راکه فرکانس آنها مضرب فرکانس اصلی است (درموردتارها چنانکه فوقاً گفته شدچنین است.) **هم‌آهنگ‌های** فرکانس اصلی‌مینامیم . فرکانس اصلی را هارمونیك یا هم آهنگ اول و ارتعاشی‌راکه فرکانس آن $2f_1$ است هم آهنگ دوم مینامند وقس علیهذا .

اکنون میتوان اختلاف اساسی بین سیمی‌که درحال ارتعاش است وفنرسیمی (سیم‌پیچ) مرتعش را بخوبی درك کنیم. سیم‌پیچ فنری‌فقطیك ارتعاش دارد در حالیکه سیم ساده بینهایت ارتعاش مختلف را خواهد داشت که یکی از آنها ارتعاش اصلی و بقیه هم آهنگ‌های بعدی آن هستند. هرگاه وزنه‌ای راکه بفنری آویزان است پایین کشیده رهاکنیم ارتعاش حاصل منحصربفرد بوده فقط یك فرکانس دارد. هرگاه سیمی راکه‌دوطرف آن بدونقطه ثابت بسته شده است‌بارتعاش درآوریم‌بطوریکه درطول سیم یك ، دو، سه‌یا .. بطن تشکیل شودارتعاشی بافرکانس هریك ازاین هم‌آهنگ‌ها درسیم بوجود می‌آید. اما وقتی ضربه‌ای بسیم پیانویا ساز دیگری وارد میشود نه‌تنهاصوت اصلی بلکه‌تعدادزیادی ازاصوات بعدی نیزدرآن‌بوجود میآید. دراینجا ارتعاش کلی سیم، ترکیبی ازکلیه هم‌آهنك هاست. فرکانس اولیه $f_1 = \frac{c}{2L}$ است که درآن $c = \sqrt{\frac{S}{\mu}}$ ودرنتیجه

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{S}{\mu}} \qquad (۲-۲۲)$$

درسازهای زهی ، درموارد متعدد مفهوم فرمول فوق را مورد استفاده قرار میدهند . مثلا با تغییردادن اندازه S درسیمهای این سازها ، سیم‌ها راه‌کوك میکنند. وقتی S را زیادکنند فرکانس زیاد میشودوبالعکس. هرچه طول زیادترشود فرکانس‌کم میشود. بنابراین سیم های پیانو که صدای بم دارند طولشان زیادتر ازطول سیمهائی است که صدای‌زیر تولید میکنند. باقراردادن انگشت درفواصل مختلف درویولن وساز، میتوان نت های مختلفی را ازارتعاش یك سیم بدست‌آورد. باین دلیل سیم برنجی پیانو را باسیمی از جنس دیگر بهم می‌تابند که بدون‌اینکه طول آن بمقیاس معتنابهی زیادشود باافزایش جرم واحدطول ، فرکانس سیم‌کم وصدای آن بم میشود .

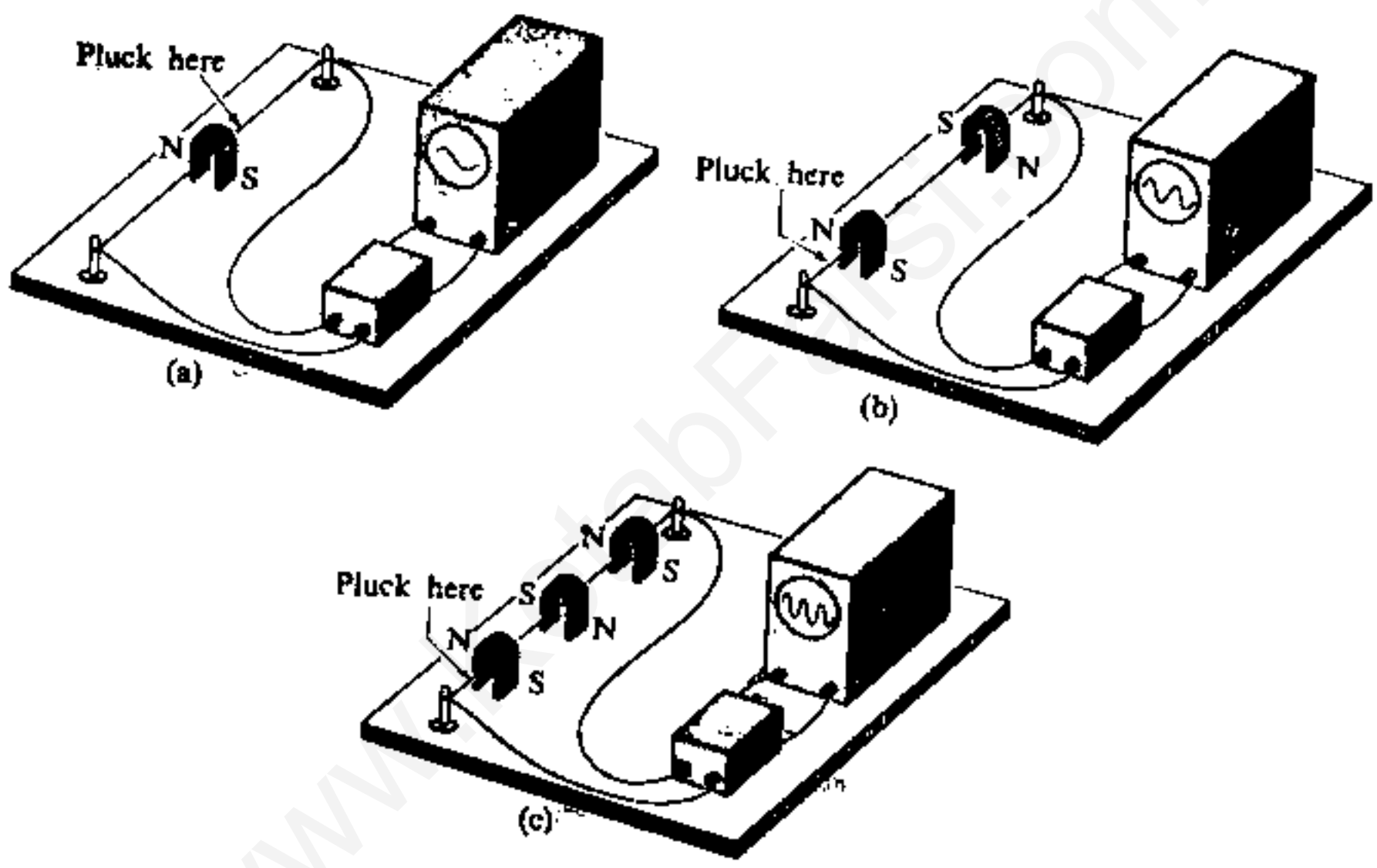
۲۲ـ۴ ،نمایش سری هم‌آهنك‌ها درسیم مرتعش

گفتیم هرسیم میتواند ارتعاشاتی بافرکانس‌های مختلف داشته‌باشد. با دستگاهی نظیر شکل۲۲ـ۷میتوان‌نشانداد که‌سیم **درآن واحدبافرکانس‌های مختلف بارتعاش‌درمیاید.** سیمی بین دونقطه کشیده شده ودو طرف آن بدوسر اولیه ترانسفورماتور بالا برنده‌ای وصل است. ثانویه ترانسفورماتور بیك اوسیلوسکپ وصل میشود بطوریکه جریان حاصله از سیم بتواند شعاع الکترونهائی راکه بصفحه حساس برخورد میکند درامتداد قائم جابجاکند . هرگاه سیم‌مذکور دریك میدان‌آهن ربائی‌نوسان‌کند جریان متناوبی درآن القاء میشود که‌فرکانس

آن با فرکانس سیم یکی است . با تنظیم اوسیلوسکوپ میتوان تصویری از جریان القائی را برصفحه اوسیلوسکوپ ایجادنمود .

فرض کنیم آهن ربائی را دروسط سیم مطابق شکل قرار دهیم [شکل ۲۲-۷(a)] بر وسط سیم ضربه‌ای وارد میکنیم بطوریکه‌سیم در جهت‌عمود برمیدان مغناطیسی‌بحرکت‌درآید. تصویری‌که برصفحه اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود شکل جریان را بمانشان میدهد .

هرگاه دوآهن رباهریك بفاصله $\frac{1}{4}$ طول‌سیم ازیکطرف قرارگیرند(شکل ۲۲-۷(b))



شکل ۲۲-۷ نحوه نشاندادن هم‌آهنگ‌های موجود در ارتعاشات یك سیم مرتعش

بطوریکه جهت‌قرارگرفتن قطبین آهنربا مخالف یکدیگر باشندچنانچه درمحل قرارگرفتن یکی ازآهن رباها ضربه‌ای سیم وارد شود هم‌آهنگ دوم بدست میآید. هرگاه جای قطبین یکی ازآهن رباها را درحالیکه سیم درارتعاش است سریعاً عوض‌کنیم همان ارتعاش اولیه‌بر صفحه اوسیلوسکوپ ظاهر میشود واین دلیل براین است‌که دو جای هم‌آهنگ اول و دوم درآن واحد وباهم وجود دارند .

حال اگر سه‌آهن ربا بفواصل $\frac{1}{6}$ ، $\frac{1}{2}$ و $\frac{5}{6}$ را مطابق قسمت (c) شکل قرار دهیم بطوریکه قطبین آنها یکدرمیان مخالف هم باشد پس از بارتعاش در آوردن سیم ، تصویر هم‌آهنگ سوم برصفحه ظاهرمیشود وبازهم اگرجای قطبین آهنربای وسطی را سریعاًعوض

کنیم هماهنگ اول برصفحه ظاهرمیشود یعنی هماهنگ اول و دوم وسوم باهم و دریکزمان وجود دارند .

آزمایش را بهمین ترتیب ادامه میدهیم وملاحظه میکنیم که هم‌آهنگ های بعدی نیز درسیم وجود دارند .

۲۲ـ۵ ، تشدید Resonance

بطورکلی هرگاه جسمی که میتواند ارتعاش کند ضربه متناوبی که پریود آن باپریود یکی از ارتعاشات جسم منطبق باشد واردکنیم ، جسم بارتعاش درمیآید. این پدیده راتشدید یا رزنانس‌مینامند وگویند جسم باضربه وارده درحال زرنانس یاتشدید میباشد.

نمونه بسیارساده زرنانس ، تاب است. شخصی که در تاب نشسته باطناب مجموعاً پاندول مرکبی را تشکیل میدهند وفرکانس نوسان ، تابع طول پاندول است . هرگاه تعدادی ضربه برشخص واردکنیم بطوریکه فرکانس ضربه‌ها بافرکانس نوسان شخص برابر باشد دامنه نوسان زیاد میشود. هرگاه ضربه‌ها بافرکانسی‌غیرازفرکانس نوسان بشخص‌وارد شود ، تاب بندرت بنوسان درمیآید .

برخلاف پاندول ساده که فقط دارای یك فرکانس است، سیمی که بین دو نقطه کشیده شده (وسایر دستگاههائیکه بعداً دراین فصل مورد بحث قرار خواهدگرفت) جسم نوسان کننده دارای تعداد زیاد فرکانس ارتعاش خواهد بود. فرض کنیم یکطرف سیمی بنقطه ثابتی وصل وطرف دیگر آن درامتداد عرضی بچپ وراست حرکت داده میشود . دامنه حرکت عرضی‌را نیز ثابت فرض کنید. فرکانس هرچه باشد درسیم امواج ساکنی بوجود مـی‌آید . هرگاه فرکانس ارتعاش بافرکانس‌های طبیعی سیم تطبیق نکند ، درمحل گره‌ها نیز ارتعاش وجود دارد ولی دامنه‌آن ازدامنه درسایر نقاط کمتراست. هرگاه فرکانس ارتعاش ، بایکی ازفرکانس‌های طبیعی سیم مساوی باشد، سیم‌بانیروئی که‌آنرا بارتعاش‌درمیآورد بحال‌تشدید درآمده دامنه ارتعاش بطن‌ها بمراتب بیش‌ازدامنه ارتعاش انتهای‌آزاد سیم‌است که بانیروی خارجی به‌ارتعاش درمیآید . یعنی باآنکه انتهای آزاد سیم ، گره نیست‌معذالك درحال رزنانس بگره نزدیکتراست تابه‌بطن درشکل۲۲ـ۵ (a) انتهای راست سیم راثابت فرض کرده انتهای چپ آنرا بادامنه‌کمی بارتعاش درمیآورند . درسیم امواج ساکنی بوجود میـآید و هرگاه فرکانس ارتعاش انتهای‌آزاد بافرکانس ارتعاش اصلی سیم یابیکی ازسه‌هماهنگ اول آن مساوی باشد ، دامنه ارتعاشات دربطن‌ها بمراتب بیش‌ازدامنه ارتعاش انتهای آزادسیم خواهد بود.

پلها وساختمانها میتوانند بافرکانس معینی بارتعاش درآیند. هرگاه صفی ازسربازان

ازروی پل عبور کنند وفرکانس قدم های آنها بافرکانس یکی ازارتعاشهای طبیعی پل یکسان باشد دامنه ارتعاش پل بتدریج زیاد شده خطر خراب شدن آن بوجود میآید بهمین جهت سربازان هنگام عبور ازروی پل باید باقدم آزاد حرکت کنند .

وقتی گیرنده رادیو ، ایستگاه معینی را میگیرد نوعی رزنانس الکتریکی بوجود آورده است. فرکانس جریان متناوبی راکه درمدار نوسان کننده رادیو بوجودآورده میشود طوری تغییر میدهند که بافرکانس امواج ایستگاه معینی بحال تشدید درآید. درامواج نورانی نیزمیتوان رزنانس مشاهده نمود. نوری راکه ازگاز بخصوصی که در حال تحریك است خارج میشود ازلوله ای محتوی همین گاز عبور دهید می بینید که گاز دوم نوررا جذب میکند . هرگاه نور زرد سدیم را از اتم های سدیم که درون لوله ای هستند عبور دهیم لوله برنگ زرد سدیم درخشان میشود .

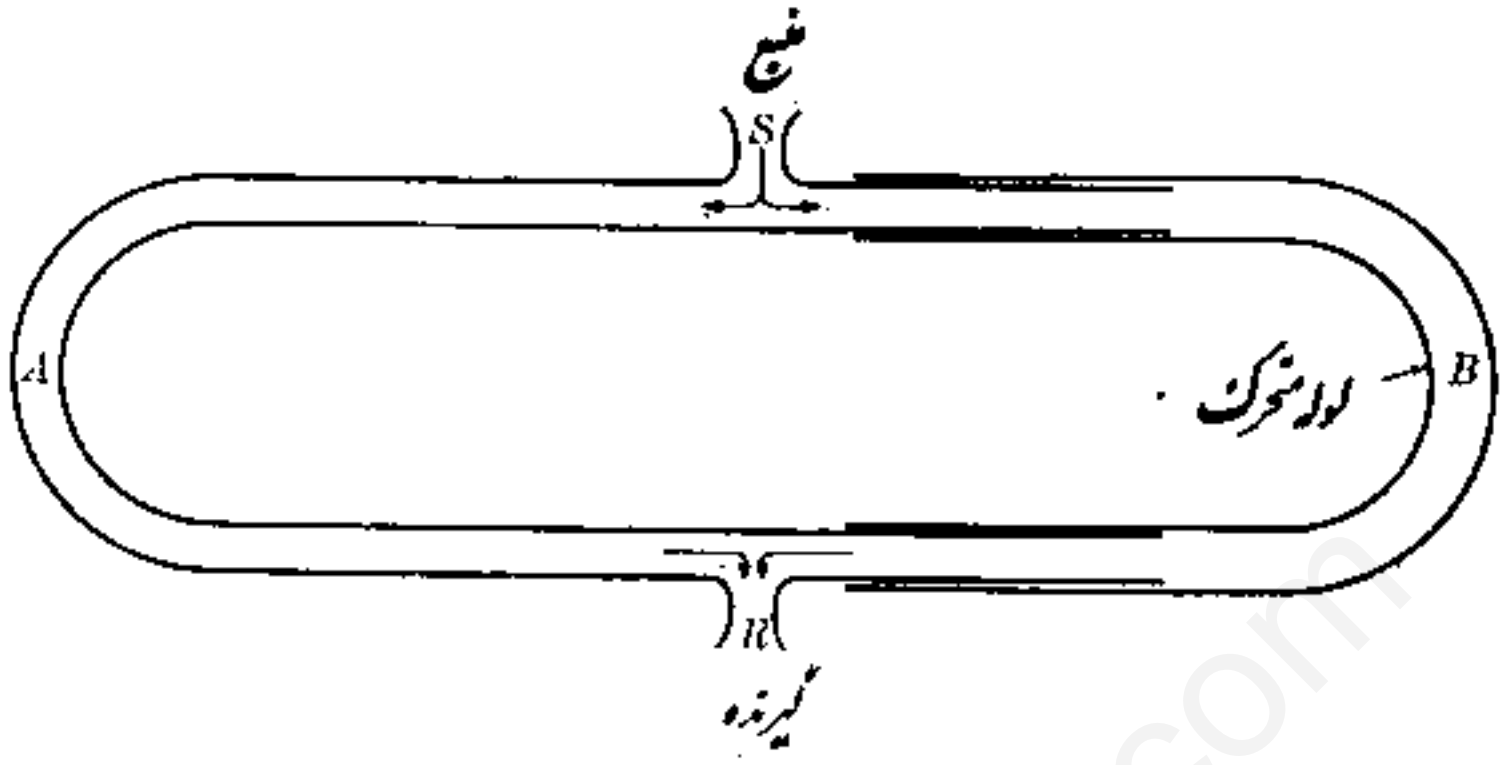
پدیده رزنانس را درهوامیتوان بکمك دیاپازن یا صفحات مرتعش عملا مورد آزمایش قرارداد. هرگاه دو دیاپازن یکسان را بفاصله ازیکدیگر قراردهیم وضربه‌ای بریکی ازآنها واردآوریم ، دیگری نیز بارتعاش درمیآید. چنانکه کمی پس ازوارد آوردن ضربه دیاپازن اول رابطور ناگهانی متوقف کنیم ؛ صدای دومی شنیده میشود. هرگاه کمی موم یا گچ قالبی به‌یکی ازدیاپازنها بچسبانیم، دیگر بحال رزنانس درنمی آیند.

۲۲-۶، تداخل امواج طولی

بادستگاهی نظیر شکل ۲۲-۸ میتوان پدیده تداخل دوموج طولی منتشره در هوارا نشانداد . چشمه S موجی راواردلوله فلزی میکند این موج بدو قسمت شده یکی ازمسیر ثابت SAR از S به R میرسد و دیگری از مسیر SBR که میتوان طول آنرا باجابجا کردن لوله B کم وزیادنمود. فرض کنیم فرکانس ارتعاش منبع ۱۱۰۰ سیکل برثانیه باشد دراینصورت $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{11}$ خواهد بود. هرگاه طول هردومسیر مساوی باشد، موجی که از دوطرف به R میرسد هم‌فاز خواهد بود. دامنه ارتعاش در R جمع دودامنه ارتعاش است وصوت قوی است. میتوان مستقیماً باگوش ویا بامیکروفون و دستگاه تقویت صوت ، صدای R را شنید.

حال اگرلوله B را باندازه ۳in عقب بکشیم طول مسیر ۶in افزایش خواهدیافت پس مسیر امواجی که از SBR به R میرسند باندازه $\frac{\lambda}{2}$ زیادتر ازمسیر SAR است درنتیجه امواجی که به R میرسند درفاز متقابل هستند وصوت در R ضعیف میشود.

هرگاه لوله B را ۳in دیگر بعقب بکشیم اختلاف راه SBR و SAR یك فوت



شکل ۲۲-۸ لوله ای نشاندادن تداخل امواج طولی درهوا

(یك طول موج) شده مجدداً دوارتعاش هم‌فاز صوت در R تقویت میشود. خواهیم داشت:

$$\left\{\begin{array}{l}\text{تقویت صداوقتی اتفاق}\\ \text{می‌افتدکه اختلاف‌راه}\end{array}\right\} = \ldots \text{و } 2\lambda \text{ و } \lambda \text{ و } 0$$

$$\left\{\begin{array}{l}\text{تداخل موقعی اتفاق}\\ \text{می‌افتدکه اختلاف‌راه}\end{array}\right\} = \ldots \text{و } \frac{5\lambda}{2} \text{ و } \frac{3\lambda}{2} \text{ و } \frac{\lambda}{2}$$

دستگاه تداخل امواج صوتی فقط ازنظرتجربه ونشاندادن تداخل امواج ارزش‌دارد ولی دستگاه تداخل امواج نورانی درعمل نیز مورد استفاده است.

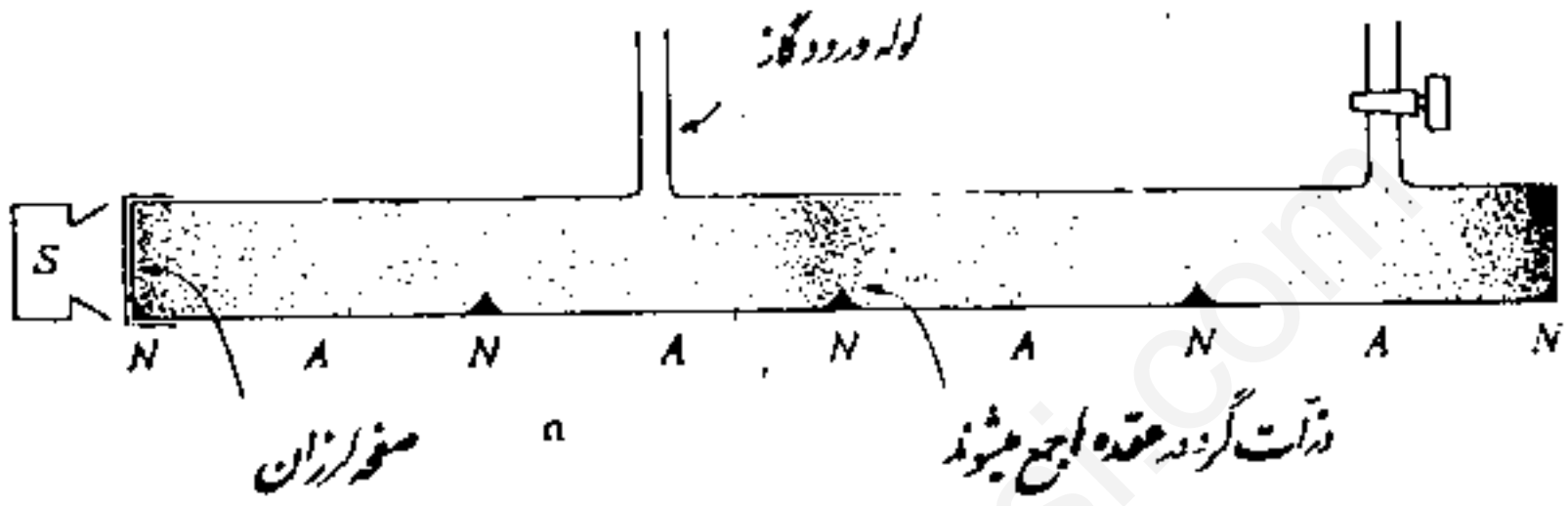
۲۲-۷ ، امواج ساکن طولی

امواج طولی کـه درهوای درون لوله بسته‌ای منتشر میشوند در انتهای لوله انعـکاس میباشد وانعکاس آنها مانندانعکاس‌امواج عرضی درانتهای سیم است.ازتداخل امواجی‌که در دو جهت مخالف منتشر میشوند (موج اصلی وموج بازتاب) امواج ساکن حاصل میشوند.

هرگاه انعکاس روی انتهای بسته لوله صورت گـیرد ، بعد در این انتها باید همیشه برابر صفر باشد. پس درانتهای بسته‌لوله گره تشکیل میشود. هرگاه انتهای لوله باز باشد بدیده انعکاس ، صورت پیچیده‌ای پیدا میکند وبستگی باین داردکه قطردهانه نسبت به طول موج زیاد باشد یاکم. هرگاه قطرلوله باز درمقام‌مقایسه باطول موج کم باشد ، چنانکه در اغلب اسبابهای موسیقی چنین است ، انعکاس چنان صورت میگیردکه درانتهای آزاد، بطن تشکیل شود. بنابراین انعکاس امواج طولی در سیال واقع درلوله بسته و باز بترتیب نظیر

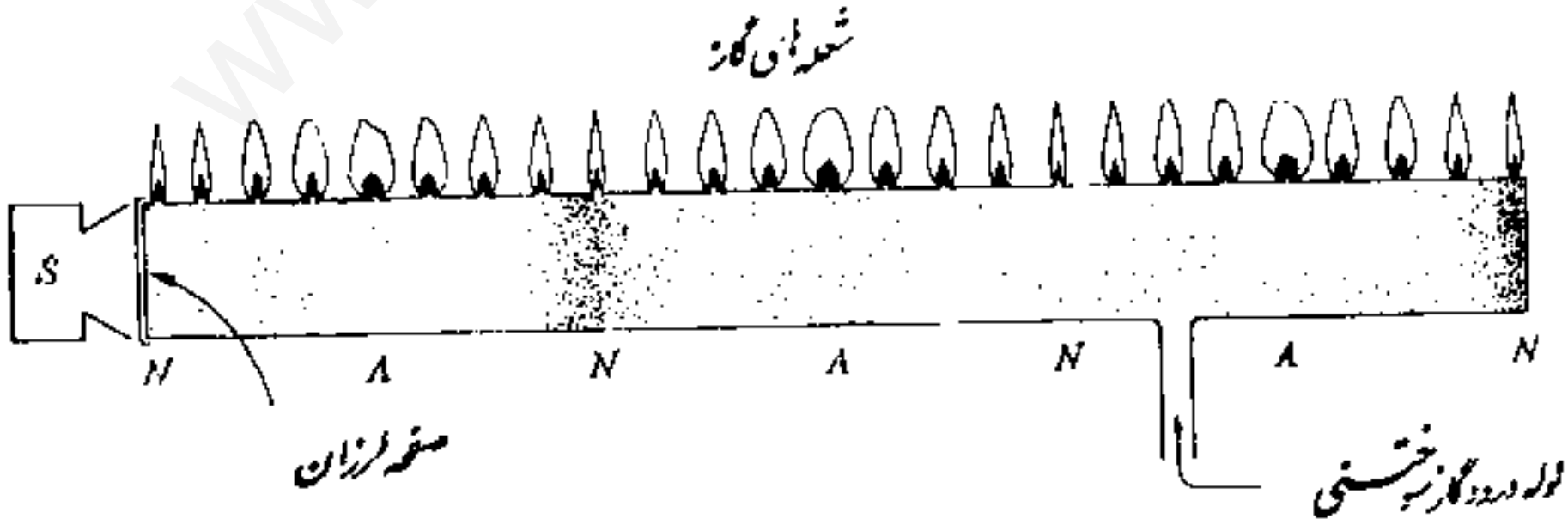
انعکاس امواج عرضی درانتهای مقید وآزاد سیم است.

دردهانه لوله ، یعنی جـائی که درآن میدمند ، یا درنقطه بسیار نزدیك بآن ، بطن تشکیل میشود . بنابراین طول مؤثر یك لوله صوتی را نمیتوان بادقتی تعیین نمودکه طول سیم باآن دقت قابل اندازه گیری است.



شکل ۲۲ـ۹ لوله دست برای تعیین سرعت صوت. تراکم نقطه ها درشکل معرف فشار وقتی درمحل کره ها فشار ماکزیموم است .

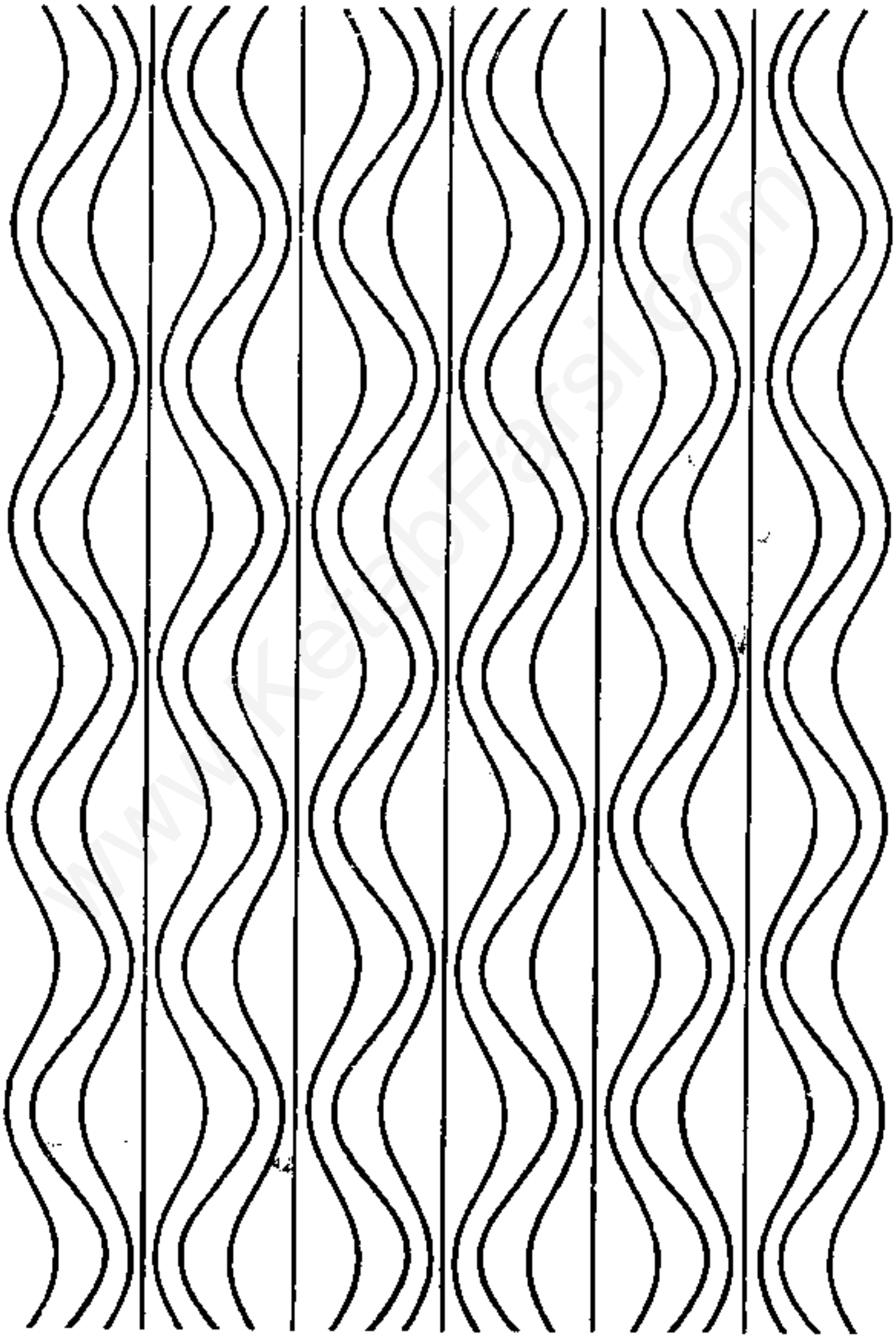
میتوان امواج ساکن درلوله محتوی گازرا بادستگاهی نظیر شکل ۹ـ۲۲ که بهلوله کنت مشهور است نشانداد . لولهای ازشیشه بطول چند فوت که یکطرف آن مسدود و طرف دیگرآن به دیافراگم قابل انعطافی منتهی میشود درنظر گیرید میتوان درون لوله را باهر گاز ، بافشار جو ودمای مشخص دلخواه پرنمود. منبع صوتی S که فرکانس آن قابل تغییر است ، باعث ارتعاش دیافراگم میشود در داخل لوله مقداری گرد ظریف چوب پنبه بطور متشابه توزیع شده است.



شکل ۲۲ـ۱۰ تغییرات فشار گاز درمحل کره‌ها بیشتر ازسایر نقاط است . نقاط روز وسیاه تراکم ملکولهای گاز را وقتی فشار درکره ها ماکزیموم است نشان میدهد .

وقتی فرکانس منبع با فرکانس لوله بحال رزناس درآید ، ذرات گرد درمحل بطن‌ها که ارتعاش شدید است بحرکت درآمده بهمحل عقده‌ها منتقل میشوند. پس درمحل عقده‌ها

توده‌های گرد ، جمع میشوند زیرا در اینجا گاز حرکتی ندارد گاهی‌اوقات بجای گرد، سیم فلزی درطول لوله قرار میدهند وازآن جریان برق عبور میدهند . درمحل گـره ها که



شکل ۲۲-۱۱

کاز حرکت نمیکند سیم داغ و نورانی است و در محل بطن‌ها سیم سرد تر شده سیاه تر بنظرمیآیند .

هرگاه درعمل ، رعایت دقت بشود میتوان سرعت انتشار امواج را درگاز اندازه گرفت . فاصله بین دوگره مجاوربرابر نصف طول موج است وبا اندازه‌گیری این‌فاصله ، λ بدست میآید . هرگاه فرکانس ارتعاش معلوم باشد c سرعت انتشار امواج از رابطه زیر بدست‌میآید .

$$c = f\lambda$$

ممکن‌است فرکانس منبع ثابت باشد ولی منبع به پیستنی وصل باشد وبتوان آنرا در طول لوله آنقدر جابجاکرد تا رزنانس حاصل‌شود .

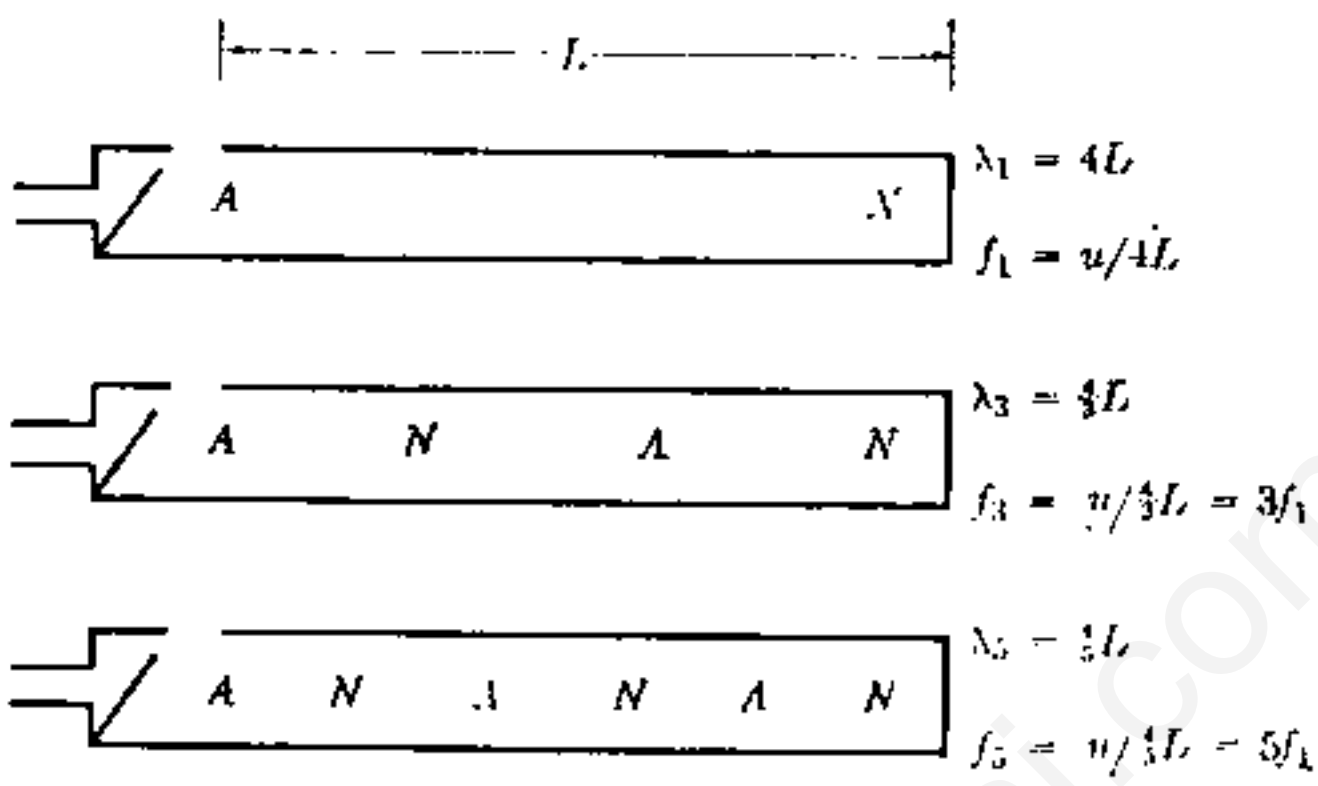
درمحل‌عقده‌ها تغییرفشار ، ماکزیمم است یعنی فشارگاهی بالاتر و زمانی پائین‌تر از فشارحالت تعادل است ولی درمحل‌بطن‌ها تغییرفشاروجود ندارد . توجه داشته باشیدکه در دوطرف هرعقده ، دومقدارگاز درجهات مخالف درحرکت‌انـد. پس وقتی بطرف یکدیگر میایند فشار را درمحل‌عقده بالا میبرند ووقتی ازهم دور میشوند باعث کاهش فشار در عقده میشوند . اما دو توده‌گازی‌که در دو طرف یك بطن هستند حرکت همفاز دارند لذا باعث تغییر فشار نمی‌شوند . با دستگاهی نظیـر شکل ۲۲ـ۱۰ میتوان این واقعیت را عملا نشان داد . گازقابل‌احتراقی را از درون لوله‌ای عبور میدهیم . در جدار لوله سوراخهای ریزی وجود داردکه ازآنها گاز بیرون‌آمده بصورت شعله‌هائی میسوزند در محل بطن‌هـا شعله‌ها یکنواخت و درمحل‌عقده‌ها متغیراست .

بکمك شکل ۲۲ـ۱۱ میتوان نحوه ارتعاش را دراموا‌ج ساکن یترمجسم نمود قطعه کاغذ یا مقوائی برداشته روی‌آن شکافی بعرض $\frac{1}{16}$ in و بطول ۴/۵in درآورید وقتی این شکاف را ازبالا بپائین روی شکل حرکت دهید ؛ نحوه ارتعاش درنظرشما مجسم میشود .

۲۲ـ۸ ، لوله‌های‌صوتی

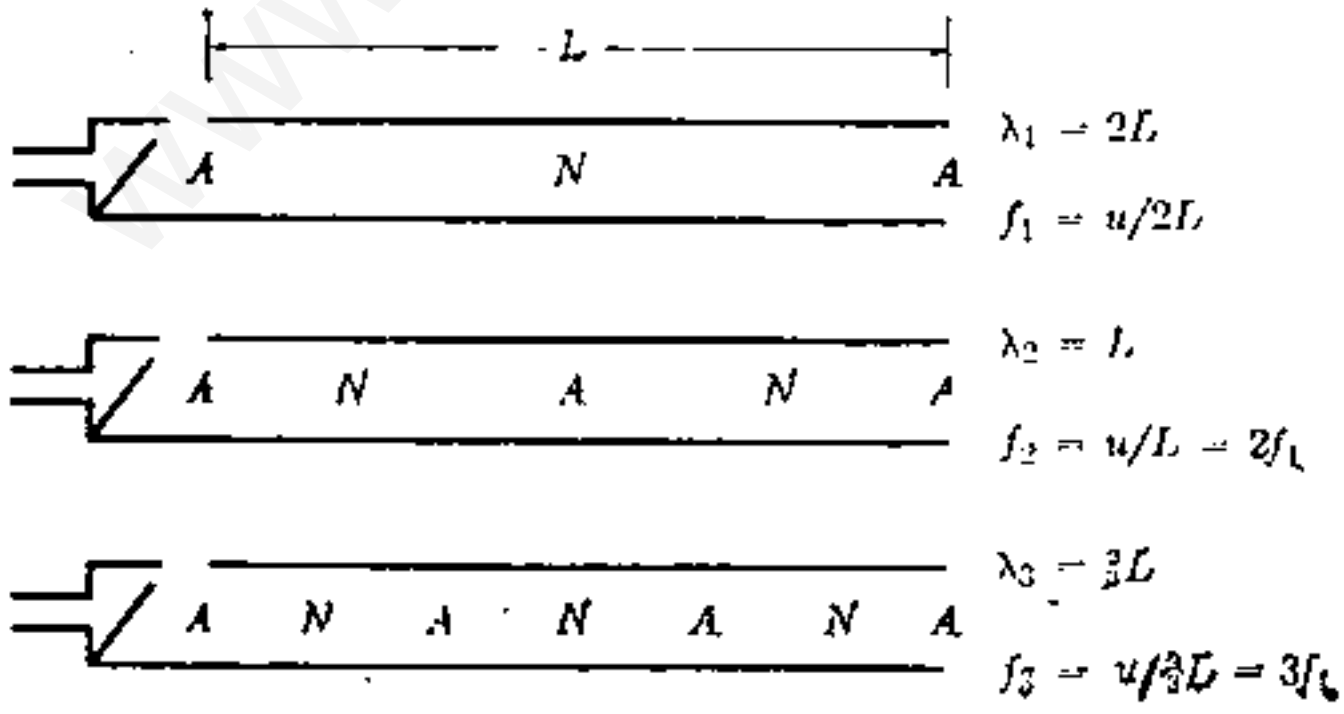
هرگاه یکطرف لوله‌ای‌بازباشد وهوا بگوشه‌ای ازآن دمیده شده صدای ارتعاش‌طبیعی لوله بگوش میرسد . دراینجا نیزسیمی‌که بلرزه به ارتعاش درمیاید ، درلوله صوت اصلی وهم‌آهنگهای‌آن تولید میشود . هرگاه انتهای دیگرلوله نیزبازباشد (لوله باز) دردوطرف لوله بطن تشکیل میشود و دروسط‌آن لااقل یك عقده (برای ارتعاش اصلی با فرکانس f_1) وجود دارد . (شکل ۲۲ـ۱۲) و برای هم‌آهنگهای بعدی نیزچنانکه درشکل نشانداده شده

است عقده‌ها وبطن‌ها تشکیل میشوند ،که سه هم آهنگ متوالی صوت اصلی تولید میشود .
یعنی درلوله باز تمام هم‌آهنگهای صوت اصلی‌که فرکانس آن c/۲L است‌تولید میشود.



شکل ۲۲–۱۲ نحوه ارتعاش درلوله صوتی باز

درشکل ۲۲–۱۳ نحوه ارتعاش دریك لوله بسته نشانداده شده است . دیده میشودکه فرکانس اصلی c/۴L است. که نصف فرکانس لوله بازی بهمین طول‌میباشد . در اصطلاح موسیقی گویندصدای لوله بسته‌یك اکتاوپائین‌ترازلوله بازهم طول‌آن است . ازشکل۲۲–۱۳ پیداست که هم‌آهنگهای زوج یعنی c/۲L و c/۴L وغیره درلوله بسته وجود ندارد .یعنی
درلوله بسته فرکانس اصلی $\frac{c}{4L}$ است وفقط‌آهنگهای فردتولید میشود .

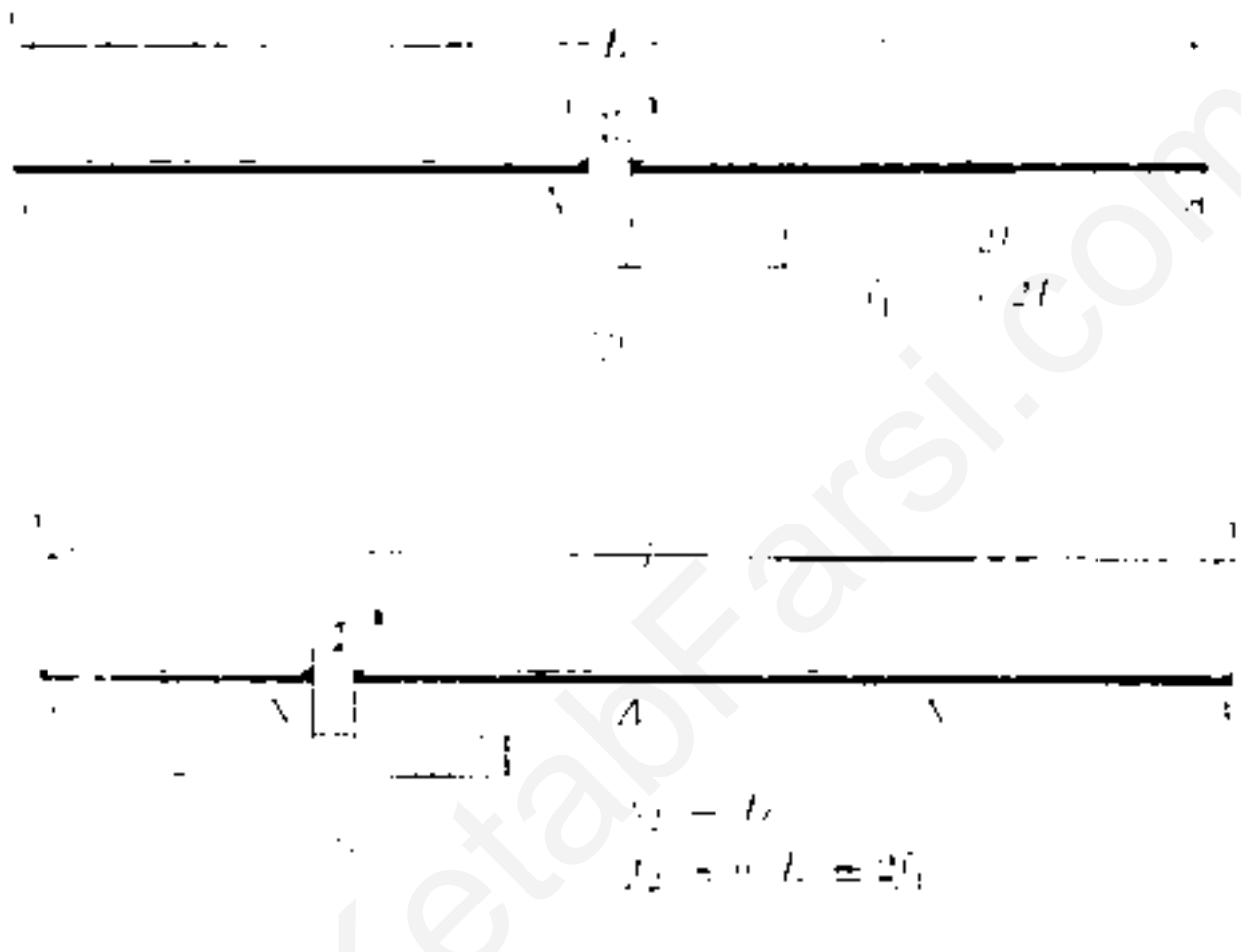


شکل ۲۲–۱۳ نحوه ارتعاش درلوله صوتی بسته

۹–۲۲ ، ارتعاش میله و صفحه

هرگاه به یك‌میله، کاغذی سمباده یا پوست‌آغشته به‌کلیفن‌بمالندبارتعاش درمیاید . در

شکل ۲۲ـ۱۴ (a) وسط میله‌مقید است. پس‌اگرضربه‌ای بانتهای‌آن وارد شود موج‌ساکنی دروسط‌آن بوجود میاید و دروسط سیم یك عقده تشکیل میشود واین درست شبیه لوله‌صوتی بازاست . صوت اصل میله $\frac{v}{2l}$ است‌که در آن v سرعت انتشارموج درمیله میباشد . چون سرعت صوت درجامدات بیش ازهواست فرکانس اصلی ارتعاش میله بمراتب ازفرکانس اصلی ارتعاش دولوله بازهم طول آن‌است .

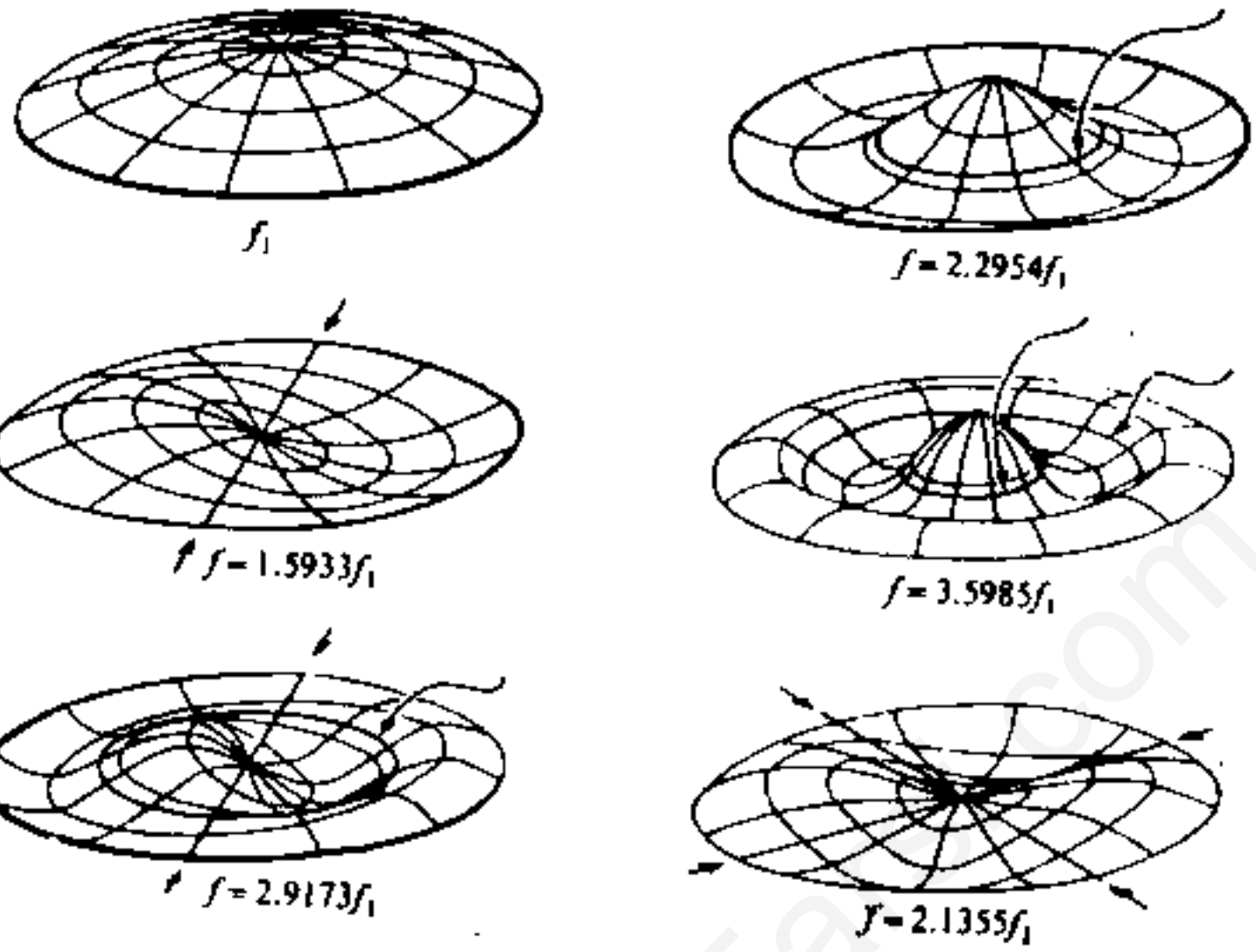


شکل ۲۲ـ۱۴ نحوه ارتعاش میله

هرگاه نقطه‌ای بفاصله $\frac{1}{4}$ طول را مقیدکنیم [شکل ۲۲ـ۱۴ (b)] هم‌آهنگ دوم نیز بوجود میاید .

هرگاه برپوستی که بطور مسطح کشیده شده است (پوست طبل وامثالهم) ضربه‌ای وارد کنیم ارتعاشات در دوامتداد درسطح منتشرمیشوند وانعکاسهای متوالی میابند . هرگاه بعضی ازنقاط پوست را مرتبا بارتعاش درآروند امواج بطور اتصالی درپوست منتشرمیشوند . در پوست هم ممکن است امواج ساکن تشکیل‌شود وارتعاش آن نیردارای فرکانس اصلی‌خواهد بود . درحین ارتعاش پوست تعدادی **هم‌آهنگ** بعدی نیزبوجودمیاید .

در ارتعاش پوست ، بجای نقطه‌های ساکن (گره) خط ساکن یاخط ساکن یا خط گرهی nodal line داریم . درشکل ۲۲ـ۱۵ چندصوت ممکن درخطوط گرهی‌درپوست دایره‌ای نشانداده شده است . فرکانس هریك ازآنها را برحسب فرکانس اصلی f_1 درزیر شکل نوشته‌اند . دیده میشود که فرکانس‌های بعدی مضارب صحیح فرکانس اصلی‌نیستند یعنی اصوات ، هم‌آهنگ نیستند .



شکل ۲۲–۱۵ انواع ممکن ارتعاشات پوست (غشاء) وخطوط گرهی که در آنها تشکیل میشود . فرکانس درهرحالت برحسب f_1 فرکانس اصلی درزیر شکل نوشته شده است .

نیروی ارتجاعی برگشتی دریک پوست ، نیروئی است که با آن پوست را کشیده و بقاب وصل کرده‌اند . هرگاه صفحه فلزی بقدرکافی ضخیم باشد نیروی ارتجاعی درآن با تنش خمشی ایجادمیشود . مطالعه درنحوه ارتعاش صفحه‌ها وپوست‌ها درساختن میکروفون، دیافراگم بلندگوها ، دیافراگم ، تلفن ، رادیو وغیره اهمیت زیادی دارد .

مسائل

۲۲–۱ طول یك سیم آهنی پیانو $50\,cm$ جرم آن $5\,gm$ وکشش وارد برآن $400\,n$ است. (a) فرکانس ارتعاش اصلی آن و (b) تعداد هم‌آهنگهای بعدی آنرا بشرط آنکه فرکانس آنها از ۱۰۰۰۰ بیشتر نباشد بدست آورید .

۲۲–۲ طول سیم آهنی $L = 100\,cm$ و توده ویژه آن $\rho = \frac{8\,gm}{cm^3}$ است و بین دو نقطه ثابت کشیده است . ارتعاش اصلی آن فرکانسی برابر $f = 200\,cycles/sec$ رادارد. (a) سرعت انتشار امواج عرضی را درآن بدست آورید . (b) تنش در امتداد طول

را برحسب $dynes/cm^2$ بدست‌آورید د : (c) هرگاه ماکزیموم شتاب دروسط سیم $8000 cm/sec^2$ باشد دامنه نوسان را دراین نقطه پیداکنید .

۲۲ـ۳ وقتی خرکی را درفاصله $60 cm$ ازابتدای سیمی‌قراردهند فرکانس اصلی‌آن ۳۰ است . دامنه نوسان را دربطن $3cm$ فرض‌کنید . (a) سرعت انتشار امواج عرضی را درسیم بدست‌آورید. (b) تنش مؤثربرسیم را حساب‌کنید .

۲۲ـ۴ صوت اصلی‌سیمی $220 vib/sec$ است، طول قسمت مرتعش $68cm$ وجرم آن $1/29gm$ است . نیروی‌کشش چند پوند است ؟

۲۲ـ۵ ارتعاشی‌بافرکانس ۱۱۰۰ درلوله‌ای‌پرازمتان بدمای $20^\circ C$ عقده‌هائی‌بفاصله $20cm$ ایجادمیکند نسبت‌دوگرمای ویژه را دراین‌گازبدست‌آورید .

۲۲ـ۶ وزنه‌ای‌آلومینومی بسیمی پولادی‌آویزان‌است . فرکانس اصلی امواج ساکنی که دراین سیم تولید میشود $300 Cycles/sec$ است وزنه را تا نیمی ازحجم‌آن وارد آب میکنیم فرکانس اصلی جدید چه اندازه است ؟

۲۲ـ۷ سیمی‌آهنی بطول یک‌متربارتعاش درآمده‌گازدرون یک لوله‌کنت رابارتعاش درمیاورد . هرگاه فرکانس اصلی سیم ۲۴۸۰ باشد و توده‌های‌گرد بفاصله $6/9cm$ در لوله جمع شوند . (a) سرعت امواج را درسیم و (b) درگاز بدست آورید .

۲۲ـ۸ سرعت انتشار امواج در مخلوطی از هلیوم و نئون در $300^\circ K$ برابر $758m/sec$ است. درصد اختلاط رابدست‌آورید .

۲۲ـ۹ جرم اتمی ید ۱۲۷ است . موج ساکنی دربخارید $400^\circ K$ عقده‌هائی بفاصله $6/77cm$ ایجاد میکند . فرکانس ۱۰۰۰ است بخارید چنداتمی است ؟

۲۲ـ۱۰ میله‌ای‌مسی‌بطول‌یک متر که‌درنقطه‌ای‌بفاصله $\frac{1}{4}$ طول مقید است بارتعاش‌در آمده‌امواج ساکن‌درلوله‌کنت‌که در آن‌هوای $300^\circ K$ است ایجاد میکند . فاصله توده‌های گرد $4/95cm$ است. سرعت امواج طولی درمس چقدراست .

۲۲ـ۱۱ فرکانس اصلی وچهارهم‌آهنگ بعدی لوله‌ای بطول $6in$ را درشرائط زیر بدست‌آورید. (a) هر دوطرف لوله‌بازاست. (b) یکطرف‌آن بسته است . (c) شخصی‌که اصوات‌عادی را می‌شنود چند هم‌اهنگ این صوت را میتواند بشنود ؟

۲۲ـ۱۲ لوله طویلی محتوی هوای $77^\circ C$ با فشار $1atm$ است . یکطرف لوله‌باز ودرطرف دیگرآن پیستن متحرکی‌قراردارد . دیاپازنی درمقابل دهانه باز با فرکانس $500 Cycles/sec$ درحال ارتعاش است . وقتی فاصله پیستن ازانتهای باز لوله بترتیب

۱۸/۰ ، ۵۵/۵ و ۹۳cm است تشدید حاصل میشود . (a) سرعت انتشارصوت در هوای ۷۷°C چه اندازه است ؟ (b) نسبت گرماهای ویژه هوا γ چه‌اندازه است .

۱۳-۳۲ لوله صوتی (A) که یکطرف‌آن بسته‌وبطول 2ft است ارتعاش اصلی خود را ایجاد میکند . لوله دیگر B بطول ۱/۳۵ft که هردوطرف‌آن بازاست نیزارتعاش‌اصلی خود را ایجاد میکند . سرعت انتشار صوت را درهوا ۱۱۲۰ft/sec فرض‌کنید . از اثر انتهای لوله صرفنظر کنید . (a)فرکانس اصلی‌لوله A و (b) فرکانس لوله B راپیداکنید.

۱۴-۳۲ معمولا برای‌کنترل ارتعاشات مدارنوسان‌کننده الکتریکی از صفحه‌نازك کوارتزاستفاده می‌شود . امواج ساکنی‌که درکوارتزایجاد میشود طوری است‌که درهروجه آن یك بطن تشکیل میشود فرکانس اصلی از رابطه زیر بدست میآید :

$$f_1 = \frac{2/87 \times 10^5}{s}$$

که درآن f_1 فرکانس اصلی و s ضخامت صفحه برحسب سانتیمتر است . (a) مدول یونگ رابرای‌کوارتزبدست آورید. (b) ضخامت صفحه‌برای فرکانس ۱۲۰۰ کیلوسیکل برثانیه چه اندازه‌باید باشد . توده ویژه‌کوارتز $2/66 gm/cm^3$ است . (کیلوسیکل = ۱۰۰۰ سیکل)

پدیده های اکوستیکی

۲۳-۱ ، تغییر فشار در امواج صوتی

دراین فصل ما فقط به بحث درباره امواج طولی و بخصوص در باره امواجی بحث خواهیم کرد که در گوش ایجاد احساس شنوائی می کنند . حدود ۱ کانس این امواج بین ۲۰ و ۲۰۰۰۰ خواهد بود . این امواج را **امواج صوتی** مینامند .

وقتی امواج صوتی وارد گوش میشوند ملکولهای هوا که درمحاور پرده صماخ هستند بارتعاش درمی آیند ودامنه ارتعاش آنها محدود وبسیار کم است . فشار وارد ازهوا برپرده صماخ تغییرات متناوب دارد ومیتوان گفت که فشار وارده برپرده صماخ ، ارتعاش میکند . این فشار ، گاهی بیشتر و زمانی کمتراز فشار جو است وتغییرات آن ، تابع نحوه ارتعاش ملکولهای هواست . حداکثر فشار را **دامنه فشار pressure amplitude** می نامند. میتوان ثابت کرد که دامنه فشارمتناسب با دامنه ارتعاش است.

اندازه گیریها نشان داده است که حداکثر تغییر فشاردر بلندترین صداها که برای گوش قابل تحمل است درحدود $۲۸۰ \frac{dynes}{cm^2}$ (کمتر یا بیشتر ازفشار جو که خود درحدود $۱۰^۶$ دین برسانتیمتر مربع است) میباشد . برای ارتعاشی بافرکانس ۱۰۰۰ دامنه نوسان درحدود یکهزارم سانتیمتراست . یعنی دامنه بلندترین صداها نیزفوق العاده کم است .

تغییرات فشار در امواج صوتی بافرکانس ۱۰۰۰ درحدود $۲ \times ۱۰^{-۴} dynes/cm^2$ ودامنه نظیر آن $۱۰^{-۹} cm$ است . برای فهم بهتر کافی است تـذکر دهیم که طول موج نور زرد $۶ \times ۱۰^{-۵} cm$ است و از اینجا معلوم میشود که گوش دستگاهی است بسیار حساس .

۲۳-۲ ، شدت

از نقطه نظر هندسی وقتی صوت منتشر میشود **شکل موجی** دارد. از نظر فیزیکی با انتشار موج مقداری **انرژی** منتشر میشود که از منبع بگوش میرسد (شبیه اینکه مقداری انرژی توسط امواج نورانی بزمین میرسد). بنابر تعریف ، **شدت I** امواج انتقالی عبارتست از **نسبت انرژی که بهر سانتیمتر مربع از سطح گیرنده میرسد بزمان** است . بزبان دیگر توان متوسطی که به هر واحد سطح از گیرنده میرسد شدت موج نامیده میشود .

میدانیم توانی که توسط نیروئی ایجاد میشود برابر حاصلضرب نیرو در سرعت است. بنابراین توانی که بهر واحد سطح میرسد برابر حاصلضرب تغییر فشار (نیرو بر واحد سطح) از سرعت ملکولهای مرتعش میباشد . میتوان ثابت کرد که بطور متوسط درهر سیکل خواهیم داشت :

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \qquad (۱-۲۳)$$

که در آن **p** دامنه فشار ، ρ توده ویژه متوسط هوا و **c** سرعت انتشار امواج است .چنانکه می‌بینیم شدت **متناسب با مجذور فشار** است واین فرمول برای انواع امواج صحیح است .

برای بلندترین صوت قابل شنیدن که در آن $p = 28 \cdot \frac{dynes}{cm^2}$ است داریم :

$$I = \frac{(28 \cdot dynes/cm^2)^2}{2 \times 1/22 \times 10^{-3} gm/cm^3 \times 3/46 \times 10^4 cm/sec}$$

$$= 940 ergs/sec\,cm^2 = 94 \times 10^{-6} watt/cm^2 *$$

دامنه فشار ظریفترین امواج قابل شنیدن دو حدود $0/0003 dyne/cm^2$ که نظیر شدت $10^{-6} watt/cm^2$ است .

هر گاه شدت صوت در تمام نقاط یک سطح ، ثابت باشد توان کل داده شده بیک سطح برابر حاصلضرب شدت در اندازه سطح است . توان متوسط صوتی شخصی که بطور عادی صحبت میکند برابر $10^{-5} watt$ وصدای یک نفر که فریاد میزند درحدود 3×10^{-2} وات است . وقتی جمعیتی نظیر جمعیت نیویورک همگی با هم صحبت کنند توان صوتی همه آنها درحدود ۶۰ وات یعنی درحدود توان یک لامپ معمولی است . برعکس ، توان لارم برای بلندگوئی که صدای آن قابل شنیدن است خیلی زیاد میباشد . فرض کنیم صدای این بلندگو در

---

* وات بر سانتیمتر مربع واحدی عملی است . نه متعلق به **cgs** و نه **mks** . این واحدها فقط دراکوستیک معمول است وما نیز ازآنها استفاده میکنیم .