موج و انرژی

بهمن قمری
دبیر فیزیک دبیرستان‌های تهران

چکیده

آیا در یک موج ایستاده، گره‌ها فاقد انرژی هستند؟! موج اگر برای شُعرا، الهام‌بخش نازک خیالی است، برای فیزیکدان‌ها برانگیزانندهٔ کنجکاوی و پژوهش است. در این نوشتار انرژی و توان موج به دقت مورد واکاوی قرار گرفته است.

آیا در موج پیش‌رونده، همه نقاط در هر لحظه، دارای انرژی هستند ولی نوع انرژی آن‌ها (انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل کشسانی) برای آن‌ها متفاوت است؟ آیا هنگام بر هم نهی امواج، توزیع انرژی عادلانه صورت می‌گیرد؟ آیا نمایش موج به صورت یک ریتم منظم تکرارشونده از صف سربازان یا قطعات دومینو، وفادار به فیزیک موج است یا حقیقت را تحریف می‌کند؟ پاسخ این سؤالات، مُزد صبوری شما در مطالعه دقیق این نوشتار است ...

کلیدواژه‌ها: موج پیش‌رونده، موج ایستاده، اجزای کلوخه‌ای، اجزای پیوسته، انرژی موج، توان موج، انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل، گره، شکم

موج پیش‌رونده و موج ایستاده از منظری دیگر

با دو عینک می‌توان به انتقال انرژی توسط موج نگاه کرد. نگاه اول را با جمله‌ای از کتاب *فیزیک پیش‌دانشگاهی* (رشته ریاضی صفحهٔ ۱۲۱ چاپ سال ۱۳۸۲) شروع می‌کنیم که سال‌ها مورد قبول دبیران گرامی و نویسندگان کتاب قرار داشت و من جایی انتقادی به آن ندیده‌ام.

«وقتی قلهٔ موج به یک ذره از محیط می‌رسد، در آن لحظه تمام انرژی ذره به‌صورت انرژی پتانسیل است و وقتی ذره از وضع تعادل می‌گذرد تمام انرژی آن به‌صورت انرژی جنبشی خواهد بود.»

در همین صفحه می‌بینیم نوشته شده است: «انرژی نوسانگری به جرم m که با دامنهٔ A و بسامد f نوسان می‌کند برابر است با: $E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$ (۴-۱۷)». و ادامه می‌دهد: «چون هر ذرهٔ محیط، حرکت نوسانی ساده با بسامد موج انجام می‌دهد بنابراین انرژی مکانیکی هر ذره محیط، از رابطهٔ (۴-۱۷) محاسبه می‌شود.»

این دیدگاه در ترجمه‌های هالیدی گلستانیان- بهار هم که در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ منتشر شده است دیده می‌شود.

مترجمـــان این کتاب با جملات بعضاً دو پهلو این دید را رد نکرده‌اند بلکه تقویت هم می‌کنند.

اکنون می‌پرسیم اگر این‌گونه بود دیگر چه نیازی به گفتن توان متوسط انتقالی بود؟ کافی بود می‌گفتیم توانی که موج منتقل می‌کند، چون انرژی همهٔ نقاط، در مجموع (جنبشی و پتانسیل) ثابت است، پس کافی است پیدا کنیم که نسبت $P=\frac{E}{t}$ چقدر است.»

$$E=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=\frac{1}{2}\mu l\omega^2A^2$$

$$P=\frac{E}{t}=\frac{1}{2}\mu\left(\frac{l}{t}\right)\omega^2A^2\Rightarrow P=\frac{1}{2}\mu\omega^2A^2V$$

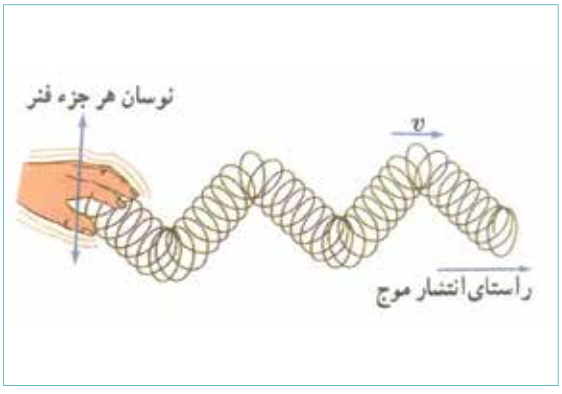
($\frac{l}{t}=v$)

اما در دهـــهٔ ۹۰، در ویرایش‌های جدیـــدی که از هالیدی منتشر شده است این دیدگاه تغییر کرده و در کتاب درسی ما هم تغییرِ ایجاد شده است.

مثـــلاً در صفحـــهٔ ۱۱۷ کتـــاب فیزیـــک رشـــته ریاضی پیش‌دانشـــگاهی سال ۱۳۹۱ این جملات رنگ باخته‌اند ولی فقط مرموزتر شـــده‌اند. ذیل همان تیتر «موج حامل انرژی» است می‌خوانیم: «در فصل ۳ دیدیم انرژی مکانیکی نوسانگر ساده، با مجذور دامنه و مجذور بسامد نوسانگر متناسب است. وقتی یک موج سینوسی با دامنهٔ A و بسامد f در طناب بلند و کشیده شده‌ای پیش می‌رود، همراه با پیش‌روی موج، انرژی نیز در طنـــاب پیش می‌رود. توان انتقـــال انرژی از هر نقطه طناب تابعی از زمان اســـت و با گذشت زمان تغییر می‌کند. مقدار متوسط توان انتقال انرژی از هر نقطه طناب در مدت زمان یک دوره (T) از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.»

$$\overline{P}=2\pi^2A^2f^2\mu V \qquad (۱۴-۷)$$

اگرچه این نشان می‌دهد نویسندگان کتاب‌های درسی پی برده‌اند که باید جملات جدیدی نوشته شود، اما اصل مطلب هنوز مغفول مانده اســـت. (در همان کتاب تصویری کشیده شده که موج در حال انتشار را نشان می‌دهد.)



براســـاس این دیدگاه، در قله، انرژی پتانسیل و در بُعدِ صفر انرژی جنبشـــی ماکزیمم است. (به افزایش فاصلهٔ حلقه‌ها در قله توجه کنید)

ما از یک فنر کشـــیده شده، در حالتی که از آن موج عرضی می‌گذشت، عکس گرفتیم؛ هیچ نقطه‌ای فشرده‌تر از قسمت بدون موج نبود. در قله‌ها، کشـــیدگی به اندازهٔ قسمت بدون موج بود. در محلِ $y=0$ کشیدگی ماکزیمم است.

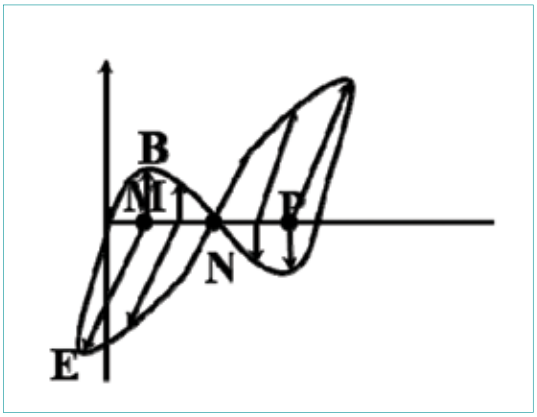
این دیدگاه فکر می‌کرد کـــه وقتی یک موج نامیرا، در یک محیط کشسان جلو می‌رود، انرژی به‌صورت مساوی در همهٔ نقاط محیط وجـــود دارد. هر نقطـــه کارش گرفتن انرژی از نقطـــهٔ قبل و پس دادن آن به نقطهٔ بعـــد بدون تغییر انرژی خودش است. مثل تعداد زیادی سرباز که یکی پس از دیگری می‌نشـــینند و بلند می‌شوند فقط در اثر تمرین خبر نوسان را به یکدیگر می‌دهند.

خلاصه اینکه از نظر طرفداران این دیدگاه محیط انتشـــار اجزای کلوخه‌ای (Lumped Elements) دارد؛ بنابراین ذرات محیط را مثل نوسانگرهای جرم-فنر تصور می‌کنند و به نظر آن‌ها انرژی جنبشی یک تابع $\sin^2\omega t$ است و انرژی پتانسیل یک تابع $\cos^2\omega t$ است.

در نتیجه اگر در جایی انرژی جنبشی نیست، انرژی پتانسیل هست و اگر جایی انرژی پتانسیل نیست انرژی جنبشی وجود دارد؛ ولی مجموع این‌ها در نقاط مختلف یکســـان است. پس نتیجه می‌گیرند که همه جای نقاط مواج انرژی دارند فقط نوع آن‌ها در هر نقطه با نقطه دیگر فرق می‌کند.

در دهۀ ۹۰، در ویرایش‌های جدیدی که از هالیدی منتشر شده است این دیدگاه تغییر کرده و در کتاب درسی ما هم تغییر ایجاد شده است

موج الکترومغناطیس شکل مقابل را مشاهده کنید. در حالی کـــه در M و P، هم انرژی الکتریکی و هم انرژی مغناطیســـی ماکزیمم اســـت در نقطه N هیچ نوع انرژی نه الکتریکی و نه مغناطیسی وجود ندارد. این نکته با آن دیدگاه همخوان نیست.



و نیز، در موج ایستاده، این دیدگاه فکر می‌کرد نقاط متفاوت دامنه‌های مختلف دارند. یعنی انرژی نقاط مختلف یکســـان نیســـت. در شـــکم‌ها انرژی مکانیکی ماکزیمـــم و در گره‌ها تقریباً صفر است و نقاط بینابین هم کمتر از شکم و بیشتر از گره انرژی دارنـــد و انرژی را به هم منتقل نمی‌کنند. چرا آن سربازها که گفتیم اینجوری هستند؟ یعنی در حال نوسان‌اند، اما انرژی را منتقل نمی‌کنند. ولی وقتی دامنه آن‌ها برابر بود، علاوه بر نوسان، انرژی را منتقل هم می‌کردند؟!!!!

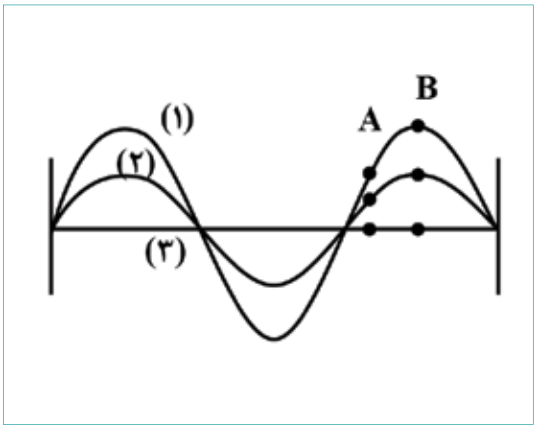
در شـــکل مقابل، حالت یک طناب یا فنـــر که در آن موج ایستاده ایجاد شده در سه زمان مختلف نشان داده شده است.

اگر از صاحبان این دیدگاه بپرســـیم، که نظرشان راجع به انرژی این طناب یا فنر چیست، خواهند گفت:

در حالت (۱) همهٔ انرژی‌ها پتانسیل هستند؛

در حالت (۳) همه انرژی‌ها جنبشی هستند؛

و در حالت (۲) کمی انرژی پتانسیل و کمی انرژی جنبشی داریم.



مجموع انرژی جنبشـــی و پتانسیل A و B در همهٔ لحظات ثابت است. فقط این مجموع در B، بیشتر از A می‌باشد. برای موج ایســـتاده توزیع انرژی ناعادلانه اســـت. در گره‌ها انرژی نداریم و در شکم‌ها انرژی ماکزیمم است.

نگاه دوم و هدف این نوشتار

مهم‌ترین ایراد نگاه اول این است که محیط انتشار را دانه دانه و کلوخه‌ای تصور می‌کند. برای کسانی که از مکانیک ذره تازه فارغ شده‌اند و خصوصاً هنوز در هوای مبحث نوسان هستند، این نگاه یا برداشت اغواگر اســـت. برای صاحب این برداشت راحت‌تر اســـت که فکر کند محیط انتشار موج مجموعه‌ای از نوسانگرها اســـت، در صورتی که می‌دانیم محیط‌های انتشار موج، حرکتِ مشـــترکِ مجموعه‌ای از ذرات در «محیط‌های پیوسته» می‌باشد.

باید توجه کرد هرچند دریا از قطرات آب تشکیل شده است، اما این دریا خواصـــی دارد که قطرات ندارند. مثلاً در مبحث نوسان، سرعت انتشار و طول موج بی‌معناست. این‌ها و خواص جدیدی که خواهیم دید، از به هم پیوســـتن قطرات به‌وجود آمده‌انـــد. خود قطـــرات فاقد این خواص هســـتند. در کتاب طرح فیزیک هاروارد مطلبی است بسیار آموزنده. می‌نویسد: «احتمـــالاً تاکنـــون توصیفی از کشـــتزارهای بـــزرگ گندم خوانده‌اید؛ امواج زیبایی که به وســـیلهٔ باد تشکیل می‌شوند و کیلومترهـــا در مزرعه می‌غلتند ... این آشـــفتگی‌ها ســـیر می‌کنند اما منتشر نمی‌شوند، زیرا ساقه‌های گندم بی‌ارتباط با هم هســـتند، منبعی وجود ندارد که از آن منشـــأ بگیرند و خودبه‌خود نیز دور شـــوند. باید پیوسته باد به آن‌ها بوزد. اگر نوزد آشفتگی هم از سیر خود باز می‌ماند.»

شاید برداشـــتمان از اصل هوینگس هم احتیاج به بازنگری دارد.

در موج‌های یک‌بعدی فقط یک منبع داریم. این‌طور نیست که هر نقطه‌ای بـــرای نقطهٔ بعدی مثل یک منبع عمل کند، بلکه هر نقطه‌ای را فقط می‌تـــوان مبدأ گرفت و اختلاف فاز را حســـاب کرد. ولی آن نقطه منبع نیست. موج از منبع دور می‌شود ولی از مبدأ می‌گذرد.

حال اگر محیط انتشـــار را محیطـــی در نظر بگیریم که هر عنصر آن هم اینرســـیال و هم‌کشسان است، می‌توان فهمید که چرا موج آناً منتشـــر نمی‌شود و برای انتقال انرژی احتیاج به زمان دارد. چرا ســـرعت انتشـــا موج به خاصیت کشسانی و اینرســـی محیط بســـتگی دارد؟ مثلاً در $V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ ، F به نمایندگی از نیروی کشســـانی و μ به نمایندگی از اینرســـی انتشار موج عرضی در طناب یا فنر را موجب می‌شوند.

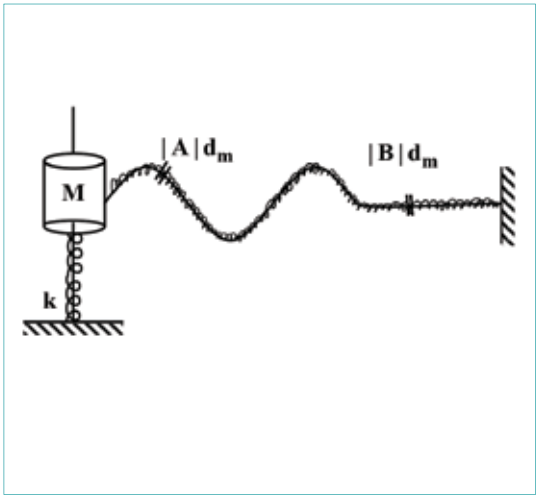
در شـــکل مقابل منبع تولید موج یک نوســـانگر جرم ـ فنر

در موج‌های یک‌بعدی فقط یک منبع داریم. این‌طور نیست که هر نقطه‌ای برای نقطهٔ بعدی مثل یک منبع عمل کند، بلکه هر نقطه‌ای را فقط می‌توان مبدأ گرفت و اختلاف فاز را حساب کرد

است. گاهی فنر باز می‌شود و گاهی فشرده می‌شود و منبع را به نوسان در می‌آورد و اگر انرژی آن مدام تأمین شود در محیط (فنر کمی کشیده) انرژی‌اش را منتشر می‌کند.

ولی عنصر طولی |A| با جرم d_m که بخش کوچکی از فنر افقی است همه خصوصیات منبع M را ندارد از جمله فنری که هم فشرده و هم کشیده شود وجود ندارد.

عنصر طولی |A| گاهی کشیده شده‌تر از عنصر طولی |B| است ولی هرگز فشرده شده‌تر از آن نیست.



چقدر بدآموزی دارند کلیپ‌هایی که برای نمایش موج، نشستن و بلند شدن سربازها را، که به دستور انجام می‌شود، نشان می‌دهند.

در پایان، برای درک تفاوت ذره و محیط پیوسته، به اصل برهم‌نهی توجه کنید: چندین موج در یک محیط (جنگل) طوری منتشر می‌شوند که انگار دیگری وجود ندارد، ولی هر نقطهٔ محیط (درخت) حرکتی می‌کند به اندازهٔ مجموع جابه‌جایی همه.

در یک محیط پیوسته انتشار انرژی موج طوری است که در هر نقطه آن، نه اینکه جنبشی به پتانسیل و پتانسیل به جنبشی تبدیل می‌شود. بلکه از هر نقطه آن هم جنبشی و هم پتانسیل [بخوانید هم انرژی اینرسیال وابسته به جرم و هم انرژی وابسته به کشسانی] به نقطهٔ دیگر می‌روند.

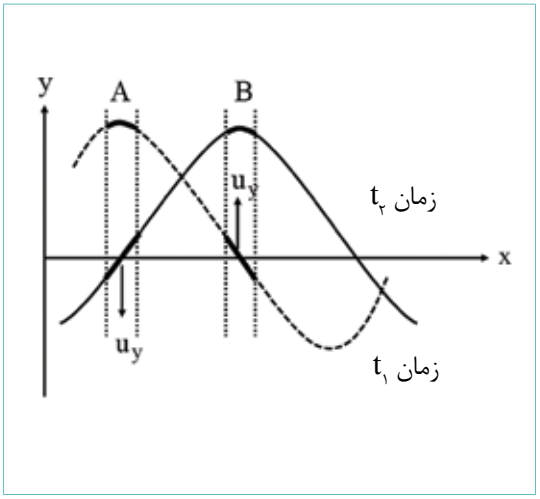
هر دو با رابطهٔ $\cos^2 \omega t$ به زمان بستگی دارند. در یک نقطه گاهی انرژی زیاد (نصف جنبشی و نصف پتانسیل) و گاهی انرژی کم دارد. یعنی (هم جنبشی و هم پتانسیل) کم است.

در شکل مقابل که از ویراست جدید هالیدی برداشته شده است.

در یک لحظه قسمت کوچک |A| نه انرژی جنبشی و نه انرژی پتانسیل دارد ولی در لحظهٔ دیگر ($\frac{T}{4}$ بعد) هم انرژی جنبشی و هم انرژی پتانسیل آن ماکزیمم است. (انرژی پتانسیل ندارد یعنی هم اندازه قسمتی که هنوز موج به آن نرسیده است)

بنابراین، انرژیِ هر نقطه تابع زمان است و در یک دوره تناوب همهٔ نقاط شرایط مشابهی را تجربه می‌کنند و با شرکت همه نقاط مواج، در مدت T به اندازهٔ $\frac{1}{2}\mu\lambda\omega^2 y_m^2$ انرژی منتقل می‌شود.

ثابت خواهیم کرد که وقتی در یک محیط یک بعدی، موجی با دامنهٔ ثابت منتشر می‌شود نصف انرژی حمل شونده جنبشی و نصف آن پتانسیل است و هر دو نوع انرژی در تمامی نقاط محیط با هم برابر هستند.



وقتی در یک محیط یک بعدی، موجی با دامنهٔ ثابت منتشر می‌شود نصف انرژی حمل شونده جنبشی و نصف آن پتانسیل است و هر دو نوع انرژی در تمامی نقاط محیط با هم برابر هستند

انرژی جنبشیِ dk، متناظر با عنصری از ریسمان یا فنری به جرم dm، عبارت است از $dk = \frac{1}{2}(dm)u^2$؛ که در اینجا u سرعت عرضی عنصر (dm) است و از $u = \frac{\partial y}{\partial t}$ به‌دست می‌آید.

$$y(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) \Rightarrow u = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega y_m \cos(kx - \omega t)$$

حال با قرار دادن $dm = \mu dx$ داریم:

$$dk = \frac{1}{2}dmu^2 \Rightarrow dk = \frac{1}{2}\mu dx(-\omega y_m)^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

حال از $dx = Vdt$ برمی‌آید که آهنگ انتقال انرژی به‌صورت جنبشی خواهد شد.

$$\frac{dk}{dt} = \frac{1}{2}\mu . V y_m^2 \omega^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

از آنجایی که متوسط $\cos^2(kx - \omega t)$ برای یک دوره تناوب برابر $\frac{1}{2}$ است، پس:

$$(\frac{dk}{dt})_{Avg} = \frac{1}{2}\mu V y_m{}^2\omega^2 \underbrace{[\cos^2(kx-\omega]}_{\text{متوسط یک دوره تناوب برابر } \frac{1}{2} \text{ است.}} \Rightarrow (\frac{dk}{dt})_{Avg} = \frac{1}{4}\mu V y_m{}^2\omega^2$$

که V سرعت فاز موج (سرعت انتشار موج) است.

می‌توان ثابت کرد که انتقال انرژی پتانسیل هم به همین صورت است؛ یعنی درست مثل انرژی جنبشی، در بعد ماکزیمم صفر و در بعد صفر ماکزیمم است.

در پاورقی اثبات کرده‌ایم که در طناب: $U = \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow du = \frac{1}{2}F(\frac{\partial y}{\partial x})^2 dx$؛ و در آن F کشش فنر است.*

یعنی برای یک موج با معادلهٔ $y = y_m \sin(kx-\omega t)$ داریم:

$$du = \frac{1}{2}Fk^2 y_m{}^2 \cos^2(kx-\omega t)dx$$

حال معلوم می‌شود که چرا باید از توان شارشی متوسط انرژی سخن بگوییم نه از توان شارشی انرژی.

حال با توجه به $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ و $kv = \omega$ و $V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ داریم:

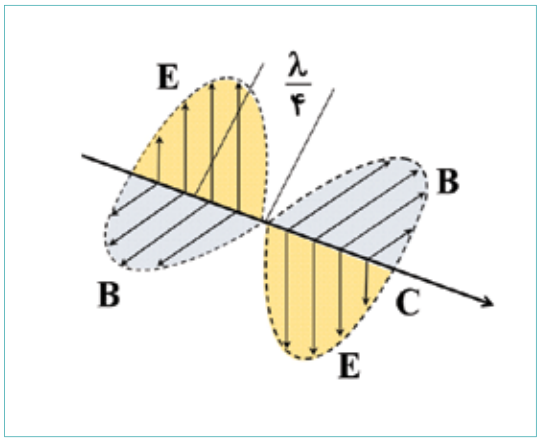
$$Fk^2 = \mu V^2 . \frac{\omega^2}{V^2} = \mu\omega^2$$

و نیز $dx = Vdt$ حال

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{2}y_m{}^2\mu\omega^2 . V\cos^2(kx-\omega t)$$

این وضع در امواج الکترومغناطیس هم وجود دارد.

شباهت موج روندهٔ الکترومغناطیس با موج عرضی رونده از نظر انرژی بسیار آموزنده است. در یک‌جا هم مغناطیسی و هم الکتریکی صفر است و در $\frac{\lambda}{4}$ جلوتر هر دو ماکزیمم است؛ ولی در $\frac{T}{4}$ ثانیه بعد در جای قبلی ماکزیمم و در جای اول صفر می‌شود.



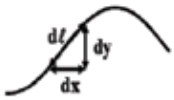
اگرچه این نشان می‌دهد نویسندگان کتاب‌های درسی پی برده‌اند که باید جملات جدیدی نوشته شود، اما اصل مطلب هنوز مغفول مانده است

$$\left[\frac{dE}{dt}\right]_{Avg} = \frac{1}{2}\mu V\omega^2 y_m{}^2$$

$$du = F(dl-dx) \Rightarrow du = F\left[\sqrt{dx^2+dy^2} - dx\right]$$

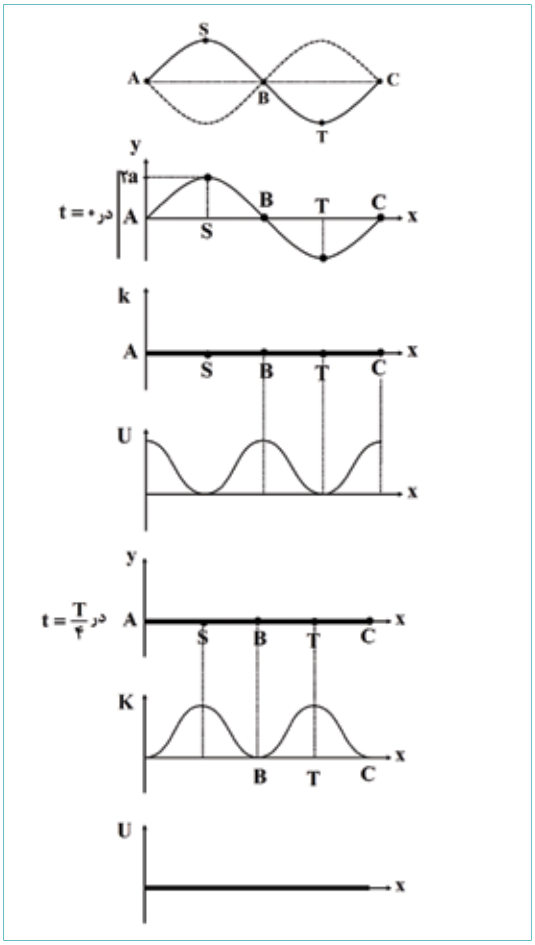
$$du = F\left[\sqrt{1+(\frac{dy}{dx})^2} - 1\right]dx \Rightarrow \sqrt{1+\varepsilon} = 1+\frac{1}{2}\varepsilon$$

$$du = F\left[1+\frac{1}{2}(\frac{dy}{dx})^2 - 1\right]dx \Rightarrow du = \frac{1}{2}F(\frac{dy}{dx})^2 dx$$



حال در مورد موج ایستاده

در لحظهٔ $t=0$ و $t=\frac{T}{4}$ بعد و انرژی جنبشی و انرژی مکانیکی هماهنگ دوم فنر مرتعشی را تماشا کنید.



این شکل‌ها نشان می‌دهد که:

ـ در گره‌ها انرژی صفر نیست، بلکه فقط انرژی جنبشی صفر است.

ـ در شکم‌ها انرژی ماکزیمم نیست بلکه انرژی جنبشی بین ماکزیمم و می‌نیمم (صفر) تغییر می‌کند. آنجا هرگز انرژی پتانسیل وجود ندارد.

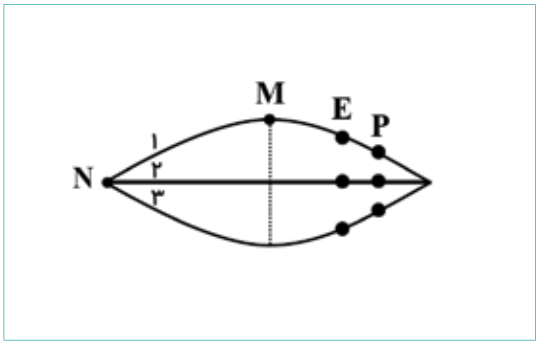
ـ بین گره و شکم انرژی به شکل ویژه‌ای منتقل می‌شود، در ضمن انتقال انرژی جنبشی از شکم به گره‌ها می‌رود و به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود و سپس برمی‌گردد و باز به انرژی جنبشی تبدیل می‌گردد.

ـ اگر در محل گره کاغذی بگذارید هیچ حرکتی نمی‌کند، ولی در محل شکم اگر کاغذی بگذارید پرتاب می‌شود. پس انرژی پتانسیل توانایی پرتاب کردن را ندارد و باید به انرژی جنبشی تبدیل شود تا جسمی را پرتاب کند!

ـ با اینکه از گره انرژی نمی‌گذرد ولی بین گره و شکم مجاور، بده بستان انرژی برقرار است.

ـ درست نیست بگوییم این موج مجموعهٔ (جرم ـ فنر)هایی هست که فقط دامنهٔ متفاوت دارند. در جرم ـ فنر انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود، فنر گاهی باز و گاهی بسته می‌شود. اینجا فنر هرگز بسته نمی‌شود. این‌طور نیست که گره و شکم، یکی بی‌انرژی و دیگری انرژی‌دار باشد. بلکه یکی محل کم و زیاد شدن انرژی جنبشی (شکم) و دیگری محل کم و زیاد شدن انرژی پتانسیل (گره) است و بین شکم و گره انرژی دست‌به‌دست می‌شود.

شکل مقابل هماهنگ اول یک موج ایستاده است. در اینجا فرق نقطهٔ P و E این نیست که چون دامنهٔ E بیشتر از P است پس انرژی در E بیشتر است!



از دیدگاه محیط پیوسته

در بُعد ماکزیمم حالت (۱) انرژی جنبشی هر دو نقطه صفر است ولی انرژی پتانسیل P بیشتر است.

در بُعد صفر حالت (۲) انرژی پتانسیل هر دو نقطه صفر است ولی انرژی جنبشی E بیشتر است.

اما برای یک دورهٔ تناوب (حتی نصف دورهٔ تناوب) جمع انرژی جنبشی و پتانسیل P و E با هم برابرند. ولی در P خود را بیشتر به شکل انرژی پتانسیل در می‌آورد و در E بیشتر به شکل انرژی جنبشی بروز می‌کند. به همین دلیل در E می‌تواند تکان بیشتر و در P کشیدگی زیادتری ایجاد کند.

همچنین اگر راحت‌تر هستید می‌توانید بگویید:

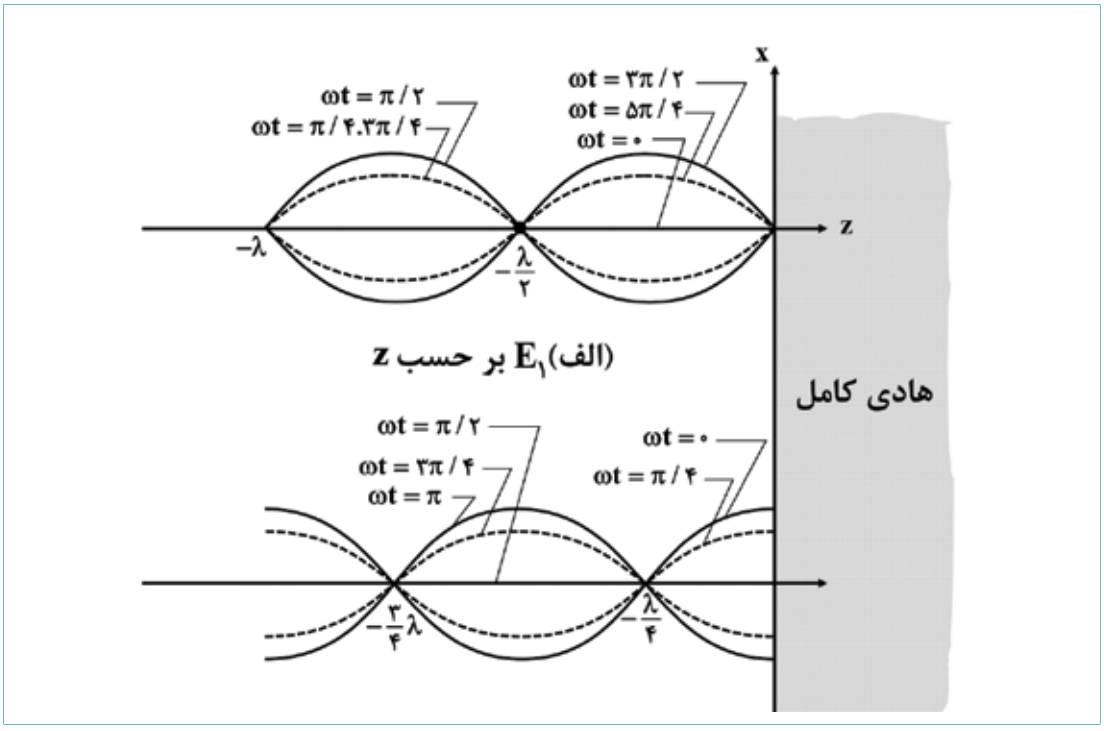
همان‌طور که نقطهٔ M برای انرژی جنبشی شکم و نقطهٔ N گره است، به همین ترتیب که نقطه N برای انرژی پتانسیل شکم و نقطه M گره است.

وقتی موج الکترومغناطیس به یک فلز می‌خورد میدان الکتریکی صفر، در صورتی که میدان مغناطیس ماکزیمم می‌شود و در حالت برگشت به شکل جالبی در گره‌ها، مغناطیسی ماکزیمم و در شکم‌ها، الکتریکی ماکزیمم می‌شود. همان‌گونه است انرژی‌ها.

جالب‌ترین قسمت داستان آنجاست که اگر بتوانیم تشابه موج‌های مکانیکی را به امواج الکترومغناطیس تعمیم دهیم باید بگوییم در محل نوارهای روشنِ آزمایش یانگ، انرژی الکتریکی کم و زیاد می‌شود چون میدان الکتریکی نوسان می‌کند؛ و در نوارهای تاریک، میدان مغناطیسی نوسان می‌کند (انرژی مغناطیسی ماکزیمم و صفر می‌شود) و بین تاریک و روشن، انرژی دست‌به‌دست می‌شود.

به طوری که یک لحظه در محل نوار روشن، انرژی الکتریکی ماکزیمم می‌شود. ولی در همان لحظه در گره، هم انرژی الکتریکی و هم انرژی مغناطیسی صفر است. لحظهٔ دیگر (ربع دوره تناوب بعد) در محل روشن، هم انرژی الکتریکی و هم انرژی مغناطیسی صفر است. آن لحظه در محل تاریک، انرژی مغناطیسی ماکزیمم است. ولی گیرنده‌های چشم فقط به میدان الکتریکی حساس هستند، یعنی وجود انرژی در نوارهای روشن را می‌بینند ولی انرژی مغناطیسی در نوارهای تاریک را نمی‌بینند.

جالب‌ترین قسمت داستان آنجاست که باید بگوییم در محل نوارهای روشن آزمایش یانگ، انرژی الکتریکی کم و زیاد می‌شود



چقدر بدآموزی دارند کلیپ‌هایی که برای نمایش موج، نشستن و بلند شدن سربازها را، که به دستور انجام می‌شود، نشان می‌دهند

این مطلب را از کتاب دورهٔ فیزیک برکلی فرانک‌اس، کرافورد نقل می‌کنم.

چرا همیشه E را در نظر می‌گیریم و از B صرف‌نظر می‌کنیم؟

البته همیشه این طور نیست، اما اغلب این کار را می‌کنیم. قسمتی از دلیل اینکه ما معمولاً اثر امواج الکترومغناطیسی را بر حسب E بیان می‌کنیم و در فرمول B را در نظر نمی‌گیریم، به شرح زیر است: هنگامی که امواج الکترومغناطیسی با ذرهٔ بارداری با بار q و سرعت v برهم‌کنش می‌کنند نیروی وارد بر ذره با نیروی لورنتس (جلد دوم، سری برکلی، بخش ۵- ۲) داده می‌شود.

$$F = qE + q\frac{v}{c}\times B$$

در مورد یک موج پیش‌روندهٔ الکترومغناطیسی در خلأ نتیجه می‌شود که E و B اندازهٔ لحظه‌ای یکسان دارند. بنابراین اندازهٔ نیروی حاصل از B از اندازهٔ نیروی حاصل از E با یک ضریب در حدود $|v/c|$ کوچک‌تر است. پس نتیجه می‌شود هنگامی که E و B از چشمه‌های نور معمولی یا حتی از یک لیزر قوی حاصل می‌شوند، میدان‌های E و B به اندازهٔ کافی ضعیف هستند، به‌طوری که بیشینهٔ سرعت $|v|$ که در حرکت حالت پایای الکترون‌های واداشته در یک قطعه مادهٔ معمولی به دست می‌آید، در مقایسه با c ناچیز است. از این رو مثال‌های بسیار زیادی وجود دارد که در آن‌ها می‌توانیم از نیروی حاصل از B صرف‌نظر کنیم. به این دلیل است که بر E تأکید می‌کنیم. گاهی اوقات با وجودی که B بر طبق بحث بالا کوچک است، اثرهای آن می‌تواند غالب باشد.

البته اگر B و E حاصل از تابش (امواج پیش‌رونده) نبوده و (مثلاً) حاصل از میدان‌های استاتیک، در نتیجهٔ بارها و شدت جریان‌های مستقل باشند، در این صورت B و E مجبور نیستند اندازهٔ مساوی داشته باشند. مثلاً می‌توانیم $|E| = ۰$ و داشته باشیم $|B| = ۱۰۰\,kG$.