وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
دفتر انتشارات کمک آموزشی

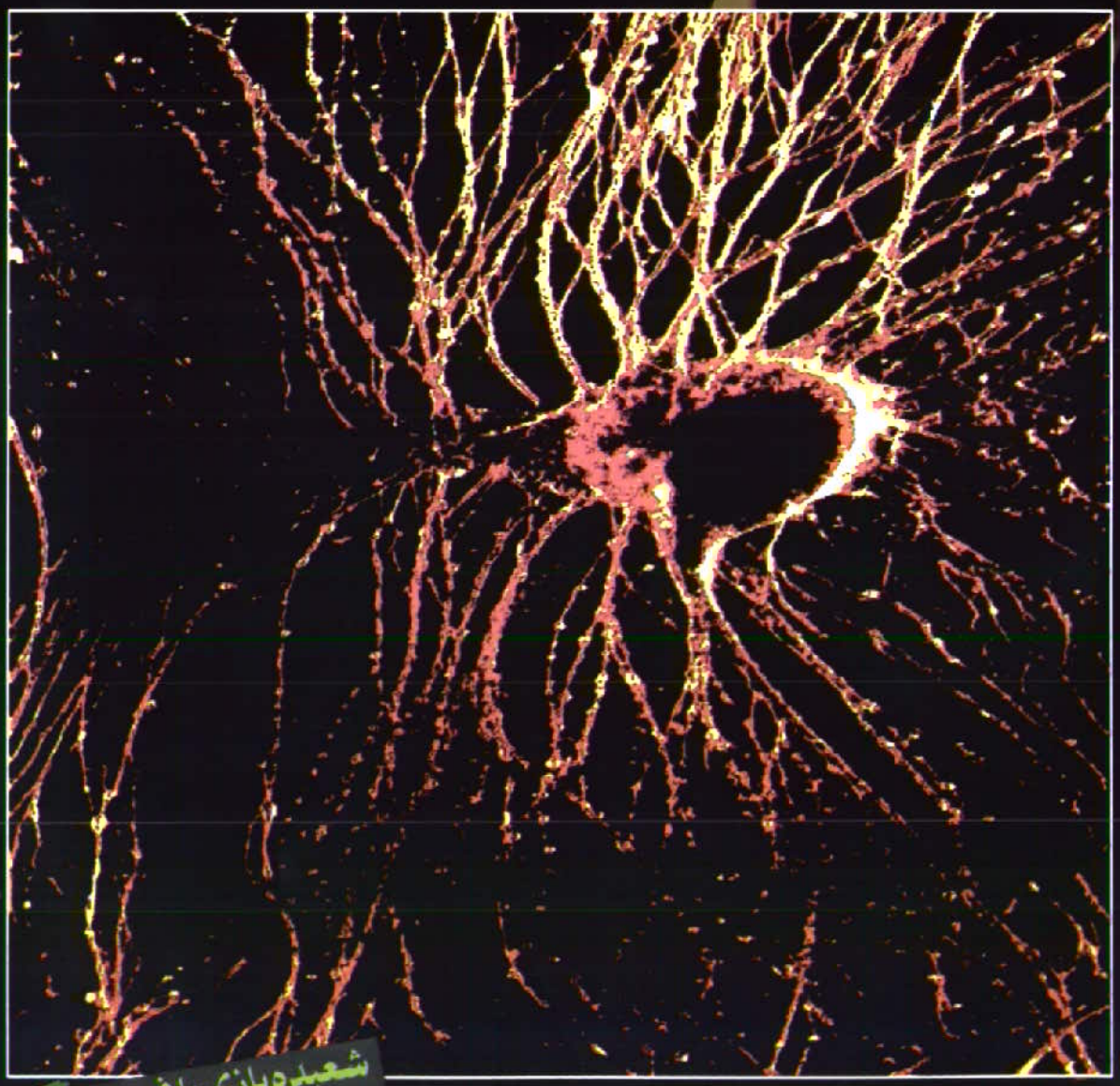
# رشد آموزش فیزیک ۷۵

آموزشی، تحلیلی، اطلاع رسانی

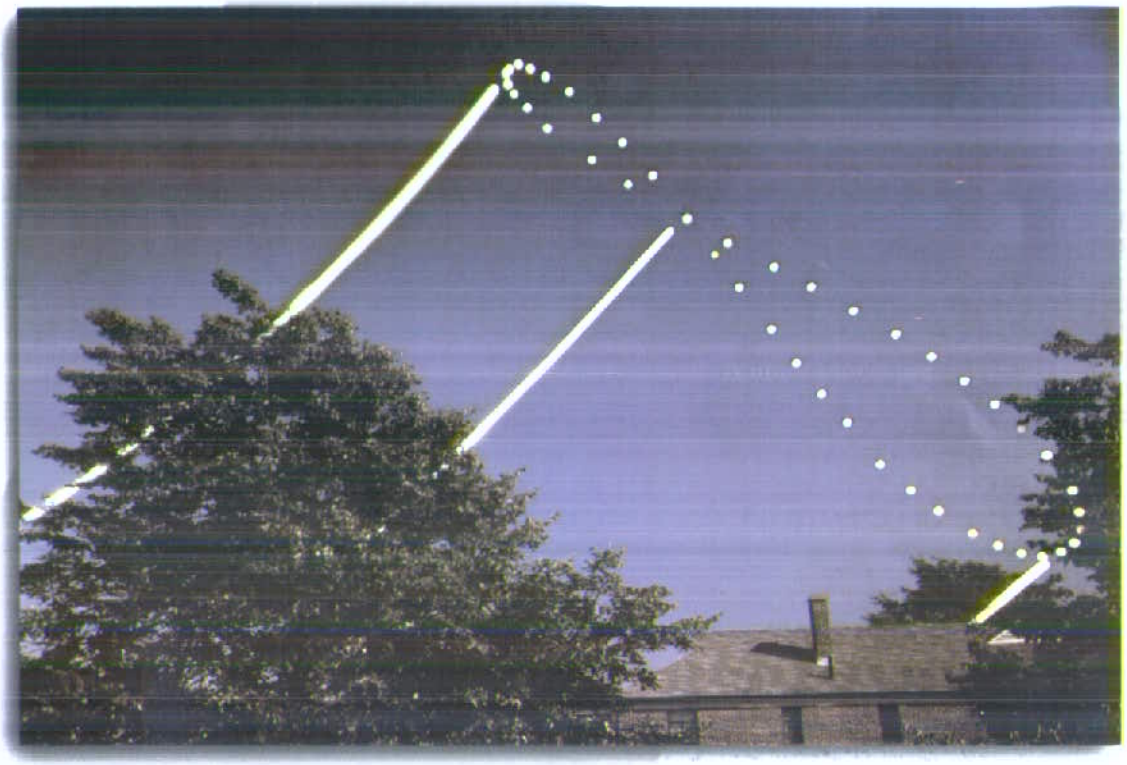
دوره‌ی بیست و یکم، شماره‌ی ۴، تابستان ۱۳۸۵، بها ۲۵۰۰ ریال

ISSN 1606 - 917X

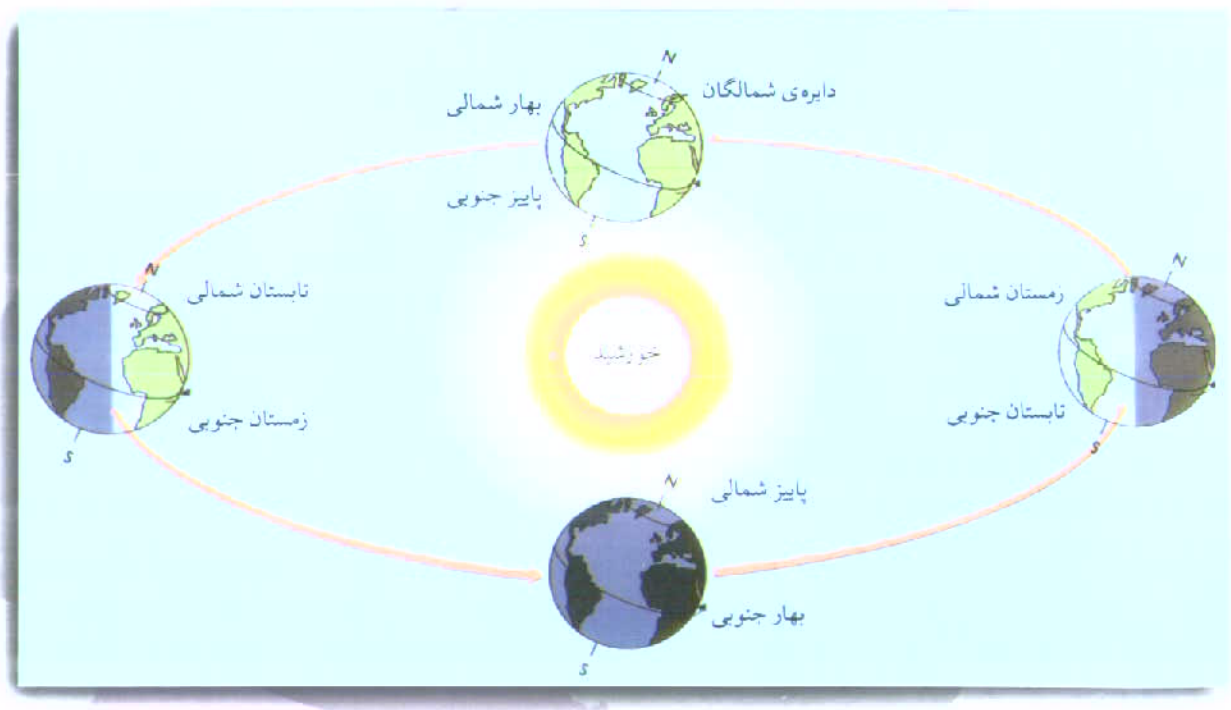
www.roshdmag.org



شعبده‌بازی با فیزیک ۱۲
خطاهای رایج در فیزیک ۱۶
فیزیک کوانتومی و ثابت پلانک ۳۵
انرژی تجدید پذیر دریا ۵۳



این تصویر به روش عکس برداری با نوردهی ـ چندگانه گرفته شده است و تغییر مکان خورشید را در ساعت ۸/۳۰ صبح در کل سال نشان می دهد. خورشید در تابستان، در بالاترین مکان (سمت چپ بالا) و در زمستان، در پایین ترین مکان (سمت راست پایین) است. سه باریکه ی نور، بالا آمدن خورشید را نشان می دهد. شکل از آن رو به صورت عدد ۸ انگلیسی درآمده است که محور زمین کج است و مدار آن به دور خورشید، کاملاً دایره ای نیست. در واقع همین کج بودن محور زمین است که باعث ایجاد فصل ها می شود.



# رشد آموزش فیزیک ۷۵

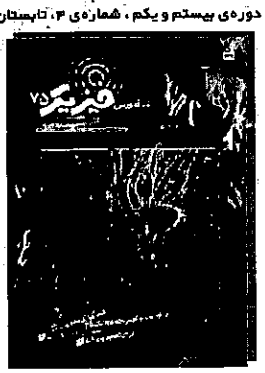
آموزشی، تحلیلی، اطلاع‌رسانی

ISSN : 1606-917X

www. roshdmag.org

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
دفتر انتشارات کمک‌آموزشی

دوره‌ی بیست و یکم، شماره‌ی ۳، تابستان ۱۳۸۵

**تصویر روی جلد:**
بیوفیزیکدانان دانشگاه‌های کُرنل در ایالات متحده و رنس در فرانسه با استفاده از نور درخشان‌لیزر میکروسکوپ چند فوتونی، دقیق‌ترین تصویر را از یک سلول عصبی (نورون) گرفتند. یک سلول عصبی شامل بدنه و دم درازی است که آکسون نامیده می‌شود. آکسون‌ها مانند سیم‌هایی هستند که جریان را از یک سلول عصبی به سلول‌های عصبی دیگر یا سلول‌های عضلانی منتقل می‌کنند.


**سرمقاله: اهمیت پرسشگری** ○ سردبیر ۲

**فیزیک کوانتومی، قانون‌های حرکت ...** ○ *جان لوگبورن و ادوین اف تیلور* ۳

**شعبده‌بازی با فیزیک** ○ *و. مایروا، ماما اوا* ۱۲

**روش‌های مشاهده گرا در ...** ○ *بهروز خیراندیش، مرضیه رجب‌پور نیکنام و ...* ۱۳

**خطاهای رایج در فیزیک...** ○ *محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر* ۱۶

**مواظب یکاها باشید** ○ *محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر* ۱۷

**تله‌اندازی نوری** ○ *لیلا نورآذر* ۱۸

**رویکردی دیگر به معادله‌های سینماتیکی** ○ *حسن علیمحمدی* ۲۱

**ریشه‌یابی واژه‌های فیزیک (قسمت چهارم)** ○ *سیدجعفر مهرداد* ۲۵

**سرمایش لیزری و گیراندازی اتم‌ها** ○ *سیدامین سبحانی* ۲۷

**آزمایشی در منزل، سرعت صوت در هوا** ○ *ویلسون پره‌ریا داسیلوا* ۳۲

**فیزیک کوانتومی و ثابت پلانک** ○ *سیده زهره دودمانی* ۳۵

**اثر لختی بر پاره شدن نخ** ○ *سعید سرابی‌دانش* ۳۹

**بدفهمی‌هایی درباره‌ی فوتون که می‌تواند به ...** ○ *دیوید جی. سی. جونز* ۴۱

**چگونه می‌توانم علاقه‌ی دانش‌آموزان را نسبت به ...** ○ *ملیحه جعفری* ۴۶

**جریان انرژی برای یک خازن با گاف متغیر** ○ *ناتانیل گرین* ۵۰

**انرژی تجدیدپذیر دریا** ○ *الهام عسگری* ۵۳

**رویکردهای نو در سنجش آموخته‌های دانش‌آموزان** ○ *طاهره رستگار* ۵۹

**مقایسه زمان سقوط آزاد و زمان پائین آمدن جسم روی...** ○ *ناصر بصیری* ۶۲



**مدیر مسؤول:** علیرضا حاجیان‌زاده
**سردبیر:** دکتر منیژه رهبر
**مدیر داخلی:** احمد احمدی
**ویراستار:** لعیا عروجی
**طراح گرافیک:** پروانه هادی‌پور
**هیات تحریریه:** احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی
منیژه رهبر، سیدجعفر مهرداد



شمارگان: ۷۵۰۰ نسخه
چاپ: شرکت افست (سهامی عام)
تلفن امور مشترکین: ۸۸۸۳۹۱۸۶
تلفن دفتر مجله: ۹-۸۸۸۳۱۱۶۱ داخلی: ۲۷۱
نشانی دفتر مجله: تهران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۶۵۸۵


مجله رشد آموزش فیزیک، نوشته‌ها و حاصل تحقیقات پژوهشگران و متخصصان تعلیم و تربیت، بویژه آموزگاران، دبیران و مدرسان را، در صورتی که در نشریات عمومی درج نشده و مرتبط با موضوع مجله باشند، می‌پذیرد:

✓ مطالب باید یک خط در میان و در یک روی کاغذ نوشته و در صورت امکان تایپ شود.

✓ شکل قرار گرفتن جدولها، نمودارها و تصاویر ضمیمه باید در حاشیه‌ی مطلب نیز مشخص شود.

✓ نثر مقاله باید روان و از نظر دستور زبان فارسی درست باشد و در انتخاب واژه‌های علمی و فنی دقت لازم مبذول گردد.

✓ مقاله‌های ترجمه شده باید با متن اصلی همخوانی داشته باشد و متن اصلی نیز ضمیمه مقاله باشد.

✓ در متنهای ارسالی باید تا حد امکان از معادل‌های فارسی واژه‌ها و اصطلاحات استفاده شود.

✓ زیرنویسها و منابع باید کامل و شامل نام اثر، نام نویسنده، نام مترجم، محل نشر، ناشر، سال انتشار و شماره صفحه‌ی مورد استفاده باشد.

مجله در رد، قبول، ویرایش و تلخیص مقاله‌های رسیده مختار است.

✓ آرای مندرج در مقاله‌ها، ضرورتاً مبین نظر دفتر انتشارات کمک آموزشی نیست و مسؤولیت پاسخگویی به پرسشهای خوانندگان، با خود نویسنده یا مترجم است.

✓ مجله از بازگرداندن مطالبی که برای چاپ مناسب تشخیص داده نمی‌شود، معذور است.

سر مقاله

# اهمیت پرسشگری

رشد سریع علم در عصر حاضر لزوم بازنگری در شیوه‌ی آموزش را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در جهان امروز که آهنگ دو برابر شدن معلومات علمی بشر از مقیاس چند قرن به چند ماه کاهش یافته است دیگر نمی‌توان انتظار داشت که کسی بتواند در همه‌ی شاخه‌های علم صاحب‌نظر باشد. حتی امکان تسلط بر یک رشته‌ی علمی نیز وجود ندارد، بلکه تنها می‌توان امیدوار بود که در شاخه‌ای از یک رشته‌ی علمی بتوان به مهارت کافی دست یافت و بر آن مسلط شد.

این موضوع بازنگری در روش‌های آموزشی و به کار بردن شیوه‌های جدید را مطرح می‌سازد. اکنون با رشد سریع وسیله‌های ارتباط جمعی، دستیابی به هرگونه اطلاعات در کوتاه‌ترین زمان امکان‌پذیر است. بنابراین، به خاطر سپردن مطالب دیگر ضرورتی ندارد. تنها چیزی که باید آموزش داد چگونگی دستیابی به داده‌های مورد نظر، تحلیل آن‌ها و نیز روش تشخیص مطالب سره از ناسره است.

اکنون همه‌ی ما در معرض اخبار و اطلاعات فراوانی قرار داریم، ولی شاید تعداد کمی از ما قادر به تمیز دادن اخبار درست از نادرست باشیم و تشخیص دهیم که هر خبر با چه انگیزه‌ای منتشر می‌شود. شاید برخی از مسئولان جامعه فکر کنند که برای حفظ افراد جامعه از اطلاعات زیان‌بار باید آن‌ها را قبل از قرار دادن در اختیار مخاطبان گزینش کرد. ولی می‌دانیم که در جهان امروز علاقه‌مندان می‌توانند به راه‌های مختلف به داده‌های مورد نظر خود دسترسی پیدا کنند. پس راه‌چاره چیست؟

بهترین روش شاید آن باشد که به شاگردان خود بیاموزیم چگونه آنچه را می‌بینند و می‌شنوند نقد کنند و بدون استدلال منطقی چیزی را نپذیرند. برای خود من به عنوان فرد فعال در محیط‌های علمی و آموزشی بارها اتفاق افتاده است که در همایش‌های دانش‌آموزی از حاضران خواسته‌ام که تعدادی از دانشمندان برجسته‌ی فیزیک را که نقش مؤثری در توسعه‌ی این علم داشته‌اند نام ببرند؛ و چون نام برده‌اند از آن‌ها پرسیده‌ام که این افراد چه کرده‌اند؟ در این مرحله پاسخ‌ها ناامیدکننده بوده است. چون بیشتر مخاطبان اشخاصی را نام برده‌اند که درباره‌شان به راه‌های مختلف تبلیغ شده بدون آن‌که بدانند آن شخص واقعاً چه کرده است. یا در موارد بسیار اغلب درباره‌ی موضوعی پافشاری فراوان می‌کنند و احساسات زیادی به خرج می‌دهند بدون آن‌که بدانند آیا موضوع مورد نظر اهمیت و ارزش این همه احساسات را دارد یا خیر.

خلاصه آن‌که آموزش پرسشگر بودن و چون و چرا کردن به مورد و به‌جا یکی از مهم‌ترین چیزهایی است که باید مورد نظر مسئولان باشد تا افراد به راحتی تحت‌تأثیر هر نوع جوسازی قرار نگیرند و به هر موضوع همان اندازه توجه کنند و بها دهند که ارزش آن را دارد.

سردبیر

# فیزیک کوانتومی، قانون‌های حرکت نیوتون را توجیه می‌کند

جان اوگبورن[1] و ادوین اف تیلور[2]
مترجم: سحر عبدالهی

**خلاصه**

نیوتون مجبور شد، قانون‌های حرکت خود را به صورت اصل‌های بنیادی ارائه دهد. اما امروز می‌دانیم که دنیای کوانتومی بنیادی است و قانون‌های نیوتون را می‌توان **پیامدهای** قانون‌های بنیادی کوانتومی درنظر گرفت. مقاله‌ی حاضر، این گذار از قانون‌های بنیادی کوانتومی به مکانیک کلاسیک را توضیح می‌دهد.

**توجیه**

معمولاً فیزیک کوانتومی و رفتار کوانتومی ذراتی مثل الکترون‌ها و پروتون‌ها عجیب و اسرارآمیز شمرده می‌شوند. در واقع، به گفته‌ی **ریچارد فاینمن**، الکترون‌ها به روش تقلیدناپذیر خود رفتار می‌کنند؛ رفتاری که قبلاً هرگز ندیده‌اید [فاینمن، ۱۹۶۵ : ۱۲۸].

اما همین ریچارد فاینمن بود که راهی برای توصیف رفتار کوانتومی با سادگی و شفافیت شگفت‌انگیز ابداع کرد [فاینمن، ۱۹۸۵]. دیگر نیازی به حل معمای توضیح رفتار کوانتومی به عنوان تقریبی عجیب از رفتار کلاسیک ذرات و امواج وجود ندارد. ما مسأله‌ی توجیه را برعکس می‌کنیم و با شروع از رفتار کوانتومی نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان رفتار کلاسیک را توصیف کرد.

ممکن است این کار در ابتدا شما را ناراحت کند. چرا باید شناخته شده‌ها را با استفاده از ناشناخته‌ها توضیح داد؟ اما این روش باید **مؤثر** باشد؛ زیرا توجیه‌هایی که از جایی غیر از آنچه می‌خواهند توضیح دهند آغاز نشوند، قابل توجیه نیستند!

در این مقاله نشان می‌دهیم که مکانیک کوانتومی در واقع **بیان** می‌کند، قانون‌های حرکت نیوتون برای پیش‌بینی حرکت توپ‌های فوتبال و ماهواره‌ها به اندازه‌ی کافی مناسب هستند. برای نیوتون، قانون‌های بنیادی باید اصل می‌بودند، در حالی که برای ما نقطه‌های شروع هستند و در واقع، **پیامدهای** طرز کار بنیادی دنیای کوانتومی محسوب می‌شوند.

## اصل فرما: منشأ کلیدی ایده‌های کوانتومی

اپتیک هندسی، تشکیل تصویرها توسط پرتوهای نور را پیش‌بینی می‌کند. تصویرهای مربوط به بازتاب تصویرهای تشکیل شده با عینک‌ها و عدسی‌های دوربین، مثال‌هایی از این نوع تصویرها هستند. در تمام اپتیک هندسی، مسیر هر پرتو نور فقط با یک اصل مفرد قابل پیش‌بینی است: **بین چشمه و نقطه‌ی دریافت نور، در مسیری که دارای کوتاه‌ترین زمان ممکن است.** این اصل به نام **پیر دوفرمای**[3] (۱۶۶۵ ـ ۱۶۰۱)، اصل فرما نامیده می‌شود.

مثال ساده‌ای از اصل فرما، قانون بازتاب است: زاویه‌ی تابش و بازتابش برابرند. اصل فرما رفتار (طرز کار) عدسی‌ها را نیز

توضیح می‌دهد: عدسی، در مسیرهای متفاوت، دارای ضخامت‌های متفاوت است و بنابراین، هر پرتو برای طی مسیر از یک نقطه‌ی چشمه تا نقطه‌ی نظیر روی تصویر، **زمان** یکسانی را سپری می‌کند. اصل فرما توضیح می‌دهد، آینه‌ی خمیده در تلسکوپ چگونه کار می‌کند. آینه خمیده است، بنابراین هر مسیر برای رسیدن به کانون، زمانی یکسان با زمان سایر مسیرها را سپری می‌کند. در ادامه، این مثال‌ها و مثال‌های دیگر در کتاب‌های درسی فیزیک دانش‌آموزی بررسی می‌شوند [اوگبورن و وایت‌هاوس، ۲۰۰۰].

معاصران فرما ایرادی اساسی به این اصل می‌گرفتند، و این پرسش بنیادی را مطرح می‌کردند که: چگونه نور از پیش می‌داند، سریع‌ترین مسیر کدام است؟ پاسخ بسیار عمیق است و تنها در قرن بیستم بود که کاملاً به آن دست یافتند. ایده‌ی اساسی این است: **نور تمام مسیرهای ممکن بین گسیل تا دریافت را می‌کاود**. بعدها قاعده‌ی مشابهی برای حرکت ذرات اتمی مثل الکترون پیدا کردیم: ذره، **تمام مسیرهای ممکن** بین چشمه تا آشکارساز را می‌کاود. این ایده‌ی بنیادی در تدوین فرمولبندی مکانیک کوانتومی را، ریچارد فاینمن (۱۹۸۵) بسط داد.

ایده‌ی کاوش مسیرهای ممکن، دو پرسش جدی را مطرح می‌کرد: ۱. **معنی** کاویدن همه‌ی مسیرها چیست؟ ۲. چگونه می‌توان کاوش تمام مسیرها را با این واقعیت که چیزهای روزمره (مثل توپ فوتبال) و پرتوهای نور، مسیر یکتای معینی را دنبال می‌کنند، آشتی داد؟ پاسخ به این سؤال نیازمند شناخت پلی است که مکانیک کوانتومی را به مکانیک نیوتونی مرتبط می‌سازد.

## معنی کاوش تمام مسیرها چیست؟

فکر بررسی همه‌ی مسیرها، از ایده‌ها و موجک‌های کریستیان **هویگنس**[1] (۱۶۹۰) نشأت می‌گیرد. هویگنس انتشار جبهه‌ی موج را با درنظر گرفتن این‌که هر نقطه روی جبهه‌ی موج، یک موجک کروی ایجاد می‌کند، توضیح داد. سپس توانست نشان دهد که موجک‌ها، جبهه‌ی موج بعدی را تشکیل می‌دهند؛ بقیه‌ی اجزای جبهه‌ی موج که به جاهای دیگر می‌روند، اثر یکدیگر را خنثا می‌کنند. در سال ۱۸۱۹، **آگوستین فرنل**[2] که مهندس راه و ساختمان بود، بنیان ریاضی محکمی را برای این ایده به‌وجود آورد و با بهره‌گیری از آن، اثرهای پراش و تداخل اپتیکی را به‌دقت تبیین کرد.

در سال‌های دهه‌ی ۱۹۴۰، ریچارد فاینمن (با راهنمایی دیراک)، نظریه‌ی هویگنس را به عنوان مبنایی جدید برای فیزیک کوانتومی به کار برد که نقطه‌ی شروع آن کوانتوم نور، یعنی «فوتون» بود. دستور ساده‌ی طبیعت به فوتون این است: «**تمام مسیرها را بکاو!**» فوتون همه‌ی مسیرهای ممکن از چشمه تا آشکارساز را امتحان می‌کند. در هر مسیر ممکن، دارای یک تغییر فاز است. می‌توان تصور کرد، هر فوتون «زمان‌سنجی» دارد که عقربه‌های آن با بسامد کلاسیک نور می‌چرخند. چرخش با گسیل فوتون آغاز می‌شود؛ با ورود فوتون به آشکارساز، چرخش متوقف می‌شود. مکان نهایی عقربه‌ی زمان‌سنج، مسیر را مشخص می‌کند.

فوتون همه‌ی مسیرهای بین رویداد تابش تا فرایند آشکارسازی را می‌کاود. پیکان‌های همه‌ی مسیرها باید از سر به ته (یعنی با توجه به اختلاف فازها، درست همان‌طور که جبهه‌ها باید برهم نهاده شوند) با هم جمع شوند تا دامنه‌ی کوانتومی برایند کل (پیکان برایند)، برای یک رویداد به دست آید. پیکان برایند، گسیل فوتون را در یک مکان و زمان، و آشکارسازی آن را در مکان و زمان متفاوتی توصیف می‌کند. همین‌طور، قاعده‌هایی برای تغییر طول پیکان بر حسب فاصله وجود دارند که قانون عکس مجذور شدت با فاصله را به دست می‌دهند. برای سادگی، فقط مواردی را درنظر می‌گیریم که فاصله‌ها اندکی تغییر می‌کنند تا بتوان تغییرات طول و پیکان را نادیده گرفت.

پیکان برایند، احتمال رویداد را مشخص می‌کند. این احتمال با مجذور طول پیکان (که به خوبی به‌هنجار شده باشد)، متناسب است. بدین ترتیب، این نتیجه‌ی کلاسیک که شدت با مجذور دامنه‌ی موج متناسب است، حاصل می‌شود.

توصیف صریح و ساده‌ی فاینمن از رفتار کوانتومی فوتون را توضیح دادیم. در واقع، او ریاضیات جبهه‌ی موج هویگنس را بدون این فرض که آن‌ها موج هستند، در نظر می‌گیرد. به نظر هویگنس، موجک‌ها همه‌جا می‌روند، چون امواج چنین می‌کنند. به نظر فاینمن، فوتون‌ها همه جا می‌روند، چون این کاری است که فوتون‌ها می‌کنند.

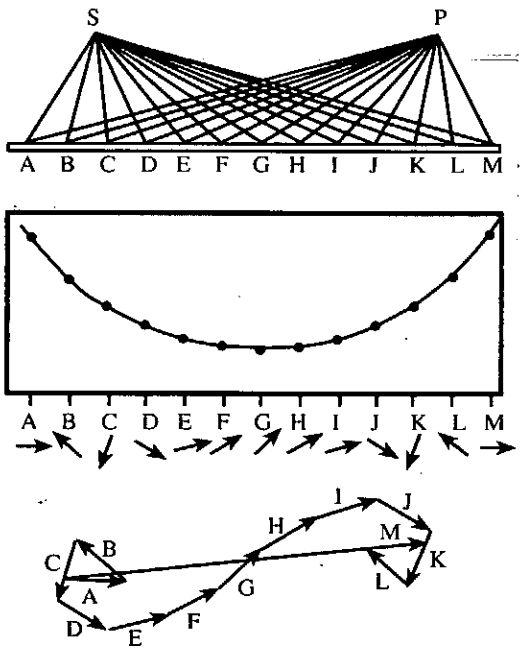
## پلی از فیزیک کوانتومی به فیزیک کلاسیک

پرسش بعدی این است: چگونه می‌توان این دستور طبیعت را که **همه‌ی مسیرها را بکاو!** با این مشاهده‌ی روزمره وفق داد که اجسامی چون توپ فوتبال یا پرتو نور، **یک مسیر** را می‌پیمایند؟

پاسخ کوتاه این است که **آن‌ها تنها در یک مسیر حرکت نمی‌کنند!** حد مشخصی بین اشیای روزمره و ذراتی که مسیرهای متفاوت را می‌کاوند، وجود ندارد. به هرحال، منظور شما از **اشیای روزمره** چیست؟ بسیاری از اشیا با گستره‌ی وسیعی از جرم‌ها و پیچیدگی‌های ساختاری، اجسام «روزمره» هستند. یک مثال تازه در این زمینه، تداخل مولکول‌های بزرگ فولرن کربن ۷۰ با جرم تقریبی ۸۴۰ پروتون است [www.quantum.at].

در واقع، رفتار کوانتومی به تدریج به رفتار کلاسیک نزدیک می‌شود. این بخش و بخش‌های بعد، گستره‌ی این نزدیک شدن را برای مشاهده‌های متفاوت نشان می‌دهند. در این فاصله، وقتی به اطراف خود نگاه می‌کنید، عمیقاً فکر کنید که چگونه توپ از راه مستقیم، مسیر پا تا گل را طی می‌کند. فوتون‌هایی که شما به‌وسیله‌ی آن‌ها دوست کنار خود را می‌بینید هم همین کار را می‌کنند!

ایده‌ی کلیدی برای فوتون‌هایی که از آینه باز می‌تابند، در شکل ۱ نشان داده شده است. آینه به صورت ذهنی به قطعه‌های کوچک تقسیم شده است. آینه‌های کوچک از A تا M علامت‌گذاری شده‌اند. پیکان‌های کوچک زیر هر بخش، نظیر عقربه‌ی زمان‌سنج در هنگامی است که پرتوی کوچکی از این بخش به نقطه‌ی مشاهده‌ی p می‌رسد. در قاب زیرین، پیکان‌های




شکل ۱. مسیرهای بسیار، بازتاب آینه را به حساب می‌آورند [از کتاب: فاینمن، ۱۹۸۵: ۴۳]. هر مسیری که نور بتواند بپیماید (در این وضعیت ساده شده) در بالا نشان داده شده است، همراه با نقطه‌ای روی منحنی پائین که زمان مورد نیاز برای رفتن فوتون از چشمه تا نقطه‌ای روی آینه و سپس، به طرف تکثیر کننده‌ی فوتونی را نشان می‌دهد. در پائین منحنی، جهت هر پیکان و در زیر آن، حاصل جمع همه‌ی پیکان‌ها مشاهده می‌شود. بدیهی است که طول نهایی پیکان اساساً ناشی از پیکان‌های E تا I است که تقریباً دارای جهت‌های یکسان هستند؛ زیرا زمان لازم برای طی مسیرها تقریباً یکسان است. این اتفاقاً در جایی است که زمان کمینه می‌شود. بنابراین تقریباً صحیح است که بگوییم نور مسیری را می‌پیماید که زمان لازم برای آن کمینه شود.

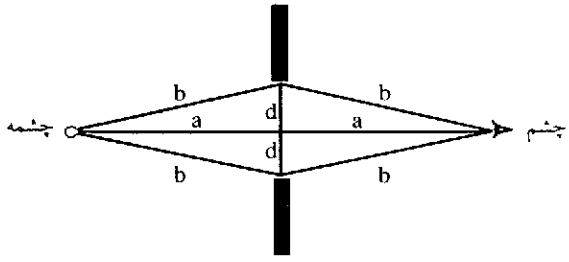
کوچک از سر به ته[۶] با هم جمع می‌شوند تا پیکان برایند بزرگ در نقطه‌ی p را پیش‌بینی کنند. مربع، اندازه‌ی این پیکان است که احتمال ورود فوتون به p را مشخص می‌کند. با توجه به اظهارنظر زیر شکل، پیکان‌های E تا I بیش‌ترین سهم را در پیکان برایند دارند، چون جهت‌های آن‌ها تقریباً با هم یکی است. پیکان‌ها از بخش‌های نزدیک به دو انتهای آینه، در جهت‌های بسیار متفاوت قرار دارند، بنابراین سهم ناشی از این بخش‌های انتهایی، هرگز چندان زیاد نمی‌شود. حتی اگر آینه‌ی AM را از هر دو طرف بسط دهیم تا درازتر شود، سهم ناشی از بازتاب از این بسط راست و چپ، در پیکان فرایند نهایی چیزی نمی‌شود. چرا؟ زیرا همه‌ی آن‌ها در دو انتها حتی بیش‌تر از پیکان‌های ABC و KLM، در قاب زیر شکل تاب برمی‌دارند. بیش‌ترین بخش پیکان برایند را بخش‌های کوچکی از پیکان‌ها تشکیل می‌دهند که «هم‌راستا» هستند و آن‌هایی که تاب برمی‌دارند، تقریباً سهمی ندارند.

حال می‌فهمیم چگونه همه‌ی مسیرها **را بکاو!** به گستره‌ی باریکی از مسیرها می‌انجامد که نقش بارزی در پیکان برایند p دارند. این گستره‌ی باریک باید نزدیک مسیر با کوتاه‌ترین زمان باشد، زیرا این همان جایی است که زمان و درنتیجه فاز، از مسیری به مسیر نزدیک آن به کندی تغییر می‌کند.

این پاسخی به منتقدان فرماست. آن‌ها می‌پرسیدند: «نور چه‌طور از پیش می‌داند کدام مسیر از همه سریع‌تر است؟» پاسخ چنین است: **فوتون قبلاً نمی‌داند**، بلکه تمام راه‌ها را امتحان می‌کند. با این همه، **فقط** مسیری که سریع‌ترین مسیر و از همه نزدیک‌تر است، بیش‌ترین سهم را در پیکان برایند دارد. و در نتیجه، مجذور اندازه‌ی آن، احتمال ورود فوتون به نقطه‌ی p است.

این پاسخ، بیش از یک پاسخ کوبنده‌ی دندان‌شکن است؛ زیرا فراتر می‌رود و نشان می‌دهد که خطای نظریه‌ی فرما چه‌قدر است. حال می‌توان پرسید: تا چه اندازه مسیرها حول یک مسیر کلاسیک پخش شده‌اند؟ برای درنظر گرفتن پهن‌ترین گستره‌ی ممکن برای مسیرهایی که به پیکان برایند می‌انجامند، نزدیک‌ترین پیکان‌ها به مرکز را بیابید که تقریباً در دو جهت مخالف پیکان‌های مرکزی G و H در شکل ۱ قرار دارند. پیکان‌های کوچک c و k تقریباً در جهت‌های مخالف G و H هستند. بنابراین، معیار سخاوتمندانه‌ی ما برای پیکان برایند به این صورت است: پیکان‌های کوچکی را بیابید که تقریباً در همان جهت پیکان برایند هستند. این‌ها را پیکان‌های مرکزی بنامید. گستره‌ی پیکان‌های حول پیکان‌های مرکزی که بیش‌ترین سهم را در برایند دارند، مربوط به پیکان‌هایی است که انحراف آن‌ها از جهت پیکان‌های مرکزی کم‌تر از نیم دور است.

برای مثال، فرض کنید که چشمه‌ی نور را از شکافی مشاهده کنید که در شکل ۲ نشان داده شده است. تعداد نامحدود راه‌های ممکن را به مسیرهایی محدود کنید که بین دو پاره‌خط مستقیم به طول مساوی بین چشم و چشمه قرار دارند. پهنای شکاف چه‌قدر باید باشد تا بیش‌تر نور چشم را که می‌بینیم، از چشمه منتقل کند؟ (پهنا در شکل ۲d است.)




شکل ۲. مسیرهای حدی در یک شکاف (به مقیاس رسم نشده است.)

عددها را می‌توان به سرعت به دست آورد. قضیه‌ی **فیثاغورس** را برای یکی از مثلث‌های قائم‌الزاویه‌ی abd در شکل به کار برید:

یا: $a^2 + d^2 = b^2$

$$d^2 = b^2 - a^2 = (b+a)(b-a) \approx 2a(b-a).$$

در گام آخر، فرض کردیم که طول a و b تقریباً مساوی است؛ یعنی، خطای چند درصدی ما با مساوی قرار دادن 2a با (b+a) به وجود می‌آید. با قرار دادن مقدارهای عددی این فرض را بررسی می‌کنیم.

معیار ما این است که اختلاف (b-a)2 بین راه‌ها، برابر نصف طول موج، یعنی مسافتی است که عقربه‌ی زمان‌سنج با طی آن، جهتش عکس می‌شود. فاصله‌ی بین شکاف و چشمه یا گیرنده را a=۱ متر در نظر بگیرید و از نور سبز با $\lambda = 600\,nm$ استفاده کنید. بنابراین:

$$d^2 \approx a\lambda/2 = 1 \times 300 \times 10^{-8}\,m^2$$

بنابراین، d تقریباً $5 \times 10^{-4}\,m$، و 2d، پهنای شکاف، تقریباً یک میلی‌متر است. ($b^2 = a^2 + d^2(1 + 3 \times 10^{-7})m^2$) را بررسی کنید تا فرض ما که $b + a \approx 2a$ بود، تأئید شود.)[۷]

## الکترون‌ها هم این کار را انجام می‌دهند!

در تحلیل‌های خود از بازتاب فوتون و تراگسیل مستقیم نور، فرض کردیم که عقربه‌ی زمان‌سنج فوتون با بسامد f موج کلاسیک می‌چرخد. اگر بخواهیم تحلیل مشابهی را برای الکترون یا ذره‌ی «معمولی» زیر میکروسکوپی دیگری به کار بریم، باید بسامد چرخش زمان‌سنج کوانتومی آن را بدانیم.

با این پرسش به انتها رسیده‌ایم: هیچ چیز اساسی‌تر از آن نیست که به این پرسش پاسخی دهیم که شالوده‌ی مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی باشد. این پاسخ، مبنای جدید فاینمن برای فیزیک کوانتومی را تشکیل می‌دهد. سپس با انتشار به طرف بالا، پلی را به وجود می‌آورد که به کمک آن مکانیک کوانتومی، مکانیک نیوتونی را توضیح می‌دهد.

بنابراین این همان پاسخ اساسی است: برای یک ذره‌ی «معمولی»، یک ذره‌ی دارای جرم، زمان‌سنج کوانتومی با فرکانس زیر می‌چرخد:

$$f = \frac{L}{h} = \frac{K - U}{h} \qquad (۲)\ (\text{ذرات غیرنسبیتی})$$

در این معادله، h کوانتوم مشهور کنش، ثابت پلانک است. L لاگرانژین نامیده می‌شود. برای ذرات منفردی که با سرعت‌های غیرنسبیتی حرکت می‌کنند، لاگرانژین با اختلاف K انرژی جنبشی و U انرژی پتانسیل تعریف می‌شود.

آیا این عجیب است؟ البته که عجیب است. به خاطر داشته باشید: تعاریفی که از جایی غیر از آنچه توصیف می‌کنند آغاز نشوند، قادر به توصیف نیستند! در معادله‌ی (۲)، برای یک ذره عجیب نبود و قبلاً آن را کشف کرده بودند. قدما مثل ما باهوش بودند، اما تجربه‌ی تحولات کند و بلندمدت نظریه‌ی فیزیکی رسیدن به این نتیجه را نداشتند. معادله‌ی (۲) اساس کار دنیای میکروسکوپی است: آن را بپذیرید و ارج بنهید!

برای الکترون آزاد، معادله‌ی (۲) به صورت زیر درمی‌آید:

$$f = \frac{U}{h} \qquad (۳)\ (\text{ذره‌ی آزاد غیرنسبیتی})$$

این بسیار شبیه معادله‌ی متناظر برای فوتون‌هاست:

$$f = \frac{E}{h} \qquad (\text{فوتون})$$

(البته شباهتِ تنها، چیزی را اثبات نمی‌کند.)

با فرض اساسی معادله‌ی (۲)، تمام تحلیل بالا درباره‌ی فوتون را می‌توان به رفتار الکترون تعمیم داد. می‌توان پرسید: «برای چه سرعتی الکترون آزاد دارای بسامد نور سبز است؟ بسامد نور سبز $f = \frac{c}{\lambda} = 0/5 \times 10^{15}\,Hz$ است. با معادله‌ی (۳) می‌توان نشان داد

که سرعت v چنین الکترونی تقریباً یک دهم سرعت نور، یعنی نزدیک مرز بین پدیده‌های غیرنسبیتی و نسبیتی است. انرژی این الکترون تقریباً $3\times10^{-16}$ J یا ۲۰۰۰ ev می‌شود که ولتاژ شتابدهنده‌ی متوسطی است، برای پروتون یا اتم هیدروژن جرم ۲۰۰۰ بار بزرگ‌تر، و سرعت با ریشه‌ی دوم این عدد، یعنی ضریب $\frac{1}{45}$ کم‌تر است. برای مولکول کربن ۷۰ که قبلاً ذکر شد، سرعت کم‌تر از یک کیلومتر در ثانیه، بسامد کوانتومی برابر نور سبز را می‌دهد.

برای ذرات با جرم بیش‌تر، بسامد کوانتومی در معادله‌ی (۳) بیش‌تر می‌شود و طول موج مؤثر کاهش می‌یابد. چون مقدار عددی کوانتوم کنش h بسیار کوچک است، گستره‌ی مسیرها در شکل ۲ به سرعت منقبض می‌شود و برای ذراتی با جرم بیش‌تر، مسیری می‌شود که در زندگی روزانه مشاهده می‌کنیم. می‌توان داستان تمام مسیرها را امتحان کنی! با داستان موج مقایسه کرد و طول موجی را برای یک الکترون در نظر گرفت (به پیوست مراجعه کنید). نتیجه، رابطه‌ی معروف دوبروی است:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

که به ما امکان می‌دهد تا گستره‌ی کوانتومی مسیر توپ فوتبال را تخمین بزنیم. مسیر مستقیمی را در نظر بگیرید با جرم نیم کیلوگرم و سرعت ۱۰ متر در ثانیه. بنابراین، طول موج از معادله‌ی (۴) تقریباً برابر است با:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \approx \frac{7\times10^{-34}\,Js}{0/5kg\times10\,ms^{-1}} \approx 10^{-34}\,m$$

پهنای شکاف لازم برای مسیر مستقیم چه‌قدر است؟ (شکل ۲) برای طول مسیر $2a = 20\,m$ معادله‌ی (۲) می‌دهد:

$$d^2 \approx 10^{-33}\,m^2$$

بنابراین، گستره‌ی عرض مؤثر مسیر با توجه به اثر کوانتومی برابر است با:

$$2d \sim 10^{-16}\,m$$

به عبارت دیگر، مرکز توپ فوتبال اساساً همان مسیری را طی می‌کند که از تجربه‌ی روزمره و قانون نیوتون به دست می‌آید.

## «تمام مسیرها را بکاو»، و اصل کم‌ترین کنش

معادله‌ی (۲) به اندازه‌ای مهم است که ارزش تکرار دارد:

$$f = \frac{L}{h} = \frac{K-U}{h}$$

این، معادله‌ی آهنگ چرخش پیکان کوانتومی در امتداد مسیر است. بنابراین، مجموع (انتگرال) $(\frac{L}{h})dt$ در امتداد مسیر، معادل تعداد کل دوران مسیر است. انتگرال Ldt دارای نام و تاریخ طولانی است. ریاضیدان ایرلندی، **ویلیام روان هامیلتون** (۱۸۶۵ـ۱۸۰۵)، این انتگرال را فرمولبندی کرد، و ما آن را **کنش** می‌نامیم. او نشان داد که مسیر کلاسیک بین دو نقطه‌ی ثابت در فضا و زمان، همواره مسیر دارای کم‌ترین (یا در هر صورت، مقدار ثابت) مقدار کنش است. او آن را **اصل کنش متغیر** نامید. بیش‌تر افراد امروزه آن را **اصل کم‌ترین کنش** می‌نامند؛ بدون نگرانی از این که گاهی کنش در نقطه‌ی زینی ثابت باقی می‌ماند. کنش روی یک مسیر، حاصل جمع مؤلفه‌های زیادی به صورت زیر است:

$$Ldt = (K-U)dt$$

کشف عمیق و مهم فاینمن این بود که می‌توانید مکانیک کوانتومی را بر پایه‌ی این فرض قرار دهید که L تقسیم بر کوانتوم کنش، سرعت چرخش پیکان کوانتومی را نشان می‌دهد. بنابراین، ما از این نقطه با فرمان کوانتومی بنیادی همه‌ی مسیرها را بکاو! کار را آغاز کردیم. سپس به حد کلاسیک رفتیم که در آن، همه‌ی مسیرها به یک مسیر منقبض شدند و فرمان کوانتومی به این صورت درآمد که مسیر با کم‌ترین کنش را دنبال کن!

## کم‌ترین کنش، قانون‌های حرکت نیوتون را توضیح می‌دهد

گذر به مکانیک نیوتونی را با نشان دادن، توضیحی به جای اثبات این که اصل کم‌ترین کنش مستقیماً به قانون دوم نیوتون: $F = \frac{dp}{dt}$ می‌انجامد، کامل می‌کنیم. راه ساده‌ای را برگزیده‌ایم که **هانک** و همکارانش (۲۰۰۳) ابداع کردند. حالت خاصی از حرکت یک بعدی را در نظر می‌گیریم که تابع انرژی پتانسیل بر حسب مکان، به صورت خطی تغییر می‌کند. توپ فوتبالی را در نظر بگیرید که در جهت عمودی y در نزدیک سطح زمین بالا و پائین می‌رود. بنابراین تابع انرژی پتانسیل u(y) با رابطه‌ی mgy داده می‌شود و لاگرانژین h می‌شود:

$$L = K - U = \frac{1}{2}mv^2 - mgy$$

با سرعت v و در امتداد y.

اکنون به شکل ۳ نگاه کنید که موقعیت عمودی مرکز توپ افتان و خیزان روند را بر حسب زمان به تصویر می‌کشد. این منحنی مکان ـ زمان را «جهانخط» می‌نامند. جهانخط از زمان و مکان

اولیه ـ رویداد اولیه‌ی پرتاب ـ آغاز می شود و تا رویداد نهایی برخورد گسترش می‌یابد. فرض کنید، جهانخط نشان داده شده در واقع خطی است که توپ فوتبال دنبال می کند. این بدان معناست که مقدار کنش در امتداد این جهانخط کم‌ترین است.

حال از ورزش رزمی علمی، برای انداختن سریع مسأله به خط ریاضی استفاده می کنیم. اگر کنش در طول کل جهانخط نسبت به جهانخط های مجاور کم‌ترین باشد، پس طول هر قطعه از آن جهانخط نسبت به جهانخط های مجاور، کم‌ترین خواهد بود. «وگرنه می‌توانستید تقلب کنید و انتگرال روی قسمتی از مسیر را کمی کم‌تر کنید» [فاینمن، ۱۹۶۴ : ۱۹ ـ ۱۸]. بنابراین، آنچه که ما باید انجام دهیم این است که مطمئن شویم، کنش روی هر قطعه‌ی کوچک اختیاری، کم‌ترین است.

قطعه‌ی کوچکی از جهانخط را در نظر می گیریم و موقعیت y، نقطه‌ی مرکزی آن را تغییر می دهیم و آن را به مقدار کوچک $\delta y$ بالا می بریم. سپس می خواهیم این جابه‌جایی، کنش را در طول قطعه‌ی موردنظر تغییر ندهد (نقطه های پایانی را ثابت نگه می داریم).

تغییر کنش را در دو قسمت A و B قطعه در نظر می گیریم؛ به طوری که در زمان یکسان، $\delta t$ صورت می گیرد. تغییر کنش برابر است با:

$$\delta S_{AB} = \delta S_A + \delta S_B = (\delta L_A + \delta L_B)\delta t.$$

چون $\delta t$ ثابت است، تنها تغییرات مهم مربوط به $\delta L_A$ و $\delta L_B$ هستند که عبارتند از:

$$\delta L_A = \delta(K_A - U_A), \delta L_B = \delta(K_B - U_B)$$

دوباره جمله ها را بازنویسی می کنیم تا جمع آن ها را به صورت زیر به دست آوریم:

$$\delta(L_A + L_B) = \delta(K_A + K_B) - \delta(U_A + U_B) \quad (۵)$$

تا مشاهده کنیم که چگونه دو مجموع $K_A + K_B$ و $U_A + U_B$ با جابه جایی مرکز جهانخط به اندازه $\delta y$ تغییر می کند. می خواهیم تغییرات برابر باشند، به طوری که تغییر کنش که حاصل ضرب اختلاف آن ها در بازه زمانی ثابت $\delta t$ است، صفر شود و می دانیم که کنش با وجود جابه‌جایی جهانخط بدون تغییر می ماند.

ابتدا قضیه‌ی انرژی پتانسیل را در نظر بگیرید. همان‌طور که شکل ۳ نشان می دهد، میانگین تغییرات y در هر دو قسمت A و B با توجه به جابه‌جایی $\delta y$ نقطه‌ی مرکزی، برابر $\frac{\delta y}{۲}$ است.

توپ فوتبال در هر دو قسمت جهانخط به اندازه‌ی $\frac{\delta y}{۲}$ بالاتر است. بنابراین تغییر کلی در انرژی پتانسیل برابر است با:

$$\delta(U_A + U_B) = mg\delta y \quad (۶)$$

بدین ترتیب، تغییر مجموع انرژی های پتانسیل، یعنی جمله‌ی دوم در معادله (۵) را داریم؛ یک حرکت آغازین که اولین حرکت در یک زورآزمایی آسان است.

با به دست آوردن جمله‌ی اول، در مجموع انرژی های جنبشی به چالاکی بیش‌تری نیاز دارند. تأثیر جابه‌جایی $\delta y$ در نقطه‌ی مرکزی جهانخط، سبب افزایش شیب جهانخط در قسمت A و کاهش آن در قسمت B می شود (به یاد داشته باشید که نقطه های انتهایی ثابت هستند). اما شیب‌دار بودن جهانخط (همچنین در نمودار y بر حسب t) درست سرعت v در جهت y است و این تغییرات در v، مطابق شکل ۳، برابر و در جهت مخالف هم هستند. در قسمت های A و B تغییر سرعت برابر است با:

$$\delta v_A = \frac{\delta y}{\delta t} \quad \delta v_B = -\frac{\delta y}{\partial t}$$

اما می خواهیم تغییر در انرژی جنبشی را بدانیم. چون $K = \frac{۱}{۲}mv^۲$ بنابراین برای تغییرات کوچک:

$$\delta K = mv\delta v = p\delta v$$

بنابراین، مجموع تغییرات در انرژی جنبشی را به صورت زیر به دست می آوریم:

$$\delta(K_A + K_B) = p_A\delta v_A + p_B\delta v_B$$

یا با به خاطر داشتن این که تغییرات در سرعت، مساوی و در جهت های مخالف هستند:

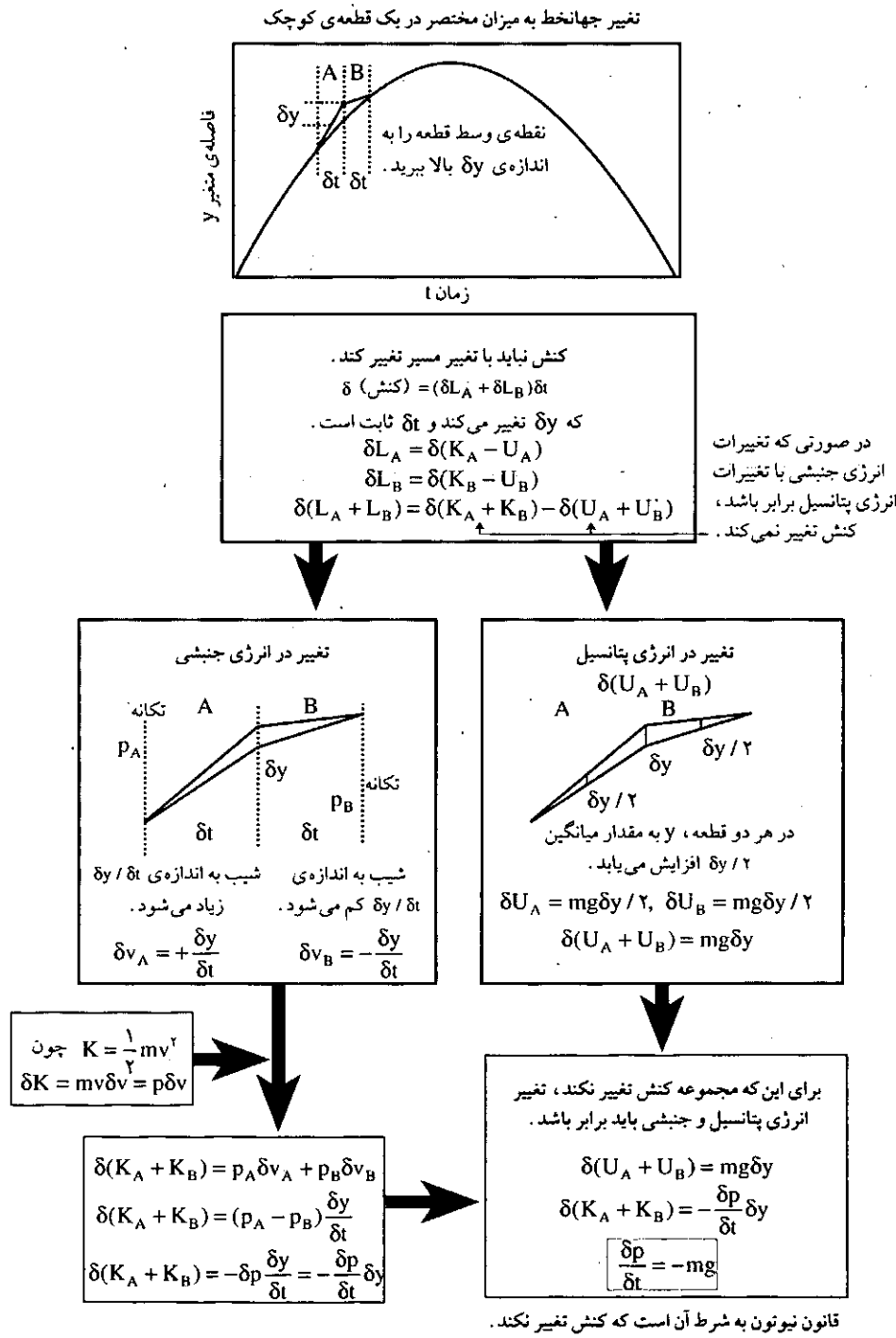
$$\delta(K_A + K_B) = (p_A - p_B)\frac{\delta y}{\delta t}$$

تغییر تکانه از قسمت A تا قسمت B از مسیر، برابر $\delta p = p_B - p_A$ است. بنابراین، تغییر کل در انرژی جنبشی که در معادله‌ی (۵) مورد نیاز بود، به راحتی به صورت زیر به دست می آید:

$$\delta(K_A + K_B) = -\frac{\delta p}{\delta t}\delta y \quad (۷)$$

حال برای آخرین حرکت روی تشک! معادله‌ی (۵) بیانگر آن است که اگر تغییر انرژی جنبشی (از معادله‌ی ۷) با تغییر انرژی پتانسیل (از معادله‌ی ۶) برابر باشد، اختلاف آن‌ها صفر می شود و کنش تغییری نمی کند (برای $\delta t$ ثابت). بنابراین، ما باید این دو را مساوی قرار دهیم تا وضعیتی بیابیم که در آن کنش تغییر نمی کند:

$$-\frac{\delta p}{\delta t}\delta y = mg\delta y$$




شکل ۳. از کم‌ترین کنش تا نیوتون

یعنی تغییر کنش در صورتی صفر است که:

$$\delta p / \delta t = -mg$$

در حالت خاص مورد نظر، mg نیروی گرانشی در جهت منفی رو به (پائین) است. در حد قطعه‌های کوچک، نتیجه به صورت زیر درمی‌آید:

(قانون دوم نیوتون)

$$F = \frac{dp}{dt}$$

کار تمام است: مشکل را پشت سر گذاشتیم! نیرو باید با آهنگ تغییر تکانه برابر باشد. قانون نیوتون پیامد اصل کم‌ترین کنش است که خود آن، پیامد فیزیک کوانتومی است.

در مورد تابع انرژی پتانسیل کلی‌تر چه می‌توان گفت؟ برای شروع می‌توان گفت، هر تابع انرژی پتانسیل واقعی برای نمو جابه‌جایی ذره‌ای کوچک، عملاً خطی است. با اصلاح رابطه‌های بالا می‌توان نشان داد که حالت کلی به رابطه‌ی زیر می‌انجامد:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{dp_y}{dt}$$

که $\frac{dU}{dy}$ عبارت کلی‌تر برای نیروست و ما شاخص y را به تکانه اضافه کردیم، چون حرکت در جهت بالا و پائین محور yها انجام می‌گرفت. برای حرکت سه‌بعدی، دو معادله‌ی مشابه اضافی وجود دارد: یکی برای راستای x و دیگری در راستای z (و اگر بخواهیم از نظر فنی نیز درست باشد، مشتق U نسبت به مختصه‌ی مورد نظر باید به مشتق جزئی تبدیل شود).

«داشتم می‌گفتم که قانون نیوتون را به دست می‌آوریم. این کاملاً صحیح نیست، چون قانون نیوتون شامل نیروهای ناپایستار، نظیر اصطکاک نیز می‌شود. نیوتون گفت که ma برابر با F است. اما اصل کم‌ترین کنش تنها در دستگاه‌های پایستاری به کار می‌رود که در آن‌ها، همه‌ی نیروها را می‌توان از یک تابع پتانسیل به‌دست آورد» [فاینمن، ۱۹۶۴: ۱۹ ـ ۷]. اصطکاک، انرژی مکانیکی سازمان‌یافته را به انرژی داخلی بی‌نظم تبدیل می‌سازد؛ در این مقاله در پی توجیه ترمودینامیک نیستیم!

## کلاسیک و کوانتومی

حال از جبر فاصله می‌گیریم و می‌کوشیم توضیح دهیم در سطح بنیادی چه اتفاقی می‌افتد. قانون نیوتون مسیری را مشخص می‌سازد که در آن، تغییر فاز ناشی از تغییرات انرژی جنبشی دقیقاً با تغییرات انرژی پتانسیل جور درمی‌آید. این دیدگاه، نظریه‌ی میدان کوانتومی جدید از نیروهاست: نیروها فازهای دامنه‌های کوانتومی را تغییر می‌دهند. ما در این جا آن را به صورت جزء به جزء مورد بررسی قرار می‌دهیم؛ آنچه که فیزیک نیوتونی به عنوان علت و معلول تلقی می‌کند (نیروست که شتاب را ایجاد می‌کند). دیدگاه کوانتومی، با «مسیرهای بسیار»، توازنی در تغییر فاز ناشی از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل را در نظر می‌گیرد.

پس سرانجام راه درازی را از عمیق‌ترین اصل مکانیک کوانتومی غیرنسبیتی ـ **همه‌ی مسیرها را بکاو!** ـ تا عمیق‌ترین قانون مکانیک کلاسیک در یک پتانسیل پایستار ـ مسیر **با کم‌ترین کنش را دنبال کن!** ـ پیموده‌ایم، و از آن‌جا به مکانیک کلاسیکی می‌رسیم که در دبیرستان تدریس می‌شود. باورهای قدیمی دنیای کلاسیک مستقیماً از حقایق جدید دنیای کوانتومی ناشی می‌شوند. بهتر از همه، اکنون می‌توانیم حدود دقت اصول کلاسیک قدیمی را براورد کنیم.

## حقیقت‌های نیم‌بندی را متذکر شده‌ایم

در این مقاله عمداً بر حقیقت نیم‌بند مهمی تأکید کردیم؛ این که هر موجود کوانتومی (فوتون، الکترون و غیره)، در اصل شبیه هر موجود کوانتومی دیگر است: یعنی، همگی از دستور بنیادی کوانتومی «**همه چیز را امتحان کن!**» پیروی می‌کنند! البته اگر الکترون‌ها به صورت یک گروه، درست مانند گروهی از فوتون‌ها رفتار می‌کردند، نه هیچ اتمی وجود داشت و نه عالم کنونی؛ یعنی کهکشان ما، زمین ما و نه مایی که این مقاله را می‌نویسیم یا می‌خوانیم.

«**همه چیز را امتحان کن!**» حقیقت نیم‌بندی برای توصیف حرکت یک فوتون یا یک الکترون است. از این نظر، دستوری بنیادی است. اما رفتار لیزرها و ساختار اتم‌ها به ترتیب به همکاری میان فوتون‌ها و همکاری بین الکترون‌ها وابسته است، و این همکاری بین الکترون‌ها و بین فوتون‌ها، بسیار متفاوت است. فوتون‌ها به گروه بوزون‌ها تعلق دارند، و الکترون‌ها متعلق به گروه فرمیون‌ها هستند. بوزون‌ها می‌خواهند در یک حالت جمع شوند؛ فرمیون‌ها از اشغال یک حالت یکسان اجتناب می‌کنند.

اگر دو ذره‌ی مشابه به حالت نهایی یکسانی بروند، از تبادل دو ذره نیز باید نتیجه‌ی یکسانی حاصل شود؛ یعنی پیامد تقارنی اتحاد. دستور **همه چیز را امتحان کن!** باید شامل «جمع پیکان‌ها

برای هر دو فرایند باشد.»

اگر ذرات بوزون باشند، پیکان‌ها یکسان هستند و جمع می‌شوند، و دامنه دو برابر می‌شود (و احتمال در چهار ضرب می‌شود). به طور خلاصه می‌توانیم بگوییم، فوتون‌ها «دوست دارند در یک حالت بمانند»؛ این دلیل عملکرد لیزرهاست (همین طور دلیل این که چرا جریانی از فوتون‌های با بسامد رادیویی را به صورت موج‌های رادیویی دریافت می‌کنیم).

اما اگر ذرات فرمیون باشند، بردارها با فاز مخالف با هم جمع می‌شوند. درنتیجه، دامنه‌ی موجود در حالت یکسان، صفر می‌شود. این همان دلیل است که سبب می‌شود، الکترون‌ها از اصل طرد پاؤلی پیروی کنند، و یا پاسخ به این سؤال است که چرا الکترون‌های یک اتم در حالت‌های متفاوت هستند. ساختار دنیای ما و مشاهده‌ی ما از آن، هر دو به این تفاوت بین گروه الکترون‌ها و گروه فوتون‌ها بستگی دارند.

## پیوست: طول موج دوبروی

در این جا نشان می‌دهیم که عبارت بنیادی $\frac{L}{h}$ برای آهنگ چرخش پیکان کوانتومی ذره‌ای که در یک مسیر منتشر می‌شود، با تقریبی مناسب به رابطه‌ی دوبروی $\lambda = \frac{h}{mv}$ می‌انجامد.

ذره‌ی آزادی را در نظر می‌گیریم با انرژی پتانسیل $U = ۰$ و $L = K = \frac{۱}{۲}mv^۲$.

آهنگ چرخش پیکان $= \frac{mv^۲}{۲h}$

در زمان t، تعداد چرخش‌های پیکان برابر است با:

تعداد دورها $n = \frac{mv^۲}{۲h}t$

یک طول موج نظیر مسافت x است که در آن، پیکان یک دور کامل می‌زند. بنابراین باید تعداد چرخش‌ها را به جای ۲ و t با x نشان دهیم. با استفاده از: $v = x / t$ خواهیم داشت:

تعداد دورها $n = \frac{mx^۲}{۲ht}$

اگر x بزرگ باشد و به مقدار جزئی $\delta x$ افزایش یابد، تعداد دورها با رابطه‌ی زیر افزایش می‌یابد:

$\delta n = \frac{mx\delta x}{ht}$ (جمله‌های $\delta x^۲$ را نادیده می‌گیریم.)

حال طول موج را وارد می‌کنیم. اگر $\lambda << x$، می‌توان گفت، وقتی $\delta x = \lambda$ باشد، $\delta n = ۱$ دور می‌شود. این یعنی:

$۱ = \frac{mx\lambda}{ht}$

با نوشتن $v = x / t$ و تغییر ترتیب، رابطه‌ی دوبروی به دست می‌آید:

$\lambda = \frac{h}{mv}$

زیرنویس:

1. Jon ogborn
2. Edwin F. Taylor
3. Pierre de Fermat
4. Christian Huygens
5. Augustin Fresnel

۶. روش جمع سهم‌ها را فرنل ابداع کرد. اگر آینه را بسیار پهن کنیم و آن را به هزاران قطعه‌ی کوچک قسمت کنیم، نمودار حاصل از ترکیب پیکان‌ها هموار می‌شود و به شکل مارپیچ کورنو درمی‌آید.

۷. سعی کنید، از شکاف بین دو انگشت خود که موازی و نزدیک هم در فاصله‌ی بازو از شما قرار دارند، به شیء نورانی نزدیک نگاه کنید. در فاصله‌ی یک میلی‌متری یا بیش‌تر انگشت‌ها از هم، شیء فقط نورانی به نظر می‌رسد. هنگامی که شکاف بین انگشت‌ها بسته شود، تصویر در نتیجه‌ی پراش پخش می‌شود. برای گستره‌ی باریک از مسیرهای متفاوت، اپتیک هندسی و قضیه‌ی فرما دیگر به کار نمی‌روند، اما قاعده‌ی جمع پیکان‌ها هنوز به کار می‌آید.


منبع:

Physics Education, January 2005, pp 26-34.

مراجع:

Feynman RP 1964 The *Feynman Lectures on Physics* vol. II (New York): Addison Wesley)

Feynman R P 1965 The *Character of Physical Law* (Cambridge, MA: MIT Press)

Feynman RP 1985 QED: *The Strange Story of Light and Matter* (London: Penguin)

Hanc J, Tuleja S and Hancova M 2003 Simple derivation of Newtonian mechanics from the principle of least action *Am. J. Phys.* 74 386-91

Huygens 1690 Traité de la Lumière facsimile edition (1966) (London: Dawsons of Pall Mall)

Ogborn J and Whitehouse M (eds) 2000 *Advancing Physics* AS (Bristol: Institute of Physics Publishing)

# شعبده‌بازی با فیزیک

و . مایر و ا . ماماوا*
مترجم : مرجان روح‌نواز

برای انجام این آزمایش به یک لوله‌ی آزمایش به طول ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر نیاز است که یک طرف آن مانند لوله‌ی پیپت باریک باشد . قطر دهانه‌ی بزرگ‌تر لوله ۸ تا ۱۲ میلی متر و دهانه‌ی کوچک‌تر آن باید حدود ۱ میلی‌متر قطر داشته باشد .

لوله‌ی آزمایش را بردارید و به اطرافیان خود نشان دهید . سپس قسمت باریک لوله‌ی شیشه‌ای را داخل یک لیوان آب گرم (دمای آب بین ۹۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس باشد) بگذارید تا لوله پر از آب شود . حال قسمت بالایی لوله را با انگشت خود مسدود کنید و لوله را از لیوان بیرون بیاورید . در این حال، حباب‌های هوایی را که بر دیواره‌ی انتهای لوله به‌وجود می‌آیند، سپس از دیواره‌ها جدا می شوند و به سوی بالای لوله حرکت می‌کنند، می‌توان دید . با این همه، آب داخل لوله باقی می‌ماند .

حال انگشت خود را از بالای لوله بردارید و به این ترتیب، آب لوله را داخل لیوان خالی کنید و لوله را قبل از برداشتن آب بیش‌تر، چند بار تکان دهید . بعد از برداشتن دوباره آب، مجدداً انگشت خود را بالای لوله بگذارید، لوله را به سرعت از لیوان بیرون بکشید و آن را وارونه کنید . در این حال، یک جریان قوی (پر فشار) آب به ارتفاع بیش از یک متر از لوله به بیرون می‌پاشد .

اطرافیان شما باید بتوانند توضیح دهند که چرا در قسمت اول آزمایش، آب از لوله خارج نمی‌شود . توضیح جریان پر فشار آب کمی پیچیده‌تر است : دمای آب لیوان حدود ۸۰ تا ۹۰ درجه‌ی سلسیوس است، درحالی‌که لوله همدما با دمای اتاق (حدود ۲۰°C) است . هنگامی که آب گرم از درون لیوان وارد لوله می‌شود، چون شیشه رسانای خوبی برای گرما نیست، هوای قسمت بالایی لوله در دمای اتاق باقی می‌ماند . اما زمانی که شما لوله را وارونه می‌کنید، آب گرم به سمت پائین جریان می‌یابد و هوا را به سرعت گرم می‌کند . در این حال، فشار هوا افزایش می‌یابد و هوای منبسط شده، بقیه‌ی آب را از قسمت باریک لوله به بیرون می‌پاشد .

دقت کنید که بین انجام آزمایش در نوبت‌های متفاوت لوله‌ی شیشه‌ای باید خوب سرد شود (حتی می‌توانید داخل آن بدمید) ؛ زیرا ارتفاع آب پرتاب شده به‌طور مشخص بستگی به اختلاف دمای آب و هوای داخل لوله دارد . مقدار مطلوب آب داخل لوله از $\frac{۱}{۴}$ تا $\frac{۱}{۳}$ حجم آن متغیر است (که به طور تجربی می‌توانید آن را تعیین کنید) .

زیرنویس :

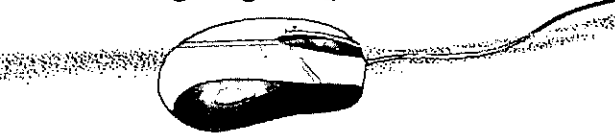
* V. Mayer & E. Mamaeva

منبع :

phy. in your kitchens lab
Publisher: Mir Publicatio

# روش‌های مشاهده‌گرا در آموزش فیزیک

بهروز خیراندیش، مرضیه رجب پور نیکنام و
زینب امین اخلاقی



**چکیده**

براساس نظریه‌ی هوش‌های چندگانه‌ی گاردنر، هوش‌های دیداری و حرکتی، نقش غالبی در آموزش دارند. حال آن‌که در نظام آموزش فعلی، مبتنی بر روش‌های شنیداری، مهجور است. روش‌های مشاهده‌گرا در آموزش را می‌توان در روش‌های پدیده‌شناختی فیزیکی، آزمایش‌های ساده و چالش‌زا، آزمایش‌های هزینه‌بر، فیلم، آزمایشگاه مجازی، انیمیشن و شبیه‌سازی خلاصه کرد. آزمایش عملی نشان می‌دهد، این روش باعث افزایش بهره‌وری آموزش، گسترش به دانش‌آموزان گوناگون، ایجاد فرصت‌های برابر آموزشی و... می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** آموزش فیزیک، پدیده‌شناسی، هوش چندگانه‌ی گاردنر، روش‌های مشاهده‌گرا، شبیه‌سازی.

## ۱. مقدمه

درحال حاضر، آموزش فیزیک در کشور معلم محور است. بنابراین، دانش‌آموزان از فرصت‌های برابر آموزشی کم‌بهره‌اند. حضور فناوری‌های نوین و پیشرفته نه تنها باعث جذابیت و افزایش بهره‌وری در آموزش می‌شود، بلکه مهم‌تر از آن، باعث پائین آمدن هزینه‌های آموزش و ایجاد فرصت‌های برابر آموزشی را در پی دارد. دبیران محترم به دلیل نظام آموزشی غالباً آموزش خود را مبتنی بر روش‌های سنتی شنیداری متمرکز می‌کنند. بنابراین از توانایی دیداری به صورت محدود و در حد دیدن متن یا تصویر استفاده می‌کنند. درحالی که می‌دانیم، یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین روش‌های آموزش، استفاده از روش‌های دیداری و مشاهده‌گراست. پیشرفت‌های گسترده در حوزه‌ی رسانه‌های تصویری، خود مؤید اهمیت این موضوع است. با بررسی دقیق نقطه‌های ضعف آموزش فیزیک در حوزه‌ی دبیرستان، متوجه نکته‌هایی می‌شویم که قابل تأمل هستند:

۱. نگرش عموم دانش‌آموزان به فیزیک، محدود به مسأله و کتاب

۲. بروز خلاقیت فیزیکی در مسأله، نه در پدیده‌شناسی

۳. نگرش به فیزیک به عنوان علمی نظری، نه علمی تجربی

۴. ارتباط نگرفتن دانش‌آموزان عملگرا با درس فیزیک، به‌دلیل برجسته بودن جنبه‌های نظری

به طور خلاصه می‌توان ضعف نظام آموزش فیزیک در کشور را با جمله‌ی نگاشته شده توسط دانش‌آموزی در کارگاه آموزشی جاذبه‌های فیزیک، در گردهمایی دانش‌آموزی فیزیک ایران (۱۳۸۴) مشاهده کرد و به عمق آن پی برد: «خدا را شکر که پس از ۱۱ سال پرداختن به حفظ کردن مطالب کتاب و تبدیل شدن

به پرونده‌ای که تنها
قادر به گردآوری و نگه داشتن
اطلاعات است؛ اما قادر به استفاده از آن‌ها
نیست، به همت کارگاه آموزش فیزیک، جاذبه‌های فیزیک... مغز متفکر و خلاق خود را که در انبار محفوظات در حال خاک خوردن بود، غبارروبی و آماده‌ی خلاقیت می‌کنم.»

در نظام آموزشی حاضر، دبیری موفق است که بتواند با بیان قوی، ابتدایی‌ترین روش یادگیری، یعنی شنیدن را در دانش‌آموز برانگیزد. وی مجبور است برای عمق بخشیدن به مطلب، مسائلی را به ناچار مطرح کند که ممکن است بسیار دور از ذهن دانش‌آموز باشد. ازطرف دیگر، نظام ارزشیابی تحصیلی که مبتنی بر آزمون‌های نظری یا کنکور است، به افزایش این نگرش کمک کند. حال آن که این بخش بسیار کوچکی از فیزیک است. به دلیل همین نگرش بخش مهم و عمده‌ی فیزیک، یعنی پدیده‌شناسی و نگرش تجربی، در آموزش بسیار مهجور است.

مشکل دیگر برای حضور دیدگاه مشاهده‌گرا در آموزش، تصور امکانات محوری در این روش است. درحالی که برخلاف این تصور، امکانات محوری عمدتاً در جایی مهم است که مشاهده‌ی کمی مورد نظر باشد. در پدیده‌شناسی یا آزمایش‌های کیفی و یا حتی آزمایش‌های کمی پرخطا! وجود امکانات پیشرفته و پرهزینه‌ی آزمایشگاهی ضرورتی ندارد؛ برای مثال، دیدن تصویر در قاشق و تحلیل آن، بررسی نحوه‌ی ذوب شدن یخ در آب پارچ و شکل عجیب آن، ساختن بالن و بررسی صعود و قانون‌های ارشمیدس، استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای و پویانمایی (انیمیشن) در آموزش و... بنابراین، برای گسترش و بسط نگرش فیزیکی به تجهیزات پرهزینه‌ی آمازیشگاهی نیاز نیست، بلکه می‌توان با طراحی آزمایش‌هایی ساده اما جذاب و چالش‌زا، ذهن دانش‌آموزان را به خدمت گرفت.

## ۲. فناوری آموزشی گاردنر

در کلاس درس متوجه شده‌ایم که به جز دانش‌آموزان فوق‌العاده باهوش، بیش‌تر دانش‌آموزان از ضریب هوشی تقریباً برابری برخوردارند. پرسش این جاست که چرا در یادگیری یکسان نیستند؟ در نظریه‌ی هوش‌های چندگانه‌ی گاردنر که مبتنی بر تحقیقات در زمینه‌ی هوش و استعداد انسانی و روش‌های یادگیری است، مغز انسان از لحاظ یادگیری از حس‌های گوناگون، به چند بخش تقسیم می‌شود. این بخش‌ها عبارتند از: هوش شنیداری، هوش دیداری، هوش حرکتی، هوش بویایی و هوش چشایی. هر انسانی باتوجه به ساختار ژنتیکی، سنی و محیطی، بیش‌تر فرایند یادگیری خود را از طریق ترکیبی از این هوش‌ها انجام می‌دهد.

بنابراین، در طبقه‌بندی افراد از لحاظ یادگیری، هوش‌های چندگانه‌ای طبق این نظریه داریم. همان‌طور که خود مشاهده کرده‌اید، برای بعضی از افراد، شنیدن، بخش غالب یادگیری آن‌هاست. بنابراین در نظام آموزشی حاضر که دانش‌آموزان شنونده هستند، یادگیری خوبی دارند. بعضی افراد هوش حرکتی خوبی دارند. از این‌رو، برای یادگیری باید حرکت داشته باشند و در یک محیط ساکن مانند محیط درس، یادگیری مناسبی ندارند. به همین ترتیب، افراد یک کلاس آموزشی را می‌توان از لحاظ یادگیری تقسیم‌بندی کرد. آن فناوری آموزشی موفق خواهد بود که قابلیت فعال‌سازی دانش‌آموزان بیش‌تری را در کلاس داشته باشد. قسمت عمده‌ی یادگیری افراد، هوش‌های دیداری و حرکتی است که در روش حاضر تدریس فراموش شده‌اند و امکان یادگیری، برای دانش‌آموزان باهوش در این هوش‌ها وجود ندارد. این موضوع، سبب ناکارامدی روش یادگیری فیزیک به عنوان یک علم تجربی در مدرسه‌ها شده است. حال آن که با روش‌های مشاهده‌گرا می‌توان این دانش‌آموزان را نیز با کلاس همراه کرد تا در روند یادگیری شرکت فعال داشته باشند.

## ۳. معرفی روش‌های مشاهده‌گرا

در روش‌های مشاهده‌گرا، اولویت در آموزش با حس دیداری دانش‌آموز است. روش‌های مشاهده‌گرا در آموزش فیزیک را می‌توان به صورت‌های زیر انجام داد:

### ۳ـ۱. پدیده‌شناسی

در این شیوه، اساس توجه دانش‌آموزان به پیرامون خود برای یافتن پدیده‌هایی است که با مباحث درسی در ارتباط باشند. در این حالت، زندگی به آزمایشگاهی سرشار از پدیده‌هایی جذاب تبدیل می‌شود. برای مثال، عموم دانش‌آموزان در مورد تعریف تصویر حقیقی و مجازی در آینه‌ها و نوع دیدن آن‌ها با مشکل روبه‌رو هستند. در همه‌ی مدرسه‌ها، آینه‌های کروی را به سادگی نمی‌توان یافت، اما می‌توان با یک قاشق که آینه‌ای غیرایده‌ال است، بسیاری از پرسش‌ها را در ذهن آن‌ها به وجود آورد و پاسخ گفت. پدیده‌ی پراش را می‌توان بدون لیزر و سیم نازک در اتاقی تاریک نیز بیان کرد؛ فقط با یک روسری! در این نگرش به زندگی، آزمایشگاه محقق می‌شود.

### ۳ـ۲. آزمایش ساده و چالش‌زا

وقتی صحبت از آزمایش به میان می‌آید، تصور ما لزوم آزمایشگاه و تجهیزات است، حال آن که نگرش امکانات محوری در آزمایش تا زمانی که بعد کمّی و دقت در آن کم اهمیت باشد، جایگاهی ندارد و می‌تواند با وسایلی بسیار ساده، آزمایشگاه ساخته

شود و یا آزمایش انجام گیرد. آیا فرما، دکارت، نیوتون و بزرگان علم همه در دوره‌ی تحصیل دانش‌آموزی خود، آزمایشگاه پیشرفته‌ای داشته‌اند؟ و یا مهم آن است که آزمایش چالش‌زا و به‌عمق بخشیدن فهم کمک کند؟ دانش‌آموز آزمایشگاه پرواز می‌سازد، صعود و فرود بالن، تخم‌مرغ و موشک کاغذی را بررسی می‌کند. آزمایشگاه نور می‌سازد و به بررسی حرکت نور در محلول آب و قند می‌پردازد. با محلول آب و صابون و چند طلق، به بررسی کشش سطحی می‌پردازد. در این شیوه، دانش‌آموز خود سازنده آزمایشگاهی و محقق آن است.

## ۳ـ۳. آزمایش‌های هزینه‌بر

در این شیوه، به دلیل اهمیت عدد و دقت و یا هزینه، تجهیزات و امکانات اهمیت زیادی دارند. ازطرف دیگر، ضرورتی برای شرکت همه‌ی دانش‌آموزان در این آزمایشگاه‌ها وجود ندارد. بنابراین، باید شرایطی برای دانش‌آموزان علاقه‌مند فراهم کرد تا بتوانند از این امکانات بهره‌مند شوند. به دلیل پرهزینه بودن آن‌ها. تأسیس پژوهش‌سرای دانش‌آموزی و فیزیک‌سراها می‌تواند در منطقه‌های آموزش و پرورش، باعث گسترش بیش‌تر این روش شود. یکی از عیب‌های کنونی اجرای آن، تعریف دانش‌آموز علاقه‌مند است که باید تغییر کند!

## ۴ـ۳. فیلم

در بسیاری موارد، ساخت آزمایشگاه‌ها با همه‌ی تجهیزات و آزمایش‌ها بسیار مشکل است. از طرف دیگر، خلاقیت ذهنی افراد در توسعه‌ی آزمایش‌ها نیز باهم تفاوت دارد. استفاده از این روش باعث گسترش دید و افزایش تجربه، به ویژه در مواردی می‌شود که امکان فراهم ساختن شرایط مشاهده‌ی کمی و یا کیفی ممکن نباشد. همچنین، هزینه‌ی انجام و پیاده کردن این روش بسیار اندک است و اغلب اوقات به دلیل تولید حرفه‌ای، از کیفیت بالایی برای نمایش جزئیات کار برخوردار نیست. هم‌اکنون بسیاری از مراکز آموزشی معتبر در دنیا فیلم‌های آزمایش‌های خود را به صورت نمایش روی سایت قرار داده‌اند. در این شیوه، دانش‌آموز از طریق مشاهده‌ی کار دیگران می‌تواند خود را در فضای آزمایشگاه مجهز آن‌ها قرار دهد.

## ۵ـ۳. آزمایشگاه مجازی

با گسترش فناوری رایانه در آموزش و به دلیل توانایی مهم این فناوری در توسعه‌ی فرصت برابر آموزش، آزمایشگاه‌های مجازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در این روش، بدون صرف هزینه‌های آزمایش فرد می‌تواند خود را در یک آزمایشگاه تصور کند و به انجام آزمایش و مشاهده‌ی نتیجه‌های آن بپردازد. هرچه آزمایشگاه اجازه‌ی بیش‌تری به بروز خلاقیت دانش‌آموز بدهد، او می‌تواند مشاهده‌های بیش‌تری بر پایه‌ی خلاقیت‌های فردی انجام دهد.

## ۶ـ۳. انیمیشن

با گسترش فنّاوری رایانه در آموزش و به دلیل توانایی مهم این فناوری در توسعه‌ی فرصت برابر آموزشی، فنّاوری انیمیشن نیز به‌دلیل ایجاد جذابیت آموزش، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این شیوه، بسیاری از پدیده‌ها و نکته‌های آموزشی را می‌توان در غالبی جذاب بیان کرد. باید توجه داشت، حضور گسترده‌ی جلوه‌های ویژه این فنّاوری در عرصه‌ی بازی‌های رایانه‌ای و فیلم‌ها نشان‌دهنده‌ی قدرت نفوذ و تأثیر آن در یادگیری است. بنابراین، استفاده از آن در آموزش می‌تواند نقش به‌سزایی داشته باشد.

## ۷ـ۳. شبیه‌سازی رایانه‌ای

با گسترش فنّاوری رایانه در آموزش و به دلیل توانایی مهم این فناوری در توسعه‌ی فرصت برابر آموزشی، فناوری شبیه‌سازی نیز به دلیل ایجاد جذابیت آموزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این روش با آموزش برنامه‌نویسی به دانش‌آموزان می‌توان زمینه‌ی توسعه‌ی یادگیری را در آن‌ها فراهم کرد. در صورت استفاده از نرم‌افزارهای ریاضی، می‌توان محدودیت‌های کاربردی ابزار ریاضی را برداشت و به دانش‌آموز، بدون درگیر کردن او با مفاهیم پیشرفته‌ی ریاضی، قدرت شبیه‌سازی داد.

## ۴. نتیجه

حضور فنّاوری ویژگی مهم روش‌های مشاهده‌گرا در مقایسه با روش مرسوم شنیداری است. برخلاف تصور، هزینه‌ی پائین آموزش، بهره‌وری بالا، ایجاد فرصت‌های برابر آموزشی، جذب دانش‌آموزان گوناگون و... از نتیجه‌های مهم این روش است. اجرای این طرح در دبیرستان‌های دانشگاه صنعتی شریف، صبا، روشنگر، یزدان‌پناه، علامه امینی، قدس و... و پژوهش‌سرای دانش‌آموزی دکتر حسابی و گردهمایی دانش‌آموزی فیزیک ایران در دانشگاه زابل (۱۳۸۴)، مثال‌هایی از حضور موفق این روش در آموزش فیزیک در مراکز آموزشی کشور است. سرمایه‌گذاری آموزش و پرورش و شبکه‌ی آموزش صدا و سیما می‌تواند، باعث گسترش این روش و افزایش ضریب نفوذ فیزیک، به عنوان علمی چالش‌برانگیز و خلاقیت‌زا در مراکز آموزشی شود.

# خطاهای رایج در فیزیک:
# بیش‌ترین X مربوط به کدام سوراخ است؟

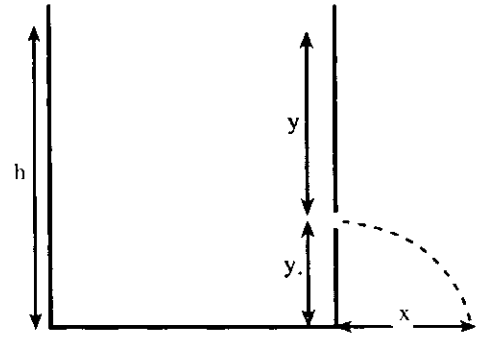
محمدرضا خوش بین خوش نظر
skhoshbin@yahoo.com

چندی پیش در جمع برخی از دبیران فیزیک بودم که یکی از دبیران با تعجب شرح داد وقتی آب از ظرفی استوانه‌ای که در سه ارتفاع سوراخ شده است خارج می‌شود، **برخلاف تصور** مسافت افقی آبی که از سوراخ میانی خارج می‌شود، از دو سوراخ دیگر بیش‌تر است. ولی پس از آن، این ترتیب به هم می‌خورد. بعداً متوجه شدم که این موضوع باعث تعجب دبیران دیگر نیز شده است؛ به طوری که متفق‌القول بیان کردند که بیش‌ترین مسافت افقی باید مربوط به سوراخ پائینی باشد. بعد که دلیل را جویا شدم، اشاره کردند که در کتاب‌های درسی نیز این موضوع به همین ترتیب بیان شده است. این مطلب برای من تعجب‌آور بود؛ چرا که در این مسأله، صرفاً سرعت خروج مایع که در سوراخ پایینی بیش‌تر است، نقش بازی نمی‌کند، بلکه ارتفاع از کف نیز دخالت دارد (از سایر اثرها، از جمله چسبندگی چشم‌پوشی کرده‌ام). چرا که ما در واقع حرکتی پرتابی با زاویه‌ی پرتاب $\theta_0 = 0$ داریم که برای آن، رابطه‌ی $y - y_0 = -gx^2 / 2v_0^2$ برقرار است. اگر از این رابطه x را به دست آوریم، به $(2v_0^2 y_0 / g)^{1/2}$ می‌رسیم که در آن $y_0$ ارتفاع از کف است. بنابراین در نقاط پائین‌تر، هرچند سرعت خروج مایع بیش‌تری داریم، ولی $y_0$ آن‌ها نیز کم‌تر است که امکان دارد، اثر دیگری را خنثا کند. همچنین، نقاط بالایی، هرچند $y_0$ بیش‌تری دارند، ولی دارای $v_0$ کم‌تری هستند. پس در این‌جا مسأله‌ای از حسابان و تعیین فرینگی (اکسترمم) خواهیم داشت. باید $v_0$ را طوری به $y_0$ ربط دهیم و سپس تابع x را نسبت به آن پارامتر کمینه کنیم.

پایستگی انرژی را بین بالای ظرف و خروج مایع می‌نویسیم. اگر h ارتفاع مایع ظرف باشد، $y_0 = h - y$ می‌شود و از آن‌جا خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mg(h - y_0)$$

و درنتیجه $v_0 = \sqrt{2g(h - y_0)}$ می‌شود. با قرار دادن آن در




معادله‌ی x به رابطه‌ی زیر می‌رسیم:

$$x = \left(\frac{2y_0}{g}\ \frac{2g(h-y_0)}{1}\right)^{\frac{1}{2}} = \left|4y_0(h-y_0)\right|^{\frac{1}{2}}$$

$$= 2(hy_0 - y_0^2)^{\frac{1}{2}}$$

و از آن‌جا $dx / dy_0$ را محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{dx}{dy_0} = \frac{[h-2y_0]}{[hy_0 - y_0^2]^{-1/2}} = 0 \Rightarrow y_0 = h/2$$

پس بیش‌ترین x یقیناً به ازای سوراخ میانی حاصل می‌شود. این که پس از مدتی بیشینه‌ی x مربوط به سوراخ دیگری می‌شود، به خاطر آن است که با خروج مایع، ارتفاع h مایع تغییر می‌کند و دیگر $h/2$ منطبق بر سوراخ میانی نخواهد بود. همچنین، سوراخ‌ها باید تا حد امکان ریز باشند تا آب خروجی پراکنده نشود. اگر سوراخ‌ها درشت باشند، پاشیدگی آب رخ می‌دهد و به خاطر این پاشیدگی ممکن است آب به اطراف پراکنده شود و باعث جابه‌جایی ظاهری xها شود. ولی حتی اگر در این حالت **مکان مرکز جرم** ذرات را محاسبه کنیم، باز درخواهیم یافت که $x_{cm}$ برای سوراخ میانی از همه بزرگ‌تر خواهد بود.

# مواظب یکاها باشید!

محمدرضا خوش بین خوش نظر

**این مقاله در واقع واگویی یکی از مسأله‌های ویرایش هفتم کتاب «مبانی فیزیک» و حل هم‌زمان آن، بدون بیان پرسش گونه است. جالب آنکه «جرل واکر» در مقدمه کتاب، به تنها مسئله‌ای که اشاره کرده است، همین مسئله بوده است.**

در درس فیزیک، همواره استاد از شما توقع دارد که در محاسبه‌های خود در مورد یکاها دقت نظر داشته باشید. با این حال، برخی از دانشجویان به این موضوع وقعی نمی‌نهند و کاملاً هم مطمئن هستند که همیشه محاسبه‌ها را به درستی انجام می‌دهند. شاید مثالی از یک اتفاق واقعی، شما را به اهمیت موضوع واقف سازد.

در ۲۳ جولای ۱۹۸۳، هنگامی که پرواز شماره‌ی ۱۴۳ خطوط هواپیمایی کانادا برای سفری طولانی از «مونترال» به «ادمونتون» آماده می‌شد، خدمه‌ی پرواز از کارکنان فرودگاه خواستند که مقدار سوخت داخل هواپیما را مشخص کنند. آن‌ها می‌دانستند که برای این سفر، به ۲۲۳۰۰ کیلوگرم سوخت نیاز دارند. مقدار سوخت را به کیلوگرم می‌دانستند، چون کشور کانادا به تازگی شروع به استفاده از یکاهای متریک کرده بود؛ درحالی که پیش از آن در کانادا مقدار سوخت برحسب پوند اندازه‌گیری می‌شد. کارکنان فرودگاه که مقدار سوخت داخل هواپیما را فقط برحسب لیتر می‌توانستند اندازه بگیرند، مقدار بنزین موجود در باک هواپیما را عدد ۷۶۸۲ لیتر گزارش کردند. حال، خدمه‌ی پرواز برای تعیین دقیق مقدار سوخت داخل هواپیما و این که به چه مقدار سوخت اضافی نیاز دارند، از کارکنان فرودگاه ضریب تبدیل لیتر به کیلوگرم را پرسیدند. پاسخ عدد ۱٫۷۷ ـ بدون هیچ توضیحی ـ بود که خدمه‌ی پرواز از آن استفاده کردند (۱٫۷۷kg معادل ۱L) و مقدار سوخت موجود در هواپیما را برابر با:

$$(7682\,L)(1.77\ kg/L) = 13597\ kg$$

اعلام کردند. (۱٫۷۷ را از آن رو داخل گیومه گذاشته‌ایم که ضریب تبدیل درستی نبود.)

بدین ترتیب خدمه‌ی پرواز فکر کردند که به $22300\,kg - 13597\,kg = 8703\,kg$ سوخت دیگر نیاز دارند که این مقدار باتوجه به ضریب تبدیل نادرست ۱٫۷۷، برحسب لیتر چنین می‌شد:

$$(8703\,kg)/(1.77\,kg/L) = 4917\,L$$

از آن‌جا که پاسخ کارکنان فرودگاه براساس یکاهای پیش از یکاهای متریک در کانادا بود ـ ۱٫۷۷ نه ضریب تبدیل لیتر به کیلوگرم، بلکه ضریب تبدیل لیتر به پوند بود (۱٫۷۷lb معادل با ۱L است)، پس در واقع سوخت موجود در هواپیما مقدار دیگری داشت. با توجه به این که: $1\,lb = 0.4536\,kg$، بنابراین $1.77\,lb/L$ تا چهار رقم با معنا برابر با $0.8028\,kg/L$ می‌شود. در نتیجه مقدار سوختی که واقعاً در هواپیما وجود داشت، برابر بود با:

$$(7682\,L)(0.8028\,kg/L) \approx 6167\,kg$$

یعنی خدمه‌ی پرواز باید درخواست $22300\,kg - 6167\,kg = 16133\,kg$ سوخت اضافی می‌کردند که این مقدار با توجه به ضریب تبدیل $0.8028\,kg/L$، برحسب لیتر چنین می‌شد:

$$(16133\,kg)/(0.8028\,kg/L) = 20095\,L$$

که این مقدار، ۱۵۱۷۸ لیتر بیش‌تر از مقداری است که خدمه‌ی پرواز درخواست کردند!

به هرحال، آن‌ها سفر خود را آغاز کردند، اما در مسیر ادمونتون، در ارتفاع ۷٫۹ کیلومتری از سطح زمین، سوخت هواپیما تمام شد و هواپیما در آستانه‌ی سقوط قرار گرفت. خوشبختانه خلبان توانست هواپیما را در وضعیت پرواز بدون موتور، رو به پائین هدایت کند و چون نزدیک‌ترین فرودگاه فعال بسیار دورتر از آن بود که هواپیما بتواند بدون نیروی موتور به آن‌جا برسد، خلبان مجبور شد، هواپیما را به سمت یک فرودگاه متروکه‌ی قدیمی هدایت کند.

اگرچه متأسفانه باند فرودگاه به پیست مسابقات اتومبیل‌رانی تبدیل و با نرده‌ی فولادی محدود شده بود، ولی خوشبختانه همین که هواپیما به باند برخورد کرد، جعبه دنده‌ی فرودی جلو فرو ریخت و دماغه‌ی هواپیما به باند فرودگاه اصابت کرد. بدین ترتیب، لغزش هواپیما کُند شد و کمی پیش از برخورد با نرده‌ی فولادی، درحالی متوقف شد که رانندگان اتومبیل‌ها و تماشاچیان آن‌ها، حیرت‌زده نظاره‌گر واقعه‌ای غیرمنتظره بودند. سرانجام خدمه‌ی پرواز و همه‌ی سرنشینان هواپیما جان سالم به در بردند، اما اگر آن‌ها دلیل این حادثه را می‌دانستند، حتماً با ما هم عقیده می‌شدند که: **مواظب یکاها باشید!**

مرجع:

Halliday, Resnick & Walker. Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons. 7th Edition. 2005.

مروری

# تله‌اندازی نوری

لیلا نوروزی

*در سال‌های اخیر، بخش بزرگی از تحقیقات دانشمندان به علوم و فنّاوری نانو اختصاص یافته است. این مطالعات به دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق نیازدارد. تله‌های نوری از مهم‌ترین این ابزارها محسوب می‌شوند. به ویژه در مورد مطالعه‌ی ذره‌های زیستی مثل سلول‌ها و ماکرومولکول‌ها، تله‌های نوری تحول چشمگیری ایجاد کرده‌اند. این تله‌ها با سرعت خوبی وارد دنیای فنّاوری و صنعت می‌شوند. در این‌جا مروری بر فیزیک تله‌های نوری و ایجاد آن‌ها داریم. سپس به دستاوردهای این ابزار اشاره‌ای خواهیم کرد.*

## ۱. مقدمه

نور ابزار قدرتمندی برای دستکاری اشیای میکروسکوپیک است. با آن می‌توان مکان و جهت‌گیری اشیایی به بزرگی ۱۰۰ میکرون و کوچک‌تر از یک اتم را کنترل کرد. امروزه، تکنیک‌های تله‌اندازی نوری و میکرودستکاری ذره‌ها با لیزر، روش منحصر به فردی برای کنترل دینامیک ذره‌های ریز فراهم کرده است. این روش‌های تجربی در زمینه‌های فیزیک، شیمی و علوم زیستی نقشی انقلابی دارند و اخیراً در فناوری و تولیدهای صنعتی و تجاری نیز از آن‌ها استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها براساس نیروهای فشار تابشی کار می‌کنند که از تکانه‌ی نور ناشی می‌شوند. به کمک آن‌ها می‌توان ذره‌های گوناگونی ازجمله اتم‌ها، مولکول‌های بزرگ، ویروس‌ها و حتی اجزای داخلی سلول‌ها را به تله انداخت و دستکاری کرد.

در نیمه‌ی اول قرن هفدهم، **یوهانس کپلر**، برای اولین بار فرضیه‌ای را پیشنهاد کرد که براساس آن، علت کشیدگی دم یک ستاره‌ی دنباله‌دار به طرف دور از خورشید، وجود نیرویی است که از طرف نور خورشید بر ذره‌های آن وارد می‌شود. در سال ۱۸۷۳، **جیمز کلارک ماکسول** در نظریه‌ی الکترومغناطیسی خود، به طور نظری وجود فشار تابشی را پیش‌بینی کرد. این نظریه سال‌ها بدون تأئید تجربی باقی ماند؛ زیرا مقدار نیروی ناشی از فشار تابشی حاصل از منابع نور معمولی، بسیار ناچیز و غیرقابل آشکارسازی است. تا این که در سال ۱۹۶۰، لیزر ابداع شد و توان بسیار زیاد لیزر نسبت به منابع نور معمولی باعث شد، مقدار این نیرو بیش‌تر و قابل آشکارسازی شود.

**آرتور آشکین** برای اولین بار در سال ۱۹۷۰، با تابانیدن نور لیزر بر یک ذره‌ی کروی پلی استیرن چند میکرومتری توانست، آن را جابه‌جا کند و حتی در مقابل نیروی گرانش به حالت معلق نگه دارد. در سال ۱۹۷۸، آشکین برای اولین بار تله‌ی تک باریکه‌ای گرادیانی را که انبرک نوری نامیده می‌شود ساخت و با آن توانست، ذرات زیستی را تله‌اندازی کند [Svoboda, 1994].

## ۲. فیزیک تله‌اندازی

همان‌طور که می‌دانیم، فوتون‌ها هم مانند ذره‌ها، حامل تکانه هستند:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

که $E = h\nu$ انرژی فوتونی با فرکانس $\nu$ و طول موج $\lambda$ است. این تکانه می‌تواند به ذره‌ها منتقل شود (که فشار تابشی[1] نامیده می‌شود). تکانه‌ی منتقل شده از لیزر به ذره، برای ذره‌های میکروسکوپیک، اثرات قابل ملاحظه‌ای دارد. یک باریکه‌ی لیزر کانونی شده[2] را می‌توان برای به دام انداختن ذره‌ها در یک چاه پتانسیل سه بعدی به کار برد.

توضیح نظری این موضوع به اندازه‌ی ذره‌ی به دام افتاده بستگی دارد. وقتی اندازه‌ی ذره خیلی بزرگ‌تر از طول موج نور باشد، یعنی: $d >> \lambda$ در «رژیم اپتیک هندسی» کار می‌کنیم. در این حالت، از اثرهای پراکندگی چشم‌پوشی می‌شود و نیروی به دام اندازنده را می‌توان با اپتیک هندسی توضیح داد. محدوده‌ی $d << \lambda$، «رژیم ریلی» نامیده می‌شود. در این حالت، توضیحی

براساس دوقطبی‌های الکترومغناطیسی مورد نیاز است.

## ۳. تله‌های نوری

تله‌ها را می‌توان براساس نیروی به کار گرفته شده در آن‌ها، به‌دو دسته تقسیم‌بندی کرد:

۱. تله‌هایی که براساس نیروی پراکندگی ساخته شده‌اند:

- تله‌ی تک باریکه‌ای
- تله‌ی دو باریکه‌ای

۲. تله‌هایی که براساس نیروی گرادیان ساخته شده‌اند:

- تله‌ی تک باریکه‌ای گرادیانی
- تله‌ی دوباریکه‌ای
- انواع گوناگون تله‌های دینامیکی، هولوگرافیک و...

در این جا به بررسی تله‌ی تک باریکه‌ای گرادیانی می‌پردازیم که مهم‌ترین آن‌هاست و بیش‌ترین کاربرد را دارد.

## ۴. ایجاد یک تله

متداول‌ترین تله‌ی نوری، تله‌ی تک باریکه‌ای گرادیانی است که «انبرک نوری»[۳] نامیده می‌شود. هر تله‌ی نوری از سه بخش تشکیل می‌شود:

۱. باریکه‌ی لیزر و دستگاه نوری که باریکه را روی نمونه کانونی کند.

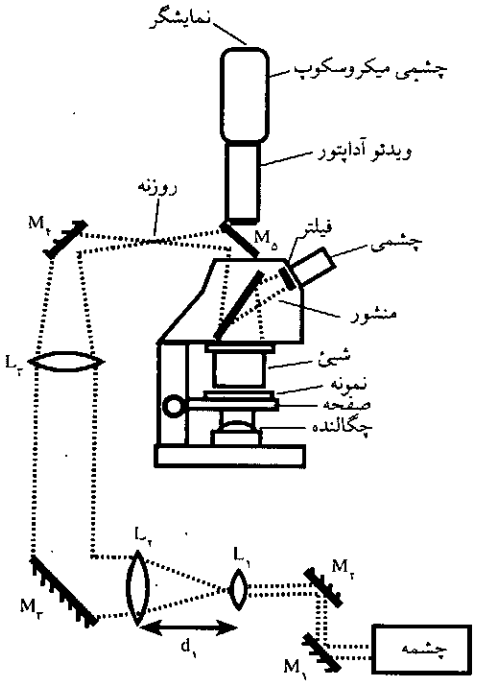
۲. دستگاهی برای مشاهده و تصویربرداری از نمونه.

۳. بخشی برای آشکارسازی و تحلیل اطلاعات.

### ۴-۱. انبرک تله‌اندازی

این بخش برای تبدیل باریکه‌ی تک مد لیزر به یک نقطه‌ی کانونی در محل نمونه با بزرگ‌ترین عمق تله است. بزرگ‌تر کردن عمق تله، معادل با بزرگ‌ترکردن $\Delta l$، گرادیان شدت است. بعداز انتخاب لیزر و میکروسکوپ، این عمق را می‌توان با تنظیم کردن اندازه و انحنای باریکه‌ی فرودی روی عدسی شیئی میکروسکوپ انجام داد. این کار را با دو آینه انجام می‌دهند. شکل ۱ طرح ساده‌ای از یک انبرک است. میکروسکوپ نور را کانونی می‌کند. برای بیشینه کردن گرادیان نور، باید گشودگی عددی عدسی (NA) بزرگ‌تر شود. باریکه باید تمام عدسی میکروسکوپ را بپوشاند. برای این کار می‌توان از دو عدسی و یا یک پهن‌کننده‌ی باریکه‌ی لیزر استفاده کرد. پوشیده شدن دهانه‌ی ورودی عدسی شیئی تضمین می‌کند که اندازه‌ی لکه‌ی کانونی کمینه شود.

$\Delta l$ را می‌توان با کاهش (پهنای لکه‌ی کانونی) $W_{trap}$ افزایش داد. ولی پراش، محدودیت اساسی برای اندازه‌ی لکه‌ی کانونی ایجاد می‌کند. برای یک عدسی آرمانی با فاصله‌ی کانونی f، یک باریکه‌ی لیزر با قطر باریکه‌ی D و طول موج $\lambda$، داریم:




شکل ۱. طرحی از دستگاه انبرک نوری

$$W_{trap} \geq \frac{1.22\lambda f}{2D} = \frac{1.22\lambda_0}{n}\sqrt{\left(\frac{n}{NA}\right)^2 - 1}$$

NA گشودگی عددی عدسی، n ضریب شکست محیط است.

برای یک عدسی مشخص، تله وقتی قوی‌تر است که قطر باریکه‌ی فرودی در شیئی تقریباً برابر با قطر شیئی باشد. ضمناً لیزر باید شعاع انحنای مناسبی در روی شیئی داشته باشد. عدسی $L_۴$ این کار را انجام می‌دهد.

### ۴-۲. سیستم برای دستکاری نمونه

لام و لامل میکروسکوپ، وسیله‌ی مناسبی برای گذاشتن ذره‌ی مورد نظر غوطه‌ور در محیط آبی است. معمولاً تله و نمونه باید نسبت به یکدیگر حرکت کنند. این کار به چند طریق ممکن است؛ یا باید نمونه را جا به جا کرد، یا نقطه‌ی کانونی را. بسته به نوع آزمایش روش‌های گوناگونی برای این کار وجود دارد. برای جابه‌جایی‌های بزرگ از صفحه‌ی میکروسکوپ استفاده می‌شود. ولی معمولاً برای جابه‌جایی‌های کم و دقیق، روش‌هایی خود نمونه را جابه جا می‌کنند.

### ۴-۳. تصویرسازی

برای انجام آزمایش‌ها ضروری است که ذره‌ی تله‌اندازی شده را مشاهده کنیم. می‌توان از همان شیئی تله، برای مشاهده‌ی ذره استفاده کرد. برای تصویرسازی می‌توان از همان روش معمول

تصویرسازی توسط میکروسکوپ استفاده و تصویر را از یک CCD یا چشمی میکروسکوپ مشاهده کرد.

راحت‌ترین راه آشکارسازی حرکت ذره، استفاده از یک فوتودیود چهار قسمتی در صفحه‌ی کانونی پشتی عدسی چگالنده است. گیتس و اشمیت [Gittes & Schmidt, 1997] برای این منظور روشی را ابداع کرده‌اند که از تداخل میان دو نور پراکنده شده از ذره‌ی تله‌اندازی شده و نوری که بدون پراکندگی عبور می‌کند، استفاده می‌کند. در این مدل، تغییرات شدت مربوط به جا به جایی ذره بررسی می‌شود. باریکه‌های پراکنده نشده و پراکنده شده با یک عدسی چگالنده با فاصله‌ی کانونی f هم‌خط می‌شوند و تداخل می‌کنند. وقتی ذره نسبت به تله حرکت می‌کند، در صفحه‌ی کانونی پشتی این لنز، توزیع شدت تداخلی تغییر می‌کند. این صفحه را روی یک دیود چهارقسمتی به نور تصویر حساس، و پاسخ سیگنالی دیود را دریافت می‌کنند. این روش آشکارسازی جا به جایی به «تداخل سنجی صفحه کانونی پشتی» معروف است. حالا اگر نیرویی معین را به ذره وارد کنیم و پاسخ سیگنالی دیود را اندازه بگیریم، می‌توانیم این وسیله را درجه‌بندی کنیم.

## ۳. درجه‌بندی

از آن‌جا که محاسبه‌های نظری برای هر ذره‌ی خاص و هر هندسه‌ی دام اندازنده‌ای، دقیق وقابل اعتماد نیستند، در هر آزمایش باید اندازه‌ی نیروها را به طور عملی اندازه گرفت. در بیش‌تر آزمایش‌ها، نیروها برحسب نیروی گرانروی[4] که توسط جریان یک شاره ایجاد می‌شود، درجه‌بندی می‌شوند. درجه‌بندی با این فرض انجام می‌گیرد که عدد رینولد برای ذره‌های میکرونی معمولاً کوچک است. بدین منظور، نمونه را که ذره‌ی تله‌اندازی شده در آن شناور است، با سرعت ثابت معین نسبت به محل تله حرکت می‌دهند. ذره به دلیل نیروی استوکس مربوط به شاره‌ی معین، به بیرون تله رانده خواهد شد.

وقتی یک مایع با وشکسانی $\eta$ و با سرعت $v$، در اطراف ذره‌هایی به قطر $d$ جریان می‌یابد، نیروی وارد بر ذره برابر است با:

$$F = 3\pi\eta dv$$

با دانستن $v$ نیروی وارد بر ذره مشخص می‌شود.

## ۴. چشم‌انداز

پس از گذشت دو دهه از اختراع اولین تله‌ی نوری توسط آشکین، اکنون تله‌اندازی نوری به یکی از زمینه‌های وسیع تحقیقاتی در علم تبدیل شده است. تله‌های نوری کاربردهای فراوانی در فیزیک، زیست‌شناسی و اخیراً در صنعت و فناوری دارند. تحقیقات در این مورد در دو راستا در حال انجام است؛ یکی در مورد ایجاد تله‌های نوری جدید و بهبود کیفیت تله‌اندازی و نیز بالابردن دقت اعمال نیرو و روش‌های آشکارسازی، و دیگری، در زمینه‌ی انجام آزمایش‌های گوناگون توسط تله‌های نوری.

اکنون تله‌های نوری را می‌توان در سه راستا کنترل کرد و جابه‌جایی‌هایی در اندازه‌ی چند نانومتر را اندازه گرفت و نیروهایی در اندازه‌ی fN ۱۰۰ را اعمال کرد و اندازه گرفت. با انبرک‌های نوری چندتایی که توسط هولوگرام‌هایی که با رایانه ساخته می‌شوند، ایجاد می‌شوند، می‌توان آرایه‌ای از انبرک‌های نوری را در حجمی مشخص ایجاد کرد که هرکدام از این تله‌ها به طور مستقل از بقیه قابل کنترل هستند. اخیراً گردابه‌های اپتیکی ساخته شده‌اند که توانایی وارد کردن گشتاور نیرو را نیز دارند. کش‌آورهای اپتیکی نیز از جدیدترین تله‌های نوری هستند.

در فیزیک زیستی و زیست‌شناسی مولکولی، انبرک‌های نوری از مهم‌ترین ابزار تحقیقاتی هستند. با استفاده از تله‌های نوری اطلاعات زیادی در مورد مکانیک، تولید نیرو و حرکت موتورهای مولکولی و مکانوآنزیم‌ها به دست آمده است.

مطالعه‌ی خواص کشسانی و پیچش DNAها و دیگر مولکول‌های بزرگ و نیز بررسی خواص کشسانی غشاها و سلول‌ها، توسط انبرک‌های نوری انجام می‌گیرد. به کمک انبرک‌های نوری پیشرفت زیادی در مطالعه‌ی ذرات کلوئیدی حاصل شده و خواصی نظیر جذب غیرعادی ذرات با بارهای ناهم‌نام کشف شده است.

توسط این ابزار می‌توان مواد مزوسکوپیک را با کنترل تک تک اتم‌ها ایجاد کرد. در ساخت فوتونیک بلورها از آن‌ها بهره گرفته شده است. انبرک‌های نوری یکی از ابزارهای مهم در بحث نانوتکنولوژی هستند و کاربرد روزافزون آن را در این حیطه می‌بینیم. در ایران نیز در مرکز تحصیلات تکمیلی، انبرک نوری بسیار دقیقی ساخته شده است که توانایی انجام آزمایش‌های گوناگون را دارد و به زودی آماده‌ی ارائه‌ی خدمات به مراکز تحقیقاتی کشور خواهد بود.

زیرنویس:

1. radiation pressure
2. focused
3. Optical tweezer
4. viscose drag


مراجع:

1. Svoboda, Block S. M. (1994). Biological Aplication of optical forces. Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struc. 23.
2. Ashkin A. (1992). Forces of a single-beam gradient laser trao on a dielectric sphere in the ray optics regime. Biophys. J. 61.
3. Ashkin A. (2000). History of optical trapping and manipulation of small-neutral particles and molecules. IEEE J. 6.
4. Gittes F., Schmidt. C. F. (1997). Interference model for Back focal plane displacement detection in optical tweezers. Optics Letter. 23.

آموزشی

# رویکردی دیگر به معادله‌های سینماتیکی

حسن علیمحمدی

**چکیده**

در این مقاله، ارائه‌ی یک روش اجراشده، چگونگی تدریس معادله‌های حرکت یکنواخت و حرکت شتابدار ثابت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بیان خواهد شد. در این میان، نمودار مکان ـ زمان بررسی، و شیب خط به عنوان مقدار سرعت بیان می‌شود. همین‌طور، سرعت لحظه‌ای با استفاده از تعریف آن به صورت سرعت متوسط در بازه‌های بسیار بسیار کوچک، محاسبه، و نمودار سرعت زمان برای حرکت یکنواخت و شتابدار ثابت رسم می‌شود. سپس با استفاده از معادلات برازش منحنی، مقدار شتاب حرکت به دست می‌آید.

**کلیدواژه‌ها:** نمودار مکان زمان، نمودار سرعت زمان، معادله‌ی حرکت یکنواخت، معادله‌ی حرکت شتابدار ثابت.

**مقدمه**

اهمیت مکانیک بین دیگر مباحث فیزیک کلاسیک بر کسی پوشیده نیست. از این روست که مطالعه‌ی رسمی فیزیک در هر مقطع با مکانیک آغاز می‌شود. این موضوع شاید ریشه در تاریخ علم داشته باشد. چرا که حرکت در زمره‌ی اولین پدیده‌هایی بود که انسان با آن آشنا شد. از این روست که بنا بر گفته‌ی **گالیله**: «کسی که حرکت را نمی‌شناسد، طبیعت را نمی‌شناسد.» در سال دوم آموزش فیزیک، به طور جدی با مبحث مشاهده، به عنوان پایه و اساس علوم تجربی و اندازه‌گیری و آزمایش و نیز اساس علوم تجربی آزمایشی روبه رو می‌شویم که در آن‌ها قابلیت انجام مشاهده‌ی کنترل شده وجود دارد. اما آنچه جای تأمل دارد، این است که کتاب درسی بیش‌تر درگیر روش‌های ریاضی در فیزیک می‌شود و برخلاف عنوان کتاب ـ فیزیک و آزمایشگاه ـ مشاهده‌ی کنترل شده با همان آزمایش را زیاد جدی نمی‌گیرد و در نهایت، آزمایش به عنوان زائده‌ای مطرح می‌شود که بود و نبود آن تفاوت زیادی ندارد.

در این مقاله سعی بر آن است که حرکت‌های سرعت ثابت و سرعت متغیر، به طور تجربی و با طراحی یک روش آزمایشگاهی مطالعه و کمّی‌سازی شوند و سپس با استفاده از دانسته‌های ریاضی دانش‌آموز درباره‌ی نمودارهای درجه‌ی اول و درجه‌ی دوم (خط و سهمی) و با لحاظ کردن تقریب‌هایی، معادله‌های حرکت با سرعت ثابت و سرعت متغیر به دست آیند. کتاب درسی فیزیک ۲ و آزمایشگاه، معادله‌ی حرکت یکنواخت را از تعریف سرعت متوسط به دست می‌آورد و درباره‌ی معادله‌ی حرکت شتابدار ثابت نیز از رابطه‌ی سرعت متوسط در حرکت شتابدار ثابت ـ که اثبات آن را به جای دیگری موکول کرده ـ استفاده کرده است [۱].

**بحث**

تجربه‌ی انجام شده به دو قسمت جداگانه تقسیم شده و در ادامه آمده است.

## الف) پدیده‌ی سرعت ثابت در طبیعت

کتاب دوره‌ی درسی فیزیک مثالی دارد که در آن از سوختن فتیله‌ی کندسوز (بیک فورد) به عنوان پدیده‌ای با سرعت ثابت یاد می‌کند [۲]. همین ایده سبب شد تا این پدیده مورد بررسی قرار گیرد. پس از مدتی، سوزاندن چند تکه نخ، سوختن تکه‌ای کاغذ مورد توجه قرار گرفت. با تمرکز روی این موضوع و بررسی دقیق به این نتیجه رسیدیم که یک نوار کاغذی با پهنای تقریباً ۱ سانتی‌متر، نمونه‌ی مناسبی برای انجام این آزمایش و بررسی حرکت یکنواخت است.

ذکر این نکته ضروری است که فرایند طراحی و به نتیجه رسیدن این آزمایش برای خود معلمان بار مثبت آموزشی داشته است. طرفه این که چندی بعد، در مجله‌ی «رشد آموزش فیزیک» مقاله‌ای توجهمان را برانگیخت که خود فرایند طراحی آزمایش ـ البته پس از طراحی دقیق توسط معلم ـ به عنوان یک بحث کلاسی، نتیجه‌ی مؤثری در فهم مطلب و استفاده‌ی بهینه در جهت رسیدن به هدف آزمایش دارد [۳]. دستور کار دانش‌آموز و گردآوری داده‌ها به قرار زیر است:

## ۱ . آزمایش (بررسی سرعت شعله ی نوار کاغذی)

در این آزمایش، بررسی دقیقی روی شعله ی نوار کاغذی انجام خواهد شد و دانش‌آموزان با تحلیل داده‌ها، مطالبی درباره ی سرعت متحرک (در این جا شعله) خواهد آموخت. در زیر شرح مختصری از روند کلی انجام کار آورده شده است و پس از آن، به بررسی داده‌ها خواهیم پرداخت.

**وسایل لازم:** نوار کاغذی، پایه ی فلزی، کبریت، زمان‌سنج، خط کش و چسب نواری.

## ۲ . روش کار

- چند نوار کاغذی به طول ۳۰ و عرض ۱ سانتی‌متر آماده کنید و روی هر نوار بازه‌های ۳ سانتی‌متری را علامت بگذارید.
- نوار اول را به لبه ی پایه ی فلزی موجود بچسبانید.
- لبه ی دیگر نوار را آتش بزنید و زمان رسیدن شعله به علامت‌ها را در جدولی ثبت کنید.
- همین کار را برای نوارهای بعدی تکرار، و اعداد را در ستون‌های مربوطه ثبت کنید.

### پرسش

ـ مدت زمان رسیدن شعله از لبه ی کاغذ به علامت اول در هر نوار چه قدر است؟

ـ زمان لازم برای رسیدن شعله از علامت اول به دوم (زمانی که شعله بازه اول را طی می‌کند) چه قدر است؟

اندازه‌گیری‌ها و پاسخ به پرسش‌های بالا، ما را به داده‌های جدول ۱ رهنمون می‌کند.

انجام آزمایش روی چند نوار برای این است که میزان خطا کاهش یابد. بدیهی است هرچه تعداد نوارها افزایش یابد، عددهای دقیق‌تری خواهیم داشت. اما میانگین زمان‌های بالا با در نظر گرفتن بازه‌های مکانی به صورت جدول ۲ است و نمودار مکان ـ زمان این حرکت به صورت نمودار ۱ می‌شود.

باتوجه به تعریف سرعت متوسط، می‌توان در هر بازه ی ۳ سانتی‌متری، سرعت شعله را به دست آورد. جدول سرعت‌ها در هر بازه که می‌توان آن را با تقریب خوبی سرعت در لحظه‌ای به حساب آورد که شعله به علامت سر بازه رسیده است، به صورت جدول ۳ و نمودار سرعت زمان به صورت نمودار ۲ می‌شود.

اگر این نمودار را در بازه ی وسیع‌تری نسبت به بازه ی ۰/۳۶ تا ۰/۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه رسم کنیم، به نمودار ۳ می‌رسیم.

نکته ی جالب توجه در نمودار بالا این است که عرض از مبدأ آن برابر ۰/۳۸ است. این همان سرعت، یعنی شیب نمودار مکان زمان است. همین طور، شیب نمودار بالا تقریباً صفر است. باتوجه به نمودارهای بالا و بحث روی آن‌ها، به راحتی می‌توان از داده‌های آزمایشگاهی و به عبارت بهتر یک مشاهده ی تجربی، معادله‌های حرکت یکنواخت را به دست آورد. در ضمن، بحث درباره ی قسمت‌های متفاوت نمودار و جنبه‌های گوناگون آزمایش در کلاس درس بسیار مفید خواهد بود.

## ب) پدیده ی شتاب ثابت

## ۱ . آزمایش (شتاب سقوط یک وزنه ی افتان)

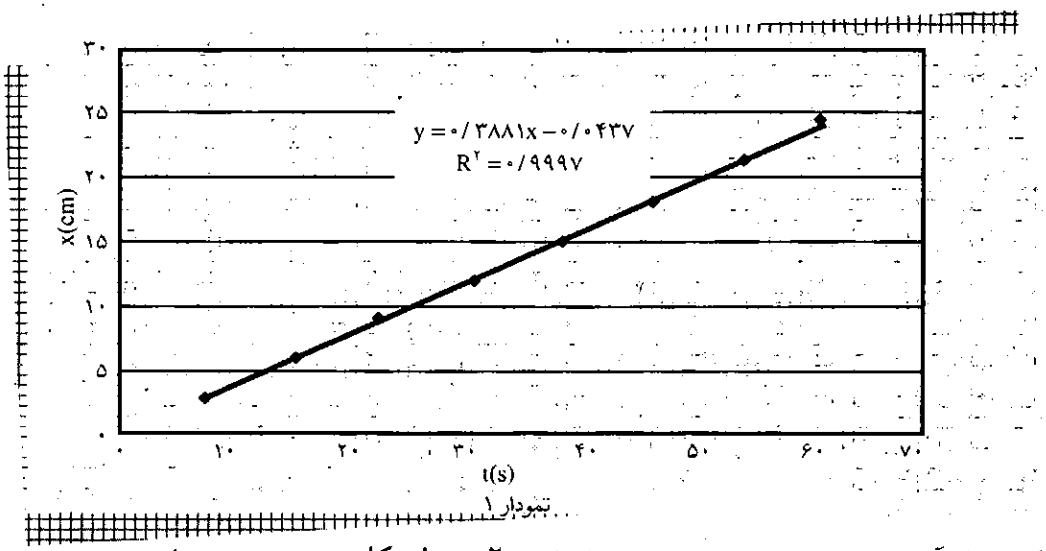
در این آزمایش حرکت یک وزنه با استفاده از ضربه زدن ۰/۰۱ ثانیه (زنگ اخبار معمولی با کمی تغییرات) بررسی می‌شود. با انجام آن، دانش‌آموز با کاربرد و قدرت نمودار مکان ـ زمان در بررسی

| لحظه ی رسیدن شعله به علامت / شماره ی نوار | اول | دوم | سوم | چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۶ | ۱۳ | ۲۰ | ۲۸ | ۳۵ | ۴۲ | ۵۰ | ۵۷ |
| ۲ | ۷ | ۱۵ | ۲۲ | ۲۹ | ۳۷ | ۴۵ | ۵۲ | ۵۹ |
| ۳ | ۹ | ۱۷ | ۲۵ | ۳۳ | ۴۱ | ۴۸ | ۵۶ | ۶۳ |
| ۴ | ۹ | ۱۸ | ۲۷ | ۳۶ | ۴۴ | ۵۳ | ۶۱ | ۶۸ |

جدول ۱

| مکان | ۳ | ۶ | ۹ | ۱۲ | ۱۵ | ۱۸ | ۲۱ | ۲۴ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زمان | ۷/۷ | ۱۵/۷ | ۲۳ | ۳۱/۲ | ۳۹ | ۴۶/۹ | ۵۴/۵ | ۶۱/۳ |

جدول ۲



نمودار ۱

حرکت یک متحرک آشنا خواهد شد. شرح مختصری از روند انجام آزمایش در زیر آورده شده است و پس از آن به بررسی داده‌ها خواهیم پرداخت.

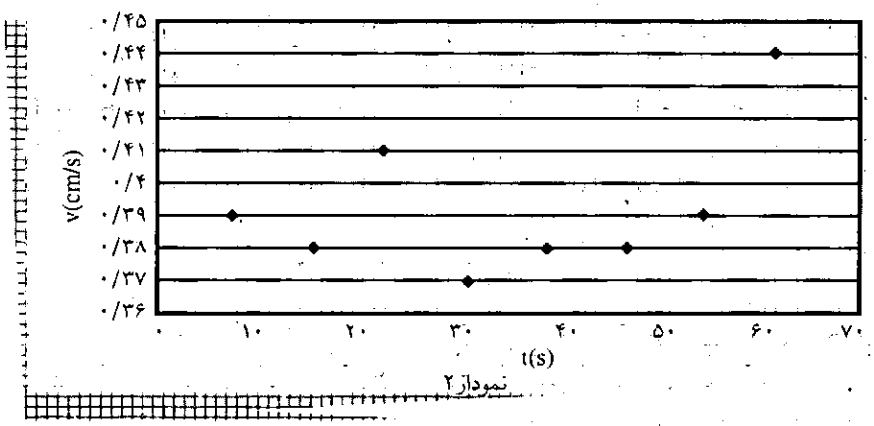
**وسایل لازم:** زنگ اخبار و سیم‌های اتصال، نخ، نوار کاغذی، کاربن، وزنه وقرقره‌ی فکی.

## ۲. روش کار

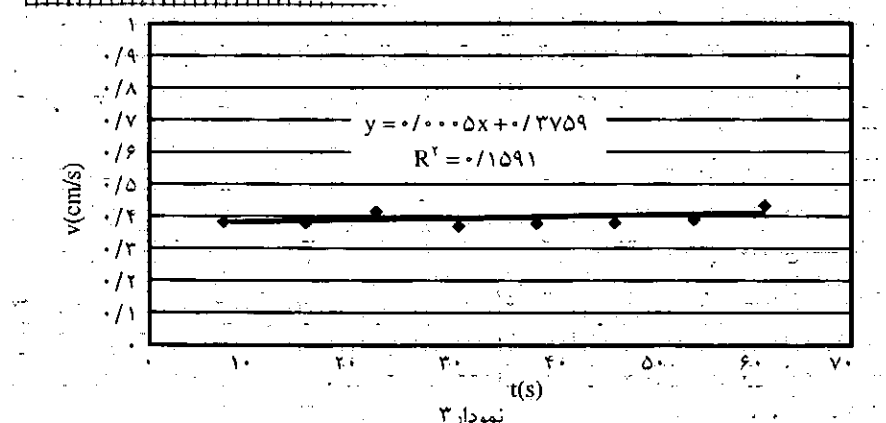
- یک نوار کاغذی به طول ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۳ سانتی‌متر، و همچنین یک نوار از کاغذ کاربن به همین ابعاد بسازید و آن‌ها را طوری به هم متصل کنید که ضربه‌ی روی کاغذ مشخص شود.
- ابتدای نوار را با نخ به وزنه متصل کنید.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سرعت | ۰/۳۹ | ۰/۳۸ | ۰/۴۱ | ۰/۳۷ | ۰/۳۸ | ۰/۳۸ | ۰/۳۹ | ۰/۴۴ |
| زمان | ۷/۷ | ۱۵/۷ | ۲۳ | ۳۱/۲ | ۳۹ | ۴۶/۹ | ۵۴/۵ | ۶۱/۳ |

جدول ۳



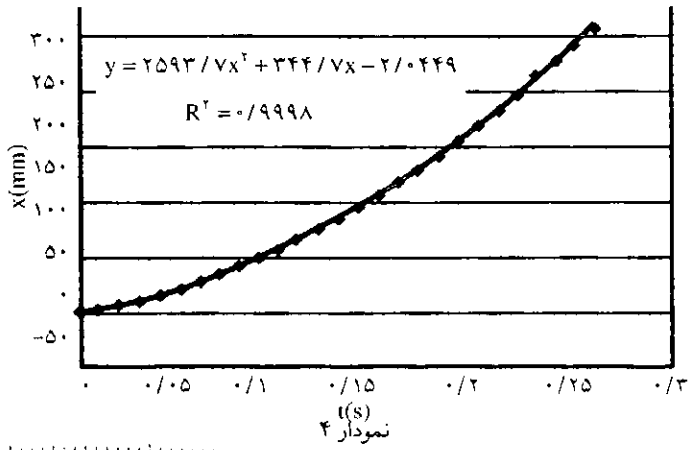
نمودار ۲



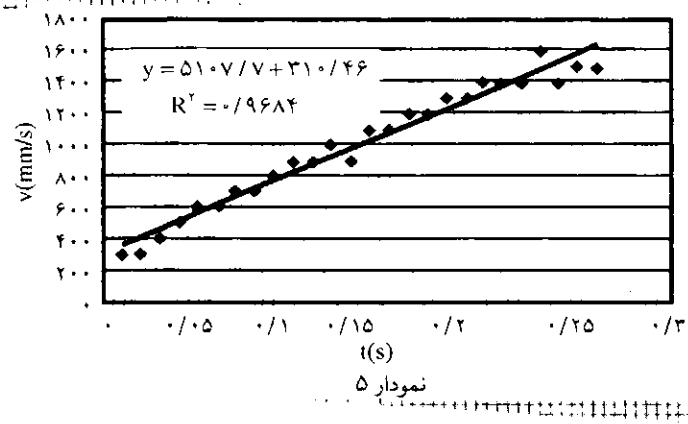
نمودار ۳

| t(s) | x(mm) |
|---|---|
| ۰ | ۰ |
| ۰/۰۱ | ۳ |
| ۰/۰۲ | ۶ |
| ۰/۰۳ | ۱۰ |
| ۰/۰۴ | ۱۵ |
| ۰/۰۵ | ۲۱ |
| ۰/۰۶ | ۲۷ |
| ۰/۰۷ | ۳۴ |
| ۰/۰۸ | ۴۱ |
| ۰/۰۹ | ۴۹ |
| ۰/۱ | ۵۸ |
| ۰/۱۱ | ۶۷ |
| ۰/۱۲ | ۷۷ |
| ۰/۱۳ | ۸۶ |
| ۰/۱۴ | ۹۷ |
| ۰/۱۵ | ۱۰۸ |
| ۰/۱۶ | ۱۲۰ |
| ۰/۱۷ | ۱۳۲ |
| ۰/۱۸ | ۱۴۵ |
| ۰/۱۹ | ۱۵۸ |
| ۰/۲ | ۱۷۲ |
| ۰/۲۱ | ۱۸۶ |
| ۰/۲۲ | ۲۰۰ |
| ۰/۲۳ | ۲۱۶ |
| ۰/۲۴ | ۲۳۰ |
| ۰/۲۵ | ۲۴۵ |

جدول ۴




نمودار ۴




نمودار ۵

● لبه‌ی نوار را بین زبانه وصفحه‌ی زیر زبانه‌ی زنگ اخبار قرار دهید.

● زنگ اخبار را به کار بیندازید و همزمان وزنه را رها کنید تا وزنه حرکت کند.

● نوار کاغذی را از وزنه جدا کنید.

**پرسش**: در نوارهای کاغذی به دست آمده، فاصله‌ی هر دو نقطه بیانگر چیست؟

● فاصله‌ی هر دو نقطه را اندازه بگیرید و در جدولی ثبت کنید.

## پرسش

برای بررسی دقیق حرکت وزنه ملزم به رسم نمودار مکان ـ زمان هستیم. برای رسم نمودار مکان ـ زمان، داده‌ها را چگونه باید تصحیح کرد؟

جدول داده‌ها و نمودار مکان ـ زمان به صورت جدول ۴ و نمودار ۴ خواهد بود.

با همان روش تقریبی قبلی می‌توان نمودار سرعت زمان را برای این حرکت رسم کرد (نمودار ۵).

با کمی دقت در معادله‌های برازش یافته درمی‌یابیم، دو برابر ضریب $t^2$ در معادله‌ی اول تقریباً مساوی ضریب $t$ در معادله‌ی دوم است. این همان شتاب جسم افتان است که کاملاً با شتاب جاذبه متفاوت و در این آزمایش تقریباً برابر ۵متر بر مجذور ثانیه است. از طرف دیگر، ضریب $t$ و عرض از مبدأ نشان‌دهنده‌ی خطای کار ماست و می‌توان با بررسی دقیق این دو، وارد مبحث بسیار طولانی خطاها شد. همین طور، ضریب برگشت که به طور رسمی بیانگر انحراف داده‌های آزمایشگاهی از معادله‌های خط و سهمی است و مبین این واقعیت است که دنیای داده‌های فیزیکی کاملاً با رابطه‌های دقیق ریاضی تفاوت دارد.

## نتیجه گیری

مسلماً بحث روی نمودارهای بالا، بسیاری از نکته‌های مربوط به معادله‌های حرکت یکنواخت و حرکت شتابدار با شتاب ثابت را روشن می‌سازد و پرداختن به آن‌ها در کلاس درس ـ حداقل به نظر همکاران محترم اجراکننده ـ باعث ایجاد پویایی و رویش جوانه‌های اولیه‌ی رویکرد تجربی به مبحث سینماتیک خواهد بود.


مراجع:

۱. کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه، ۱۳۸۳. صفحه‌های ۴۴ و ۵۲.

۲. دوره‌ی درسی فیزیک (ج۱). مثال ۱ـ۹ـ۱.

۳. رشد آموزش فیزیک، تابستان ۸۴، شماره‌ی ۷۱. صفحه‌ی ۱۳ـ۱۱.

(قسمت چهارم)

# ریشه‌یابی واژه‌های فیزیک

سید جعفر مهرداد

## ۱۸ـ ولتامتر

انگلیسی : Voltameter

فرانسوی : Voltamètre$^{(m)}$

عربی : فلسطامتر

در تجزیه الکتریکی مجموعه ظرف و الکترولیت و الکترودها را ولتامتر می‌نامند. بر اثر الکترولیز نمکی از یک فلز مانند نیترات نقره فلز آن نمک یعنی نقره بر روی کاتد می‌نشیند، از روی افزایش وزن کاتد مقدار برق یا شدت جریان که از مدار می‌گذرد به‌دست می‌آید. Voltameter مختصر شده [Voltaic + meter] است. Voltaic صفت نسبی از ترکیب اسم خص ولتا، فیزیک پیشه ایتالیایی و پیشوند نسبت ie ساخته شده و مربوط به ایجاد جریان مستقیم به‌وسیله عمل شیمیایی است. meter از واژه لاتینی metrum و یونانی metron گرفته شده و به معنی اندازه، پیمانه، میزان، ... است[1] ـ معادل آن «سنج» مخفف سنجنده اختیار شده است. «سنج غالباً مزید مؤخر کلمات دیگر شود و صفت فاعلی مرکب مرخم سازد مانند آب‌سنج (دستگاه سنجش آب) و الکل‌سنج (دستگاه سنجش درجه الکل) و دینارسنج و درم‌سنج و سخن‌سنج و سیم‌سنج و...». [2]

به کم مدتی شد چنان سیم‌سنج
که شد خواجه کاروان‌های گنج
(نظامی)

به جای ولتامتر، کولن‌سنج معادل coulomb meter و به‌اختصار Coulometer هم به کار رفته است. [3] معادل واژه Electroytic cell نیز به یک معنی «ظرف الکترولیز» اختیار شده است. [4]

## ۱۹ـ لختی

انگلیسی : Inertia

فرانسوی : Inertie$^{n.f}$

عربی : رعطالة، تصور ذاتی

در کتاب‌های فیزیک فارسی معادل inertia واژه‌های ایزسی، جبر، تارائی، ماند، لختی (به فتح لام) اختیار شده است. [1]

در تداول عامیانه لخت به معنی بی‌حس و شل و بی‌حال مقابل چُست، چابک و لخت شدن مصدر لازم به معنی سست و بی‌حال شدن و لختی حاصل مصدر است. [2] تکیه اصلی در تلفظ این کلمه بر روی هجای دوم است.

لختی به صورت قید (از لخت + «ی» نکره) به معنی یک لخت، اندازه‌ای، کمی، پاره‌ای، قطعه‌ای... آمده است. [3] تکیه اصلی در تلفظ این کلمه بر روی هجای نخست است.

دی بر سر کوی دوست لختی
خاک قدمش به دیده رفتم (سعدی)

در فیزیک تمساوی، نخستین کتاب درسی فیزیک به زبان فارسی که حدود شش سال پس از تأسیس مدرسه دارالفنون، در سال ۱۲۳۶ هجری شمسی در ایران چاپ شده است. در فصل اول زیر عنوان **بی‌اختیاری اجسام از حیثیت حرکت و سکون** می‌خوانیم «که آن را به زبان فرانسه ایزسی می‌نامند و اصل این لغت به معنی آرمیدگی و سکون است و در اینجا عبارت از حالتی است که اجسام متحرکه نمی‌توانند به خودی خود ساکن شوند و همچنین اجسام ساکنه نمی‌توانند به حرکت درآیند. هر جسم مادی در سکون خود باقی

می‌ماند مادامی که قوتی [نیرویی] در او اثر نکرده باشد و همچنین هر جسم مادی که به حرکت درآمده باشد در حرکت متساویه و مستقیمة‌الخط [یکنواخت و راستخط] باقی می‌ماند مادامی که به قوتی برنخورده باشد مانع حرکت او شود. مادامی که ما بتوانیم از یک جسم قوت‌هایی را که مانع حرکت او می‌توانند شد دور نماییم، این جسم دائماً در حرکت متساویه باقی و برقرار خواهد ماند...».

هم‌اکنون لختی به صورت زیر نیز تعریف می‌شود:

«تمایل ماده به مقاومت در برابر تغییر تکانه (momentum)»[۲]

## ۲۰ـ جرم لختی (جرم)

انگلیسی: Inertial mass

فرانسوی: Masse inertie, Masse Inertielle

عربی: کُتْلَه

در مکانیک نیوتونی، قانون اساسی با رابطه $\vec{F} = m\vec{a}$ بیان می‌شود.

$\vec{F}$ نیروی وارد بر یک ذره مادی یا جسم و $\vec{a}$ شتاب حرکت آن است. مطابق این رابطه به هر جسم، یک اندازه نرده‌ای و مثبت با علامت m نسبت داده می‌شود که آن را جرم لختی جسم می‌نامند. جرم لختی جسم را می‌توان به عنوان اندازه کمّی لختی آن در نظر گرفت.[۱]

## ۲۱ـ جرم گرانشی:

انگلیسی: gravitational mass

فرانسوی: Masse gravitationnelle

عربی: کُتله [کُ لَ]

مطابق نظریه گرانش نیوتون، نیروی ربایشی که دو ذره مادی یا دو جسم بر یکدیگر وارد می‌کنند با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

r فاصله دو جسم، G ثابت گرانش عمومی و $m_1$ و $m_2$ دو اندازه نرده‌ای و مثبت است که به نام جرم گرانشی به ترتیب به هریک از این دو جسم نسبت داده می‌شود. هرگاه شعاع زمین را R و جرم گرانشی زمین و جسم روی زمین را به ترتیب M و m′ بنامیم مطابق این رابطه نیروی گرانشی زمین وارد بر جسم برابر است با

$$F = G\frac{m'M}{R^2}$$

در هنگام سقوط آزاد جسم بر اثر نیروی گرانشی زمین، شتاب حرکت آن را با g نشان می‌دهیم. با استفاده از قانون F=ma که شامل جرم لختی m است مقدار g را به دست می‌آوریم.

$$g = \frac{F}{m} = \frac{1}{m}(G\frac{m'M}{R^2})$$

هرگاه فرض کنیم جرم گرانشی جسم با جرم لختی آن برابر و $\frac{m'}{m} = 1$ است رابطه $g = G\frac{M}{R^2}$ به دست می‌آید. این نتیجه بیان می‌کند که در نزدیکی سطح زمین شتاب گرانشی برای تمام اجسام یکسان است. این واقعیت برای هرگونه جسمی و با دقت زیاد با آزمایش مورد تحقیق قرار گرفته و تأیید شده است. بنابراین جرم لختی یک جسم (که شتاب حرکت آن را تحت تأثیر نیرویی مشخص تعیین می‌کند) با جرم گرانشی آن (که نیروی گرانشی بین آن و جسم دیگر را تعیین می‌کند) برابر است.[۱]

به همین جهت برای یک جسم به جای جرم لختی یا جرم گرانشی به طور خلاصه واژه «جرم» را به کار می‌برند.

***

گرانیدن [گ د] مصدر و به معنی سنگین شدن و وزین شدن و ثقیل گشتن[۲] و... معادل tograviate به معنی جذب شدن، کشیده شدن،... اختیار شده است. معادل صفت gravitational گرانشی، ثقلی به کار می‌رود.[۳]

## ۲۲ـ ذره مادی (ذره)

انگلیسی: material particle، Particle

فرانسوی: Point matériel، Particule

عربی: جُسَیم

در مکانیک یک ذره مادی یا به طور خلاصه یک ذره و یا یک نقطه مادی عبارت است از مقدار ماده‌ای که ابعاد آن نسبت به فاصله‌های معمولی بی‌نهایت کوچک باشند یعنی با تقریب کافی بتوان از آن ابعاد در این فاصله‌ها چشم‌پوشی کرد مثلاً ممکن است در مورد منظومه شمسی زمین را تقریباً یک ذره یا نقطه مادی فرض کرد. در مکانیک تنها برای سهولت بحث و بررسی قانون‌های حرکت و سکون اجسام مفهوم ذره به معنی نقطه هندسی دارای جرم به کار گرفته شده است.[۱]

---

زیرنویس ولتامتر:

۱. مراجع ۱۰ و ۱۱
۲. مرجع ۱
۳. مرجع ۸
۴. مراجع ۱۱ ب و ۶ـ ب

زیرنویس لختی:

۱. مرجع ۶ـ الف
۲. مرجع ۴
۳. مرجع ۱
۴. مرجع ۷، واژه‌های فیزیک کتاب‌های درسی مصوب فرهنگستان و زبان و ادب فارسی

زیرنویس جرم لختی:

۱. مراجع ۷ و ۹

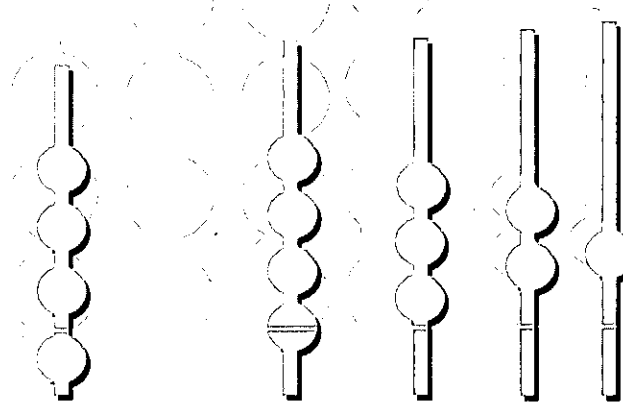
زیرنویس جرم گرانشی:

1. KANE. STERNHEIM. PHYSICS. 2NDED. P 52
۲. مرجع ۱
۳. مرجع ۶ـ الف

زیرنویس ذره مادی:

۱. مراجع ۷ و ۱۰

# سرمایش لیزری و گیراندازی اتم‌ها



سیدامید سبحانی


## چکیده

از نور لیزر برای سردکردن گازها تا گستره‌ی دمایی میکروکلوین و شناور نگه داشتن اتم‌های سردشده در انواع گوناگون «تله‌های اتمی»[1] استفاده می‌شود. این روش را استیون چو، کلود کوهن ـ تانوجی[2] و ویلیام دی فیلیپس[3] ابداع کردند که به این خاطر جایزه‌ی نوبل فیزیک سال ۱۹۹۷ به آنان داده شد. با به دام‌اندازی اتم‌های گازی در شرایط خلأ، می‌توان ویژگی‌های دستگاه گاز را بررسی کرد. این موضوع به روش‌های متفاوت به اتم‌های دستگاه بستگی دارد. در این مقاله، ابتدا نحوه‌ی به گیراندازی اتم‌های یک دستگاه گازی را شرح می‌دهیم. سپس، چگونگی تولید «چگالـه‌ی بوز ـ اینشتین» در این دستگاه‌ها را توضیح می‌دهیم.


## ۱. مقدمه

برای مطالعه و تحقیق در مورد ویژگی گازها باید اتم‌ها و مولکول‌های تشکیل دهنده‌ی گاز را بررسی کرد. چون این اتم‌ها و مولکول‌ها با سرعت زیاد حرکت می‌کنند، مطالعه‌ی آن‌ها دشوار است. بنابراین باید به نحوی سرعت آن‌ها را کم کرد و یا به عبارت دیگر، آن‌ها را به دام انداخت. برای این کار باید گاز را سرد کرد. اما مسأله این است که هنگام سردکردن، گاز به حالت مایع، سپس به حالت جامد درمی‌آید، و چون اتم‌ها و مولکول‌ها در مایعات و جامدات خیلی به هم نزدیک می‌شوند، مطالعه‌ی آن‌ها دشوار خواهد شد. اما اگر فرایند سردکردن در خلأ انجام شود، می‌توان چگالی را به اندازه‌ای کم نگه داشت که مانع از میعان و انجماد شود. فقط با نزدیک‌شدن به صفر مطلق سرعت اتم‌ها به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. برای مثال، در دماهای پائین‌تر از یک میکروکلوین، اتم‌های هیدروژن آزاد با سرعتی کم‌تر از یک کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کنند.

نور لیزر مانند شار چسبنده عمل می‌کند که به آن «شیوه‌ی اپتیکی» می‌گویند و در آن، سرعت اتم‌ها کم می‌شود. در این‌جا می‌توان تک‌تک اتم‌ها را با دقت زیاد مطالعه و ساختار داخلی آن‌ها را تعیین کرد. با گیر انداختن اتم‌های بیش‌تر در حجمی معین، گازی رقیق تشکیل می‌شود و می‌توان ویژگی‌های آن را به تفصیل بررسی کرد. روش‌هایی که جدیداً ابداع شده‌اند، در افزایش شناخت ما از برهم کنش بین فوتون و ماده تأثیر به سزایی داشته‌اند؛ به ویژه راه را بر شناخت عمیق‌تر رفتار کوانتومی گازها در دمای کم گشوده‌اند.

## ۲. گازهای به دام افتاده

نور را می‌توان جریانی از ذرات، یعنی فوتون‌ها در نظر گرفت. فوتون به معنی معمول جرم ندارد، اما دارای تکانه است. برای کاهش یا تغییر تکانه‌ی آن باید در برخورد به ذره‌ی شبیه خودش با تکانه‌ی صفر، تمام تکانه را به این ذره منتقل کند. به همین ترتیب، اگر تحت شرایط خاصی فوتون با یک اتم برخورد کند، می‌تواند تمام تکانه‌ی خود را به آن منتقل کند. برای وقوع این امر فوتون باید انرژی معینی داشته باشد که بستگی به نوع اتم‌های برخوردکننده و

شرایط دیگر دارد. مثلاً اگر اتم‌ها در حال سکون باشند، ساختار داخلی اتم‌ها انرژی مناسب فوتون‌ها را تعیین می‌کند. در صورتی که اتم‌ها در حال حرکت باشند و جریانی از فوتون‌ها به آن‌ها برخورد کند، اگر فوتون‌ها انرژی مناسب داشته باشند، می‌توانند یکی از آن‌ها را جذب کنند و انرژی و تکانه‌اش را بگیرند. در این صورت اتم کُند می‌شود. پس از زمان بسیار کوتاهی، حدود یک صد میلیونیم ثانیه، اتم کُندشده فوتونی می‌گسیلد. فوتون گسیل شده دارای تکانه‌ای است که به اتم سرعت پس‌زنی اندکی می‌دهد. اما جهت پس‌زنی به صورت کاتوره‌ای تغییر می‌کند. بعد از تعداد زیادی جذب و گسیل، سرعت اتم به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. برای کُندکردن حرکت اتم به باریکه‌ی نور لیزر با شدت زیاد نیاز است.

در سرمایش لیزری[۴]، از این تغییر سرعت برای کُندکردن حرکت گرمایی استفاده می‌شود. برای درک اساس کار فرض کنید به گازی از اتم‌ها، باریکه‌ی لیزری بتابد که بسامد آن در زیر بسامد جذب تشدیدی اتم‌ها تنظیم شده باشد. در این صورت پس از جذب شدن فوتون، سرعت اتمی که به طرف لیزر می‌رود کُند و سرعت اتمی که از لیزر می‌گریزد، تند می‌شود؛ زیرا تکانه‌ی فوتون در مورد اول در جهت خلاف، و در مورد دوم در جهت حرکت اتم است.

رمز سردسازی لیزری آن است که اتم‌های حرکت‌کننده به طرف لیزر، فوتون را با آهنگ تندتر از اتم‌هایی جذب می‌کنند که از لیزر دور می‌شوند. زیرا گروه اول با بسامدی رو به رو می‌شود که به سبب انتقال دوپلر به تشدید نزدیک‌تر است. بنابراین در اثر برهم کنش با لیزر، انرژی جنبشی اتم‌ها روی هم رفته کم می‌شود. اگر لیزر روی بسامدی که بیش از بسامد جذب اتم است کوک شود، عکس این عمل اتفاق می‌افتد (یعنی اتم‌ها گرم می‌شوند). اگر از باریکه‌ی لیزر تک جهتی استفاده شود، باریکه در تمام جهت‌ها شتاب می‌گیرد و سرعت متوسط آن افزایش پیدا می‌کند؛ اگرچه گستره‌ی سرعت کوچک‌تر می‌شود. با استفاده از دو باریکه‌ی لیزری رودررو، با گیراندازی اتم‌ها می‌توان از این شتاب اجتناب کرد.

به دلیل بار الکتریکی یون‌ها، سرد کردن آن‌ها خیلی آسان‌تر می‌شود. بار الکتریکی باعث می‌شود که یون‌ها در چاه‌های عمیق به دام افتند. این امر امکان می‌دهد که زمان برهم کنش طولانی شود و انتقال تکانه به یون از چند فوتون صورت گیرد. گسترش سردسازی لیزری به اتم‌های خنثا آسان نیست. زیرا نمی‌توان دامی برای نگه‌داری اتم‌هایی آماده ساخت که انرژی گرمایی دارند. درحالی که یون‌ها را اول گیر می‌اندازند و بعد با لیزر سرد می‌کنند، اتم‌ها را باید اول سرد کرد و بعد به دام انداخت. سردکردن اتم‌های آزاد با هدایت باریکه‌ی لیزر در مقابل باریکه‌ی اتم تحقق می‌یابد.

سردکردن اتم‌های آزاد با هدایت باریکه‌ی لیزر در مقابل باریکه‌ی اتم انجام می‌شود.

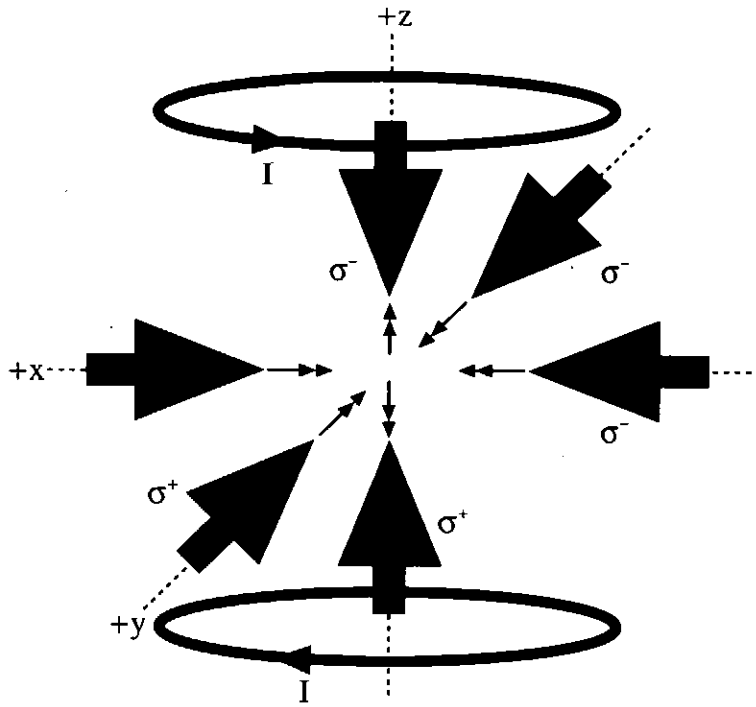
اتم‌هایی به جرم m، فوتون‌هایی با بسامد ν را که دارای تکانه‌ی hν/c (c سرعت نور و h ثابت پلانک است) هستند، جذب می‌کنند و سرعت آن‌ها در هر جذب به اندازه‌ی hν/mc کم می‌شود. به‌علاوه، اتم هنگام تابش فوتون، به طریق گسیل خود به خودی یا گسیل القایی، یک ضربه‌ی سرعتی دریافت می‌کند. فوتون‌های گسیل القایی در همان جهت فوتون‌های فرودی رهسپار می‌شوند. بنابراین، تکانه‌ای که هنگام جذب فوتون دریافت شده است، خنثا می‌شود. اما جهت گسیل فوتون‌های خود به خودی کاتوره‌ای است. پس در این نوع گسیل، انتقال تکانه روی‌هم‌رفته صفر است.

بنابراین، انتقال تکانه‌ی خالص پس از جذب و گسیل خودبه‌خودی متعاقب آن، همان انتقال در جذب است. چون انتقال تکانه‌ی خالص به گسیل خودبه‌خودی مربوط است، نیروی فشار تابشی که ایجاد می‌شود را اغلب نیروی خودبه‌خودی می‌نامند (نیروی پراکندگی). در مورد اتم‌های سدیم (که در اغلب این نوع آزمایش‌ها به کار می‌روند)، سرعت گرمایی اولیه‌ی اتم‌ها در حدود هزار متر بر ثانیه است و به ازای هر فوتونی که جذب می‌شود، سه سانتی‌متر بر ثانیه تغییر سرعت حاصل می‌آید. یعنی هر اتم سدیم برای آن‌که بایستد، باید بیش از ۳۰هزار فوتون را جذب و گسیل کند.

استیون‌چو و همکارانش، از شش باریکه‌ی لیزر در سه راستای عمود برهم و در هر راستا دو باریکه در جهت مخالف هم، استفاده کردند. اتم‌های گسیل شده از یک باریکه‌ی اتمی در خلأ، ابتدا به‌وسیله‌ی یک باریکه‌ی لیزری در خلاف جهت باریکه‌ی اولیه متوقف، و سپس به محل برخورد شش باریکه‌ی لیزر سردکننده هدایت می‌شد. نور هر شش باریکه‌ی لیزر، در مقایسه با نور مشخصه‌ای که اتم سدیم ساکن جذب می‌کند، اندکی به سرخی می‌گرایید. اتم‌های سدیم در هر جهت به فوتون‌هایی با انرژی مناسب برخورد، و به ناحیه‌ای که این شش باریکه‌ی لیزر یکدیگر را قطع می‌کردند، برگشت داده می‌شدند. می‌توان فرض کرد که در محل برخورد نورهای لیزر، اتم در درون شار چسبندهای حرکت می‌کند که آن را «شیره‌ی اپتیکی» می‌نامند.

برای محاسبه‌ی دمای اتم‌های سردشده در شیره‌ی اپتیکی، لیزرها را خاموش می‌کردند و با این روش، دما را تا حدود ۲۴۰ میکروکلوین پائین می‌آوردند. این دما نظیر سرعت ۳۰سانتی‌متر بر ثانیه است و با دمایی که به صورت نظری محاسبه شده، یعنی حد دوپلر، منطبق است. آن‌ها تصور می‌کردند، کم‌ترین دمایی که با سرمایش دوپلری می‌توان به آن دست یافت، همین دماست.

در آزمایش بالا، اتم‌ها سرد می‌شوند، اما گیر نمی‌افتند.




شکل ۱

گرانش سبب می‌شود که اتم‌ها حدود یک ثانیه بعد، از شیره‌ی اپتیکی بیرون بیفتند. برای گیراندازی واقعی آن‌ها یک تله لازم است و این تله‌ی بسیار کارامد در سال ۱۹۸۷ ساخته شد. این تله را تله‌ی «مغناطو ـ اپتیکی» می‌نامند. در این تله، شش باریکه‌ی لیزر در آرایه‌ای از نوع آزمایش بالا به کار می‌رود. اما دو پیچه‌ی اضافی هم وجود دارد که یک میدان مغناطیسی با تغییرات فضایی کم تولید می‌کند. کمینه‌ی این میدان در محل برخورد باریکه‌هاست. چون میدان مغناطیسی ترازهای انرژی اتم را تغییر می‌دهد (اثر زیمان)، نیروی حاصل از نیروی گرانش بزرگ‌تر است. بنابراین اتم‌ها را به وسط تله می‌راند در این حالت اتم‌ها واقعاً گیر می‌افتند و می‌توان آن‌ها را مطالعه کرد یا برای انجام آزمایش به کار گرفت.

ویلیام دی فیلیپس و همکارانش، قبلاً در آغاز سال ۱۹۸۰ میدان‌های مغناطیسی را برای کُندکردن و توقف کامل اتم‌ها در باریکه‌های اتمی کُند به کار گرفته بودند آنچه که فیلیپس به وجود آورد، کُند «کننده‌ی زیمان» نامیده می‌شود. وی با دستگاه خود در سال ۱۹۸۵ اتم‌های سدیم را با یک تله‌ی خاص مغناطیسی متوقف کرد و گیر انداخت. اما این تله نسبتاً ضعیف است و به‌همین علت، اتم‌های درون آن باید خیلی سرد شوند تا در تله باقی بمانند. او همچنین چند روش جدید اندازه‌گیری دما ابداع کرد. از آن جمله روشی است که در آن می‌گذارند، اتم‌ها تحت تأثیر نیروی گرانش سقوط کنند و منحنی سقوط آن‌ها به کمک یک لیزر تعیین می‌شود.

پیشرفت در زمینه‌ی سرمایش لیزری و به دام‌اندازی اتم‌های خنثا با سرعت ادامه دارد. از جمله چو، فواره‌ای اتمی ساخته است که در آن، اتم‌های سردشده با لیزر از تله‌ای شبیه فواره‌های آب به‌بالا افشانده می‌شوند. وقتی این اتم‌ها در بالاترین نقطه‌ی مسیرشان برمی‌گردند و سقوطشان دوباره آغاز می‌شود، تقریباً ساکن هستند. اعتقاد بر این است که به کمک این روش می‌توان ساعت‌های اتمی ساخت که دقتشان صد برابر دقت ساعت‌های اتمی کنونی است. روش سرمایش لیزری که در سال ۱۹۹۷ جایزه گرفت، مبنای کشف چگاله‌ی بوز ـ اینشتین در گازهای اتمی نیز هست؛ پدیده‌ای که توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

## ۳. چگاله‌ی بوز ـ اینشتین

فرمیون‌ها مجموعه ذراتی هستند که می‌توان آن‌ها را با آمار کوانتومی بوز ـ اینشتین مشخص کرد. اتم‌ها از فرمیون‌ها (الکترون، پروتون و نوترون) تشکیل شده‌اند. اگر تعداد فرمیون‌های اتم فرد باشد، اتم فرمیون است و اگر تعداد فرمیون‌های اتم زوج باشد، اتم بوزون است. فرمیون‌ها از اصل طرد پاؤلی پیروی می‌کنند که اشغال دو اتم یکسان در یک حالت کوانتومی را ممنوع می‌سازد. در صورتی که در حد دمای صفر، بوزون‌های یکسان بدون برهم کنش پائین‌ترین حالت کوانتومی را اشغال می‌کنند.

در سال ۱۹۲۵، اینشتین گذار گاز کامل از اتم‌های بوزونی زیر دمای گذار فاز $T_{BEC}$ (دمای مشخصی نزدیک صفر کلوین است) به پائین‌ترین حالت کوانتومی را پیش‌بینی کرد. این حالت به چگاله‌ی بوز ـ اینشتین معروف است. تا همین اواخر، این چگاله تنها در هلیم مایع مشاهده شده بود. اما در سال ۱۹۹۵ چگاله‌ی بوز ـ اینشتین معروف است. تا همین اواخر، این چگاله

تنها در هلیم مایع مشاهده شده بود. اما در سال ۱۹۹۵ چگالهی بوز ـ اینشتین در گازهای اتمی به دام افتاده کشف شد و این حالت ویژه برای اتم‌های سدیم به دام افتاده به دست آمده است. این کشف به موجی از آزمایش‌ها و نظریه‌ها برای به دست آوردن ویژگی‌های تازه‌ی این سیستم انجامید. در بالای دمای گذار، اتم‌ها پائین‌ترین تراز را ترک می‌کنند و به ترازهای بالاتر می‌روند که این اتم‌های بالاتر از تراز چگالهٔ را از اتم‌های ناچگالهٔ می‌گویند.

دستگاهی متشکل از N ذره بوزونی را در نظر می‌گیریم که در جعبه‌ای به حجم V با دمای T در حالت تعادل قرار دارند. تعداد اتم‌هایی که حالت کوانتومی i را با انرژی $\xi_i$ اشغال کرده‌اند، از تابع بوز ـ اینشتین به دست می‌آید:

$$\langle n(\xi_i,T)\rangle=\frac{1}{\exp[(\xi_i-\mu)/K_BT]-1} \qquad (۱_۳)$$

که $\mu$ پتانسیل شیمیایی گاز است. پتانسیل شیمیایی، پارامتری ترمودینامیکی و تابع دماست. از معادله‌ی بالا معلوم می‌شود که باید $\mu<\xi_i$ باشد. چون تعداد ذرات در سیستم ثابت است.

لذا در تمام دماها داریم:

$$\Sigma_i\langle n(\xi_i,T)\rangle=N \qquad (۲-۳)$$

از معادله‌ی (۲-۲) می‌توان مقدار $\mu$ را محاسبه کرد. چون در دماهای کم تمام ذرات در پائین‌ترین حالت انرژی $\xi_0$ قرار می‌گیرند، داریم:

$$\langle n(\xi_0,T)\rangle=\frac{1}{\exp[(\xi_0-\mu)/K_BT]-1}\approx N \qquad (۳-۳)$$

با بسط جمله نمایی در رابطه‌ی (۲ـ۳) به دست می‌آوریم:

$$\frac{K_BT}{\xi_0-\mu}\approx N \qquad (۴_۳)$$

چون N خیلی بزرگ ($N\approx 10^{23}$) است، $\mu$ کوچک‌تر از $\xi_0$ و خیلی نزدیک به آن است. از آن جا که اکثر ذرات در حالت $\xi_0$ قرار دارند و تعداد کمی از آن‌ها در حالت $\xi_1$ قرار دارند، بنابراین $\langle n(\xi_0,T)\rangle<<N$ و $(\xi_1-\mu)>>(\xi_0-\mu)$ است. در نتیجه، فاصله‌ی بین $\xi_1$ و $\xi_0$ خیلی بزرگ‌تر از فاصله‌ی بین $\xi_0$ و $\mu$ است و در دمای معین، $\mu$ خیلی پائین‌تر از $\xi_0$ قرار می‌گیرد.

از تبدیل جمع به انتگرال می‌توان نوشت:

$$\Sigma_i\langle n(\xi_i,T)\rangle=\int_0^\infty D(\xi)\langle n(\xi,T)\rangle d\xi \qquad (۵_۳)$$

که در آن $D(\xi)$ چگالی حالت‌هاست.

جمع شامل ذرات در پائین‌ترین سطح انرژی است، ولی در انتگرال $D(0)=0$ است، فقط تعداد ذرات در حالت برانگیخته را نشان می‌دهد و چون $\langle n(0,T)\rangle$ از مرتبه‌ی N است، در نتیجه رابطه‌ی (۲ـ۵) به این صورت نوشته می‌شود:

(۶-۳)

$$N=\langle n(0,T)\rangle+\int_0^\infty D(\xi)\langle n(\xi,T)\rangle d\xi=N_0(T)+N'(T)$$

با قرار دادن $D(\xi)=\frac{V}{4\pi^2}\xi^{\frac{1}{2}}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}$، مقدار $N'$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۷ـ۳)

$$N'(T)=\frac{V}{4\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}\int_0^\infty\frac{\xi^{\frac{1}{2}}d\xi}{\exp[(\xi-\mu)/K_BT]-1}$$

در دمای معین بیشینه، مقدار $N'(T)$ به ازای $\mu=0$ حاصل می‌شود؛ یعنی برای حد بالای $N'(T)$ به دست می‌آوریم:

$$N'_m(T)=2.612V\left(\frac{mK_BT}{2\pi\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (۸_۳)$$

برای دستگاهی با N و V ثابت در دماهای بالا $N'_m(T)$ به اندازه‌ی کافی بزرگ است؛ یعنی اکثر ذرات در حالت برانگیخته هستند. اگر دما کاهش یابد و کم‌تر از دمای بحرانی $T_B$ باشد $N'_m(T)$ خیلی کم‌تر از N است؛ یعنی اکثر ذرات در پائین‌ترین حالت قرار می‌گیرند و تعداد ذرات در حالت زمینه با کاهش دما افزایش می‌یابد. دمای بحرانی $T_B$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_B=\frac{2\pi\hbar^2}{mK_B}\left(\frac{N}{2.612V}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (۹-۳)$$

و با توجه به رابطه‌ی فوق می‌توان نوشت:

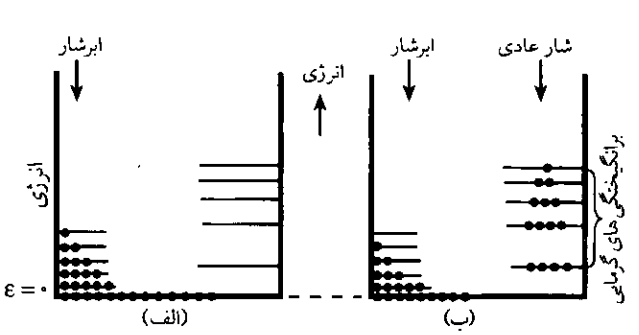
$$\frac{N'(T)}{N}=\left(\frac{T}{T_B}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (۱۰_۳)$$

و با استفاده از رابطه‌ی (۲-۶) داریم:

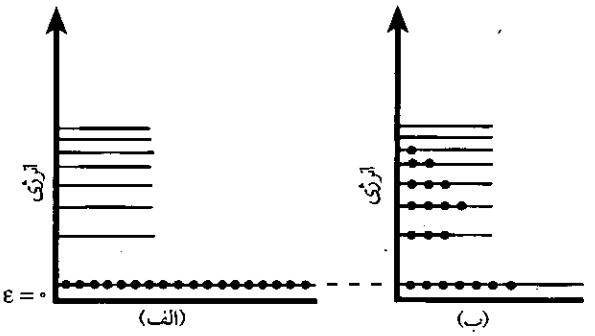
$$\frac{N(T)}{N}=1-\left(\frac{T}{T_B}\right)^{\frac{3}{2}}\ (T\le T_B) \qquad (۱۱-۳)$$

در واقع، کسر کوچکی از ذرات در پائین‌ترین حالت در $T>T_B$ قرار می‌گیرند. اما چون این تعداد خیلی کوچک است، می‌توان آن را نادیده گرفت. وقتی T کوچک‌تر از $T_B$ باشد $N_0(T)$، به سرعت افزایش می‌یابد. شکل ۲ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

الف) در $T=0$ تمام ذرات در پائین‌ترین انرژی قرار می‌گیرند.




شکل ۳ . قرار گرفتن ذرات در ترازهای انرژی هلیم ابرشاره




شکل ۲ . قرار گرفتن ذرات در ترازهای انرژی در یک گاز کامل بوز ـ اینشتین

ب) در $0 < T < T_B$ بعضی از حالت‌های بالا نیز اشغال شده‌اند، اما کسر بیش‌تری از ذرات در پائین‌ترین تراز قرار می‌گیرند.

در دمای صفر، تمام ذرات در پائین‌ترین تراز قرار می‌گیرند. بین دمای صفر و دمای گذار، ذرات به دو دسته تقسیم می‌شوند: بعضی ذرات در پائین‌ترین تراز و برخی در ترازهای بالاتر قرار می‌گیرند. بنابراین، چگالهٔ بوز ـ اینشتین در دستگاه‌های ماکروسکوپی در دمای معین وقتی به وقوع می‌پیوندد که ترازهای پائین آن‌ها را ذرات بیش‌تری اشغال کنند. این چگاله با گذار گاز به مایع کاملاً فرق دارد. در حالت گذار گاز به مایع، ذرات دو فاز را تشکیل می‌دهند که مرز آن دو، آن‌ها را از هم جدا می‌سازد. اما در چگالهٔ بوز ـ اینشتین جدایی دو فاز در فضای تکانه‌ی مشخص صورت می‌گیرد، ولی مرزی فیزیکی بین ذرات چگاله و برانگیخته وجود ندارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت، چگالهٔ بوز ـ اینشتین گذار از فاز بی‌نظمی به نظم است.

## ۴ . چگالهٔ بوز ـ اینشتین در گازهای واقعی

در سیستم‌های واقعی که برهم کنش بین ذرات وجود دارد، اثر برهم کنش ذرات به صورت زیر ظاهر می‌شود:

۱ . تعداد ذرات چگال در پائین‌ترین تراز انرژی کاهش می‌یابد.

۲ . ماهیت ترازهای برانگیخته تغییر می‌کند.

بنابراین، در دمای صفر تمام ذرات در پائین‌ترین تراز انرژی قرار نمی‌گیرند، بلکه تعدادی از ذرات در ترازهای بالا قرار می‌گیرند و در واقع از تراز پائین تخلیه می‌شوند. شکل ۳ نتیجه‌ی بالا را برای هلیم ابرشاره نشان می‌دهد.

الف) در $T = 0$ برهم کنش بین ذرات باعث می‌شود که بعضی از ذرات در ترازهای بالاتر قرار گیرند (تخلیه‌ی حالت پایه).

ب) در $0 < T < T_B$ بعضی از حالت‌های برانگیخته‌ی دیگر نیز به واسطه‌ی برهم کنش اشغال شده‌اند.

## نتیجه گیری

در این مقاله نحوه‌ی سردسازی گازها تا صفر مطلق در خلأ توسط لیزر را شرح دادیم و به گیراندازی اتم‌ها به روش‌های اپتیکی و مغناطیسی در یک دستگاه گازی اشاره کردیم. همچنین، چگالهٔ بوز ـ اینشتین را در گاز بوزونی و نیز ترازهای انرژی مورد بررسی قرار دادیم. خواننده می‌تواند برای کسب اطلاعات بیش‌تر به منابع مراجعه کند.

زیرنویس:

1. atomic trapping
2. Cohen. Tannoudji
3. W. D. Phillips
4. laser cooling


مراجع:

1. Philips, W.D. (1998). Laser Cooling and Trapping of Nuetral Atoms. Rev. Mod. Phys. 70, 721.
2. Cohen. Tannoudji, C. (1998). Monipulating Atoms with Photons. Rev-Mod. Phys. 70, 707.
3. Hess, H. F. and Hill, M. (1987). Magnetic Trapping of Spin-Polarized Atomic Hydrogen. Phys. Rev. Lett., 59, 672.

# آزمایشی در منزل

## سرعت صوت در هوا

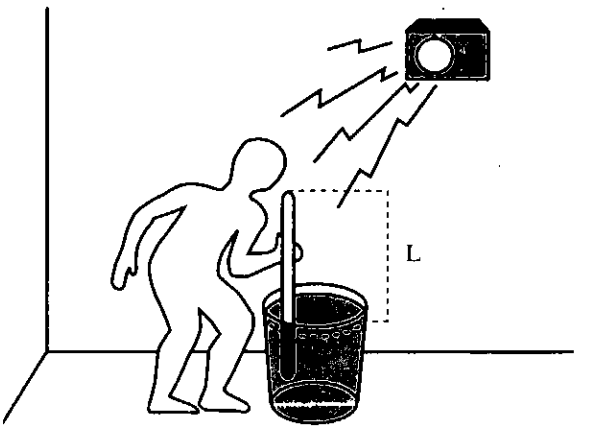
ویلسون پره ریا داسیلوا
مترجم: ماریه استادهاشمی

این مقاله آزمایشی ساده را توصیف می کند که دانش آموزان می توانند، برای تعیین سرعت صوت در هوا در منزل انجام دهند. ابتدا، مجموعه‌ای از پرونده‌های صوتی با بسامدهای مشخص ایجاد و روی رایانه‌ی دانش‌آموز ذخیره می شود. تشدیدها[1] با وارد کردن قسمتی از یک لوله‌ی مستقیم در سطل آب به وجود می آیند. طول قسمت پر از هوای لوله با بالا و پائین بردن لوله تغییر می کند. تشدیدها با گوش قابل آشکارسازی هستند. ما بعضی از نتیجه‌های به دست آمده توسط دانش‌آموزان را ارائه می‌دهیم. همه چیز با مقدار مورد نظر سازگاری دارد.

شاید ساده‌ترین آزمایش تعیین سرعت صوت در مواد گوناگون، مانند هوا، تشدید در لوله‌ای باشد که قسمتی از آن از آب پر شده است. **واردن**[2]، اخیراً روش پیشرفته‌ای را توصیف کرده است که به لوله کشی نیاز ندارد. در این جا آزمایش مشابهی را توضیح می دهیم که دانش آموزان دارای رایانه‌ی شخصی می توانند انجام دهند.

در سال‌های اخیر که رایانه‌های شخصی رایج شده‌اند، چند آزمایش برای تعیین سرعت صوت در مواد گوناگون با این ابزار پیشنهاد شده است. علاوه بر این، رایانه‌های شخصی دارای مدارهای الکترونیکی و بلندگو، نرم‌افزاری برای گردآوری داده‌ها، آشکارسازهای تشدید، (برای مثال به منابع شماره‌ی ۴ و ۵ مراجعه کنید) و یا حتی اوسیلوسکوپ هستند.

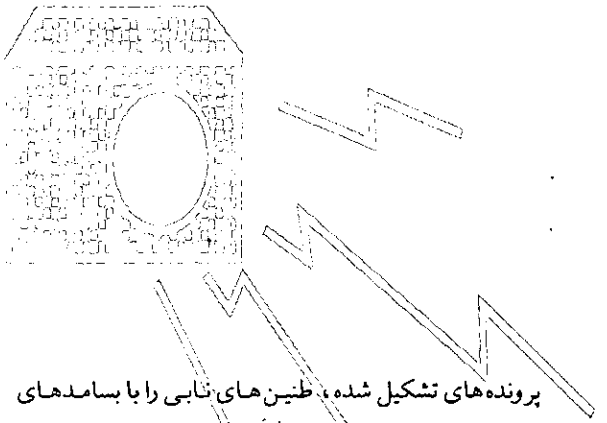
هدف این مقاله، ادغام روش کلاسیک تعیین سرعت صوت در هوا، یعنی ردیابی تشدیدها در یک لوله، با استفاده از پرونده‌های wav برای بسامدهای ثابت در یک رایانه است. این ترکیب، امکان انجام آزمایش را بدون دیاپازون‌ها، مدار الکتریکی یا آشکارسازها (به غیر از حس شنوایی دانش‌آموزان) به وجود می‌آورد. در نتیجه، آزمایش را دانش‌آموزان در منزل انجام می دهند و آموزش به فراسوی کلاس گسترش می یابد.




شکل ۱ . ترتیب آزمایش . یک برنامه‌ی رایانه‌ای طنین خالصی را تولید می‌کند . اگر چشمه‌ی صدا حدود نیم متر بالاتر از انتهای باز لوله قرار گیرد ، بهترین نتیجه در امتداد محور فرضی به دست می‌آید .

## آزمایش

ترتیب آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل سطل پر از آبی است که یک لوله‌ی پی‌وی‌سی در آن قرار دارد . به این طریق ، طول ستون هوا را می‌توان به راحتی تغییر داد و نقطه‌های تشدید را با استفاده از گوش شخص آزمایش‌کننده ، مانند یک آشکارساز صدا مشخص کرد . چشمه‌ی صدا ، بلندگوی رایانه‌ی دانش‌آموز است . هشت پرونده‌ی شنیداری را می‌توان با نرم‌افزار TTG تولید کرد .



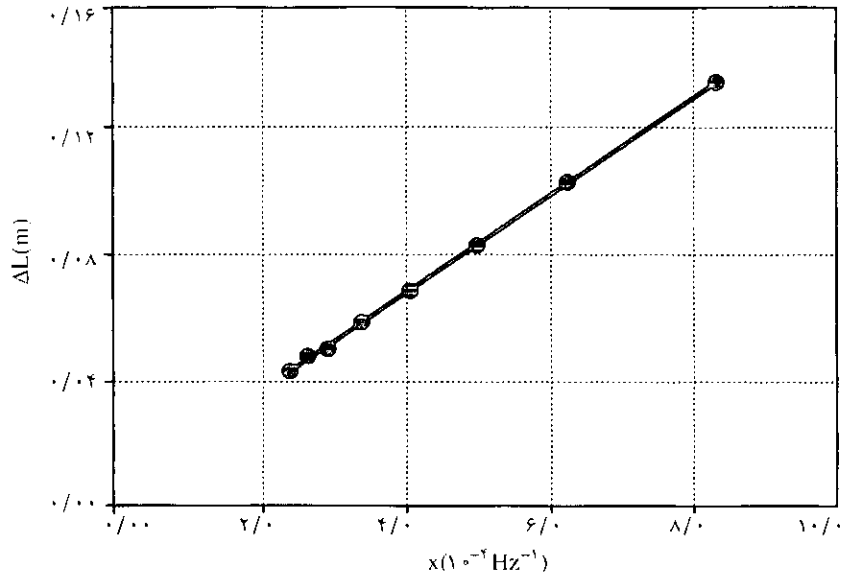
پرونده‌های تشکیل شده ، طنین‌های تابی را با بسامدهای ۱٫۲۰ ، ۱٫۶۰ ، . . . و ۴٫۰۰kHz تولید می‌کنند که در مرجع شماره‌ی ۷ موجود است .

هدف اصلی ، اجرای پرونده‌های wav به عنوان حلقه‌ای نامتناهی در رایانه‌های شخصی است که با بسامد ۱٫۲۰kHz شروع می‌شود . به منظور کم کردن طول ستون هوای داخل لوله ، یک انتهای لوله به آرامی داخل آب سطل ، مطابق شکل ۱ می‌شود . همزمان با آن ، گوش در نزدیکی انتهای دیگر لوله قرار می‌گیرد . هنگام تشدید به واسطه‌ی بازتاب امواج در سطح آب داخل لوله ، این احساس به وجود می‌آید که صدا مستقیماً از داخل لوله تشکیل می‌شود . این احساس بر اثر افزایش ارتفاع صوتی ناشی از تقویت انرژی امواج در تشدید به وجود می‌آید .

محل نقطه‌های تشدید را می‌توان مانند تنظیم رادیو برای پخش از ایستگاه معین با تنظیم دقیق وضعیت عمودی لوله به دست آورد و ثبت کرد . سپس لوله به آرامی در آب پائین برده می‌شود تا تشدید بعدی رخ دهد . اختلاف مکان بین دو تشدید در بسامد مورد استفاده $\Delta L = \lambda / 2$ است . البته چون اختلاف بین تشدیدهای متوالی در نظر گرفته می‌شود ، خطاهای سیستماتیک به دلیل بازبودن انتهای لوله از بین می‌روند . این روال را می‌توان برای یافتن مکان سومین نقطه‌ی تشدید تکرار ، و سپس هر دو مقدار اندازه‌گیری شده را منظور کرد .

**جدول ۱ . بسامدها ، عکس آن‌ها وفاصله‌ی نظیر بین دو تشدید متوالی**

| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| f(kHz) | ۱٫۲۰ | ۱٫۶۰ | ۲٫۰۰ | ۲٫۴۰ | ۲٫۸۰ | ۳٫۲۰ | ۳٫۶۰ | ۴٫۰۰ |
| $X = 1/f$ $10^{-3}Hz^{-1}$ | ۸٫۳۳ | ۶٫۲۵ | ۵٫۰۰ | ۴٫۱۷ | ۳٫۵۷ | ۳٫۱۲ | ۲٫۷۸ | ۲٫۵۰ |
| ΔL(m) | ۰٫۱۴۴ | ۰٫۱۱۰ | ۰٫۰۸۳ | ۰٫۰۷۰ | ۰٫۰۶۰ | ۰٫۰۵۳ | ۰٫۰۵۰ | ۰٫۰۴۳ |



شکل ۲ . فاصله های بین دو تشدید متوالی برحسب عکس بسامد

## اندازه گیری ها و نتیجه ها

معمولاً وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش در منزل فراهم است (یا می توان به آسانی و با قیمت ارزان آن ها را خریداری کرد) . این وسایل عبارتند از : خط کش ، رایانه ای برای تولید پرونده های wav برای تولید طنین های ناب ، لوله ای مستقیم با طولی در حدود ۶۰cm و قطر ۳۲mm ، و سطلی تقریباً با ۵۰cm ارتفاع . بهتر است آزمایش را دو بار انجام داد : بار اول به سرعت برای آشنا شدن با آن ، و بار دوم با دقت و به آرامی . نتیجه های به دست آمده در ۲۳°C و با استفاده از بسامدهای موجود در مرجع شماره ی ۷ ، در جدول ۱ نشان داده شده اند .

چون $\lambda = 2\Delta L = v/f$ ، طرح نمودار $\Delta L$ برحسب $1/f$ (نگاه کنید به شکل ۲) باید خط مستقیم با شیب $v/2$ باشد . با استفاده از نرم افزار "Curve Fitting" (برای مثال LAB Fit) چنین به دست می آوریم : $v = (344 \pm 3)\,m/s$ . که با مقدار پیش بینی شده های $v = 345\,m/s$ برای $T = 296K$ سازگاری خوبی دارد .

## توضیح

این آزمایش را چند دانش آموز در خانه انجام دادند . اختلاف مقادیر به دست آمده کم تر از ۵درصد و خیلی نزدیک به مقدار پیش بینی شده در بالا بود . بنابراین نتیجه می گیریم که این آزمایش ساده ، عملی و روش دقیقی برای تعیین سرعت صوت در هواست .

زیرنویس :

1. Resonances
2. Warden

منبع :

The physics Teacher Vol 43, April 2005

مراجع :

1. R. Sutton, Demonstration Experiments in Physics (Mc-Graw-Hill, New York, 1938), P. 169.
2. Jim Warden, "Measuring the speed of sound without plumbing", to be published in TPT, May 2005.
3. For example, Brian E. Martin, "Measuring the speed of sound-Variation on a familiar theme, - "Phys. Teach. 39, 424 (Oct. 2001)
4. Rand S. Worland and D. David Wilson, "The speed of sound in air as a function of temperature", Phys. Teach. 37, 53 (Jan. 1999)
5. David Potter, "The speed of sound in an iron rod", Phys. Teach. 40, 56 (Jan. 2002)
6. Test Tone Generator (TTG) soft ware, online at http://www.esser.u-net.com/ttg.htm.
7. wav files online at http://www.dfcct.hpg.com.br/freq.html.
8. LAB Fit curve fitting software, online at http://www.angelfire.com/rnb/labfit.
9. Clifford E. Swarrz, Teaching Introductory Physics (American Institute of Physics, Woodbury, NY, 1997), P. 327. PACS codes: 43.85.51.40

# فیزیک کوانتومی و ثابت پلانک

سیده زهره دودمانی


## چکیده

در دنیای فیزیک تحولات زیادی رخ داده است و در آغاز قرن بیستم، تحولات چشمگیری به شکل گیری فیزیک کوانتومی انجامید که در پی نارسائی هایی در توجیه بعضی پدیده‌های تجربی به‌وجود آمد. در این مقاله سعی شده است که با بیان تاریخچه‌ی مختصری از شکل گیری فیزیک کوانتومی و افرادی که در این تحولات سهم به سزایی داشته‌اند، به بررسی یکی از ثابت‌های بنیادی بپردازیم که با فیزیک کوانتومی متولد شد: «ثابت پلانک» که پلی بین موج و ذره است. همین طور پرسش‌هایی که در مورد یک ثابت بنیادی مطرح می‌شوند: این که آیا یکتاست و آیا نسبت به زمان ثابت است یا نه. و همچنین به این پرسش پاسخ داده شده است که آیا کوانتوم منشأ کیهانی دارد یا نه؟


**کلیدواژه‌ها:** فیزیک کلاسیک، فیزیک کوانتومی، ثابت بنیادی، کمیت‌های کوانتومی، ثابت پلانک.

## ۱. آغاز فیزیک کوانتومی

اوایل قرن نوزدهم، بعضی از فیزیکدان‌ها بر این باور بودند که ساختار نظری فیزیک کامل است. اما در ربع آخر قرن نوزدهم، نتایج تجربی متنوعی به‌دست آمدند که به وسیله‌ی فیزیک کلاسیک قابل توجیه و تفسیر نبودند و با این توضیح، مکانیک کوانتومی به دنبال یک سلسله نارسایی‌ها در توجیه فیزیک ذرات خرد (ذرات در ابعاد اتمی) به وجود آمد. می‌توان آغاز نظریه‌ی کوانتومی را به زمانی مربوط دانست که به کمیت‌های فیزیکی مفهوم پیوستگی و ناپیوستگی نسبت داده شد. می‌توان گفت: بعضی از کمیت‌ها به‌طور پیوسته تغییر می‌کنند و برخی دیگر به طور ناپیوسته، با قدم‌هایی که نمی‌توان آن را کوچک‌تر کرد. این قدم‌های غیرقابل تقسیم به تعریف جدیدی نیاز داشتند که در مورد بعضی از کمیت‌ها در فیزیک کلاسیک وجود نداشتند و به آن‌ها کوانتوم‌های بنیادی کمیت موردنظر گفته شد [۱].

تعداد زیادی شن را می‌توان وزن کرد و جرم آن‌ها را پیوسته دانست؛ گو این که ساختمان دانه‌ای شن اظهر من الشمس است. اگر اتفاقاً شن خیلی قیمت پیدا کند و برای توزین آن ترازوهای خیلی حساس به‌کار رود، باید متوجه این نکته بود که تغییرات جرم همیشه مضربی از جرم یک دانه شن است. جرم این دانه شن، کوانتوم بنیادی شن به شمار می‌رود. از این مثال دیده می‌شود که چگونه با زیاد کردن دقت در اندازه‌گیری می‌توان به سرشت ناپیوسته‌ی کمیتی پی برد که قبلاً پیوسته شمرده می‌شد. فکر اصلی نظریه‌ی کوانتومی را در یک جمله می‌توان به این صورت بیان کرد: باید فرض شود، بعضی از کمیت‌های فیزیکی که تاکنون پیوسته شمرده می‌شدند، متشکل از کوانتوم‌های بنیادی هستند. یکی از مهم‌ترین این کمیت‌ها انرژی است. در فیزیک کلاسیک، انرژی فاصله‌ی پیوسته‌ای از مقادیر را اختیار می‌کند، و یک سیستم می‌تواند هر مقدار انرژی را بگیرد یا از دست بدهد.

فکر کوانتوم انرژی را نخستین بار در آغاز قرن، **پلانک** مطرح کرد. پلانک پیشنهاد کرد، نوسانگری که تابش با فرکانس ν را

می‌دهد، به انرژی hν محدود است. پلانک این مقدار معین از انرژی را یک کوانتوم نامید (در لاتین واژه‌ی کوانتوم معنی «چه قدر» را می‌دهد). پلانک، ایده‌ی کوانتش انرژی را تنها در یک مورد، تابش جسم سیاه، وارد کرد. در طول سال‌های ۱۹۲۶-۱۹۰۰، مفهوم کوانتش انرژی به تدریج به تمام سیستم‌های میکروسکوپی تعمیم پیدا کرد. مفهوم کوانتش انرژی یک انحراف انقلابی از فیزیک کلاسیک بود و بسیاری از فیزیکدان‌ها تمایل زیادی به پذیرش این ایده نداشتند. یکی از بی‌میل‌ترین افراد، خود پلانک بود که خوی محتاط وی با کوانتش انرژی آزرده شده بود. در سال‌های بعد از ۱۹۰۰، پلانک بارها سعی کرد تا عبارت نظری توزیع بسامدها در تابش جسم سیاه را بدون به کار بردن کوانتش انرژی به دست آورد، اما موفق نشد. و بدین صورت، آزمایش‌هایی که مطرح شده بودند و با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند تا حد زیادی قابل درک شدند؛ مثل تابش جسم سیاه، اثر فوتوالکتریک، اثر کامپتون و طیف اتمی.

## ۲. تابش جسم سیاه

اگر تابش بر جسمی فرود آید، یا داخل آن می‌شود یا از سطح آن بازمی‌تابد. حال اگر جسمی تمام پرتوهای فرودی را، با هر طول موجی، بدون بازتاب یا عبور جذب کند، به آن جسم سیاه می‌گویند. فرض کنید دیواره‌های داخلی یک حفره را جسم سیاه تشکیل دهد و در این حفره منفذ کوچکی ایجاد کنیم. در این صورت، تابشی را که از حفره به بیرون گسیل می‌شود، «تابش جسم سیاه» می‌گویند. این تابش کاملاً همگن و همسانگرد است. طبق قانون دوم ترمودینامیک، دیوارهای چنین حفره‌ای علاوه بر جذب کامل باید تابش نیز داشته باشد، در غیر این صورت می‌توان بدون انجام هیچ گونه کاری، با قرار دادن جسمی در چنین حفره‌ای، گرما را از جسم سرد به جسم گرم منتقل کرد. در فیزیک کلاسیک، چگالی انرژی تابش گسیل شده از جسم سیاه، با دو نظریه‌ی متناقض مجزا توصیف می‌شود. قانون ریلی ـ جینز، توجیهی برای آزمایش‌هایی در ناحیه‌ی تابش طول موج بلند و قانون وین، توجیهی برای ناحیه‌ی تابشی طول موج کوتاه فراهم می‌کند. پلانک با معرفی ثابت جدید h موفق به یافتن پلی بین این دو شد. قانون تابش پلانک شامل تمام ناحیه‌ی بسامدی می‌شود و دو قانون تابشی دیگر را به صورت حالت‌های حدی خاص دربر می‌گیرد. از نظر تاریخی، این شروع مکانیک کوانتومی بود [۲].

## ۳. ثابت پلانک

ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ میلادی، فرمول خود را برای توصیف طیف تابشی جسم سیاه ارائه کرد و دو ماه بعد، در ۱۴ دسامبر سال ۱۹۰۰، مقاله‌ای نوشت و در آن توضیح داد، اتم‌های جسم سیاه که با بسامد ν نوسان می‌کنند، هرکدام دارای انرژی به اندازه‌ی hν هستند. این عبارت، «کوانتوم انرژی» نام گرفت و بدین ترتیب، h وارد دنیای فیزیک شد. به عنوان یکی از ثابت‌های بنیادی، در واقع این ثابت پایه‌ای برای کوانتش به حساب می‌آید. پس از آن، فیزیکدان فرانسوی، **لویی دوبرویی**، در سال ۱۹۲۴ ثابت پلانک را درفرمول $\lambda = \frac{h}{p}$ به کار برد که λ یک کمیت موجی و P یک کمیت ذره‌ای است و بین دو کمیت موجی و ذره‌ای ارتباط برقرار می‌کند. یکای h در دستگاه SI ژول در ثانیه (SI) و همچنین از جنس تکانه‌ی زاویه‌ای است. اولین تخمین عددی h توسط خود پلانک $h = 6/55\times10^{-34}$ Js محاسبه شد. در سال ۱۹۱۴، فیزیکدان آمریکایی، **رابرت میلیکان**، مقدار آن را توسط اثر فوتوالکتریک اندازه گرفت و مقدار $h = 6/626\times10^{-34}$ Js را به‌دست آورد. در سال ۱۹۶۹، گروه CODATA مقدار ثابت‌های بنیادی را به طور دقیق محاسبه و گزارش کرد [۳]. در این فهرست که در سال ۱۹۷۳ ارائه شد، طبق آخرین گزارش دقیق، h به اندازه‌ی $h = 6/6265754\times10^{-34}$ Js گزارش شد.

## ۳ـ۱. آیا ممکن است h با زمان تغییر کند؟

قبل از پاسخ به این پرسش طرحی را مطرح می‌کنیم که بیان می‌کند: آیا ممکن است ثابت‌های فیزیکی به کُندی و برحسب زمان تغییر کنند؟ ابتدا **اچ ویل** به این نکته توجه کرد که عدد بزرگ و بدون بعدی از مرتبه‌ی $10^{40}$ وجود دارد که می‌توان آن‌را از قانون **کولن** و گرانش **نیوتون** به دست آورد:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}\ ,\ F_G = \frac{Gm_em_p}{r^2}$$

$$\frac{F_e}{F_G} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{Gm_em_p} \sim 10^{40} \qquad (1)$$

به راحتی مشاهده می‌شود که فرمول براساس برهم‌کنش‌های الکتریکی و گرانشی بین یک الکترون به جرم $m_e$ و یک پروتون به جرم $m_p$، در اتم ساده‌ی هیدروژن بیان شده است. این عدد را می‌توان از راه‌های دیگری نیز به دست آورد. مثلاً از تقسیم شعاع کیهان بر شعاع اتم هیدروژن. **دیراک** گفت که ممکن است، برخی از ثابت‌های بنیادی با زمان کیهانی تغییر کنند. یکای زمان هسته‌ای را به صورت حاصل تقسیم شعاع هسته بر سرعت نور به دست می‌آوریم که تقریباً $10^{-23}$ می‌شود. پس داریم:

$$\frac{\text{سن عالم}}{\text{واحد زمان هسته‌ای}} \frac{10^{17}}{10^{-23}} = 10^{40} \qquad (2)$$

که در آن، سن عالم به طور خطی با زمان تغییر می‌کند. دیراک مطرح کرد که اگر بقیه‌ی کمیت‌ها در رابطه‌ی (۱) ثابت باشند، در رابطه‌های (۱) و (۲) بزرگی ثابت گرانش عمومی G به صورت $\frac{1}{t}$ کاهش می‌یابد.

## ۳ـ۲. آیا ثابت پلانک یکتاست؟

در زمان معرفی ثابت پلاک، این ثابت یک ثابت جهانی، و مقیاسی یکتا برای کوانتش فرض شده بود. **فیشباخ، گرین و هوگز** در تحقیقاتی که در سال ۱۹۹۱ به چاپ رساندند، بیان کردند: «منطقی به نظر نمی‌رسد که امکان وجود ثابت‌های کوانتش مجزا در حوزه‌های متفاوت فیزیک رد کنیم.» و به این ترتیب چهار ثابت پلانک مجزا، فرضی را به صورت $h_e$، $h_p$، $h_\gamma$ و $h_n$ در نظر گرفتند که به ترتیب به الکترون، پروتون، فوتون و نوترون مربوط می‌شدند. نکته‌ی کلیدی، پیداکردن یک کمیت بدون بعد بود که ترکیبی از ثابت‌های بنیادی باشد و برای آزمایش‌های با دقت بالای متفاوت، این امکان را بدهد که ثابت‌های پلانک مجزا را بتوان از آن بیرون کشید. ثابت ساختار زیر برای برهم کنش‌های الکترومغناطیسی است:

$$\alpha = \frac{e^2}{2hc\varepsilon_\circ}$$

همین‌طور $\alpha$ را از راه‌های متفاوت می‌توان تعریف کرد. اولین شکل ارائه به صورت زیر است:

$$\alpha_1 = \frac{e^2}{2h_e c\varepsilon_\circ} = \frac{\mu . c}{2R_H} \qquad (3)$$

که شامل ثابت پلانک الکترونی است و $R_H$ مقاومت هال است. شکل دیگری از $\alpha$ که آن را $\alpha_2$ نوشته‌ایم، به صورت زیر است:

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{2}{C}\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_\circ^2 c h_e^2}\frac{m_n}{m_p}\frac{h}{m_n}} \qquad (4)$$

عبارت دوم، ثابت **ریدبرگ** ($R_\infty$) است. می‌بینیم که به ازای $h = h_e$، $\alpha_1 = \alpha_2$ خواهد شد. در سال ۱۹۸۹، نسبت $\frac{h_n}{m_n}$ با دقت بالا اندازه‌گیری شد: $\frac{h_n}{m_n} = 3/956033 \times 10^{-7} (m^2 s^{-1})$. و بدین ترتیب می‌توانیم در رابطه‌ی (۴) فرض کنیم: $h = h_n$. نسبت $\frac{(4)}{(3)}$ مفید است، زیرا به ما اجازه می‌دهد که کمیت‌های متفاوتی را در رابطه‌ی (۳) اندازه‌گیری کنیم. برای مساوی گرفتن h با $h_n$ در رابطه‌ی (۴)، $\alpha_2$ را به صورت زیر ساده می‌کنیم:

$$\alpha_2 = \frac{e^2}{2\varepsilon_\circ hc}\sqrt{\frac{h_n}{h_e}} \qquad (5)$$

$$\frac{h_n}{h_e} = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^2 \qquad (6)$$

اگر در جهان تنها یک ثابت کوانتش وجود داشته باشد، نسبت $\frac{h_n}{h_e}$ دقیقاً باید برابر واحد باشد. و این موضوع با محاسبه‌ی $\alpha_2$ از (۴) و $\alpha_1$ از قسمت دوم $\alpha_2$ تأئید می‌شود. با استفاده از اطلاعات CODATA در سال ۱۹۸۶، $\alpha_1^{-1} = 137/035999$، $\alpha_2^{-1} = 137/036003$ و از (۶) سرانجام به دست می‌آوریم:

$$\frac{h_n}{h_e} = 1 - 7 \times 10^{-8} \qquad (7)$$

فشباخ همچنین توصیح داد که $\alpha_2$ تابعی از $h_\gamma$ است و نسبت‌های $\frac{h_e}{h_\gamma}$ و $\frac{h_n}{h_\gamma}$ را با اطلاعات موجود براورد کرد. نتیجه بسیار شبیه به رابطه‌ی (۷) بود که به روشنی دیده می‌شود، مقدار کسرشده از یک بسیار کوچک‌تر است. بنابراین، نتیجه به طور دقیق مقدارهای مورد نیاز h را می‌دهد. با محدودیت‌های دقت تجربی می‌بینیم که می‌توان ثابت پلانک را جهانی و اندازه‌ای یکتا برای کوانتش فرض کرد [۴].

## ۳ـ۳. آیا کوانتش منشأ کیهانی دارد؟

این مطلب تیتر مقاله‌ای بود که در سال ۱۹۹۷، فیزیکدان مشهور ایتالیایی، **اف کالوگرو** مطرح کرد. فرض اصلی مقاله‌ی او این است که منشأ کوانتش، به دنبال وجود برهم کنش کاتوره‌ای زمینه‌ی کیهانی مطرح شد که روی همه‌ی ذرات جهان اثر می‌گذارد. اصطلاح کاتوره‌ای معمولاً در حالتی تعریف می‌شود که با احتمال یکسان برای ذرات متفاوت روی می‌دهد. ساده‌ترین مثال برای این موضوع حرکت جسمی کوچک است که در آب معلق باشد. این جسم از راه‌های کاتوره‌ای از جهت‌های مختلف توسط ذرات آب بمباران می‌شود.

مهم‌ترین فرض‌های کالوگرو عبارتند از:

۱. برهم کنش جهانی تمام ذرات، گرانشی است و این مسأله با هندسه‌ی فضا که ذرات در آن حرکت می‌کنند، تعیین می‌شود.

۲. برهم کنش گرانشی یک برهم کنش دور ـ برد است و هر ذره با تمام ذرات دیگر کیهان برهم کنش می‌کند.

۳. عالم ساختار ذره‌ای دارد که مؤلفه‌های اصلی آن ذرات

هستند.

۴. هر ذره در جهان، مانند ذره‌ی گاز، به صورت بی‌نظمی حرکت می‌کند که از مکانیک کلاسیک به دست می‌آید.

نتیجه‌ی این فرض‌ها چنین است که هر ذره با شتاب گرانشی نسبت به ذرات باقی‌مانده‌ی کیهان در حرکتی بی‌نظم است.

همه‌ی این‌ها می‌توانند به تخمین عددی مقدار h تبدیل شوند. در نهایت، h را انرژی زمان در نظر گرفت و رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کرد:

$$h = \varepsilon\tau \qquad (۸)$$

که در آن، $\varepsilon$ میانگین انرژی هر ذره، و $\frac{۱}{\tau}$ میانگین بسامد غیرقابل پیش‌بینی حرکت کاتوره‌ای هر ذره است. روش کار این است که هر دو کمیت‌ها را به طور کامل با استفاده از مشخصه‌های کیهانی آن‌ها تعیین کنیم. اگر عالم را سطحی کروی با شعاع R و جرم M در نظر بگیریم، حجم آن $V = \frac{۴}{۳}\pi R^۳$، و چگالی آن $D = \frac{M}{V}$ می‌شود. پس داریم:

$$R = \left(\frac{۳M}{۴\pi D}\right)^{\frac{۱}{۳}} \qquad (۹)$$

هر ذره‌ای به جرم m، برهم کنش گرانشی با زمین دارد و با استفاده از قانون دوم نیوتون می‌توان نوشت:

$$m\frac{d^۲r}{dt^۲} = G\frac{mM}{r^۲}$$

با قراردادن r به جای R و t به جای $\tau$ و مشتق دوم $\frac{R}{T^۲}$، داریم:

$$\frac{R}{T^۲} \approx \frac{GM}{R^۲}$$

و در نتیجه:

$$T = \left(\frac{R^۳}{GM}\right)^{\frac{۱}{۲}} = \left(\frac{۳}{۴\pi DG}\right)^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۰)$$

حال می‌توان سرعت را به صورت $V = \frac{R}{T}$ تعریف، و انرژی گرانشی کل E عالم را براورد کرد.

$$E \approx MV^۲ = M\left(\frac{R}{T}\right)^۲ = G\frac{M^۲}{R}$$
$$= \left(\frac{۴}{۳}\pi DG^۳M^۵\right)^{\frac{۱}{۳}} \qquad (۱۱)$$

از تقسیم انرژی بر تعداد کل ذرات عالم، N را که کمیت اول در رابطه‌ی (۸) است، به دست می‌آوریم:

$$\tau \approx \frac{T}{N^{\frac{۱}{۲}}}$$

حالا از معادله‌های (۸)، (۱۱) و (۱۲)، چند فرم برای h به دست می‌آوریم. ساده‌ترین آن به صورت زیر است:

$$h \approx \left(\frac{GM^۲R}{N^۳}\right)^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۳)$$

که در آن، M جرم جهان و N تعداد کل ذرات است. حال با استفاده از جرم اتم هیدروژن $m = \frac{M}{N}$ و داریم:

$$h \approx (GRm^۲)^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۴)$$

تنها کمیت کیهانی که در این جا به کار رفته، شعاع کیهان است که یک تخمین شناخته شده $R \cong ۱۰^{۲۶\pm۲}$ است. با قراردادن $G = ۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\,m^۳kg^{-۱}s^{-۲}$ و $m = ۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}\,kg$ سرانجام خواهیم داشت:

$$h \approx ۶\times۱۰^{-۳۳\pm۱}\,kgm^۲s^{-۱} \qquad (۱۵)$$

که به صورت غیرمنتظره‌ای نزدیک به مقدار دقیق $h = ۶/۶۲۶۰۷۵۵\times۱۰^{-۳۴}\,kgm^۲s^{-۱}$ است که از اندازه‌گیری‌ها به دست آمد [۵].

## ۴. نتیجه‌گیری

فیزیک کوآنتومی در پی پیدایش مفاهیم جدیدی همچون ویژگی‌های ذره‌ای تابش، ویژگی‌های موجی ماده و کوآنتیدگی کمیت‌های فیزیکی به وجود آمد. ثابت پلانک ثابت جدیدی بود که پلانک برای ارائه‌ی قانون تابشی جسم سیاه از آن استفاده کرد و این ثابت پلی بین دو قانون وین و ریلی ـ جینز شد. همچنین این ثابت، دوبروی را قادر ساخت که دو کمیت موجی طول موج و ذره‌ای تکانه را در رابطه‌ی معروف خود به هم مربوط می‌سازد. سرانجام در این مقاله نشان دادیم که ثابت پلانک به کندی با زمان تغییر می‌کند و ثابتی جهانی و اندازه‌ی یکتا برای کوآنتش است. همچنین، با فرض‌های کالوگرو می‌توان به کوآنتش، منشأ کیهانی نسبت داد.


مراجع:

۱. اینفیلد، لئوپولد. تکامل فیزیک. احمد آرام. شرکت سهامی انتشارات خوارزمی. ۱۳۶۱. صفحه‌های ۲۱۶ـ۲۱۴.

۲. گرایبز، مکانیک کوانتومی. حمیدرضا مشفق. نشر کتاب دانشگاهی. ۱۳۷۸. صفحه‌های ۱۲ـ۱۰.

3. www.history.mcs.st-and.ac.uk/history/mathematicians/planck.html.

4. Adam J Makowski century of the planck constant, teaching physics, 35, 2000.

5. Calogero, F. (1997). Cosmic origin of quantization phys. lett A 228.

# اثر لختی بر پاره شدن نخ

سعید سرابی دانش

روزی برای تهیه‌ی شیرینی به شیرینی فروشی رفتم. پس از سفارش شیرینی مورد نظرم، شیرینی فروش مشغول قرار دادن آن در جعبه و سپس بسته‌بندی آن شد. برای پاره کردن نخ شیرینی که به دور جعبه‌ی شیرینی بسته بود، قیچی یا وسیله‌ی برنده‌ی دیگری در اختیار نداشت. چند دور نخ را به دور انگشت اشاره‌ی دست چپ خود پیچید و سپس با دست راست خود، نخ را به سرعت کشید و نخ پاره شد. به نظرم عجیب آمد، زیرا نخ پلاستیکی که در شیرینی فروشی‌ها به کار می‌رود، حتی با اعمال نیروهای بزرگ هم پاره نمی‌شود. ولی به طور جدی به دنبال یافتن علت این پدیده نبودم. تا این که در مطالعه‌ی کتاب «مبانی فیزیک» **هالیدی** [هالیدی و رزنیک، ۱۳۶۹]. به این پرسش برخوردم:

«جسمی به جرم m به وسیله‌ی ریسمان C از سقف آویخته شده و ریسمان D هم به قسمت پائین آن وصل شده است (نمودار ۱). اگر به ریسمان D تکان شدیدی بدهید، پاره می‌شود، ولی اگر آن را به آرامی بکشید، C پاره می‌شود. علت را توضیح دهید.»

در واقع این پرسش همان مورد بالا را با گفتمان رایج در کتاب‌های درسی فیزیک پی‌جویی می‌کند. پس به بررسی و پاسخگویی این پرسش می‌پردازیم.

به جرم m نیروهای $\vec{T}_1$ (نیرویی که ریسمان D به آن وارد می‌کند)، $\vec{T}_2$ (نیروی کشش ریسمان C) و $\vec{W}$ (نیروی وزن) اثر می‌کنند (نمودار ۲). قانون دوم نیوتن را برای جرم m می‌نویسیم:

$$\vec{T}_1+\vec{T}_2+\vec{W}=m\vec{a} \qquad (1)$$

هنگامی که ریسمان D به طرف پائین کشیده می‌شود، جهت شتاب هم به طرف پائین است. بنابراین می‌توان رابطه‌ی (۱) را به صورت نرده‌ای نوشت:

$$T_1 - T_2 + W = ma$$

و یا:

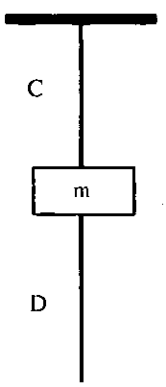
$$T_1 - T_2 = ma - W \qquad (2)$$

در این‌جا ریسمان‌های C و D بدون جرم فرض شده‌اند. بنابراین، نیروهای دیگری در نظر نمی‌گیریم. هنگامی که ریسمان D به آهستگی کشیده می‌شود، جرم m تقریباً در حال سکون است؛ یعنی شتاب آن بسیار ناچیز است. در نتیجه رابطه‌ی (۲) به صورت زیر درمی‌آید:

$$T_2 - T_1 = W \qquad (3)$$

در این حالت، مقدار نیروی کشش ریسمان C، همواره به اندازه‌ی نیروی وزن جسم آویخته، از نیروی کشش ریسمان D بزرگ‌تر است. با افزایش تدریجی $T_1$، $T_2$ نیز به همان میزان افزایش می‌یابد تا از تفاضل آن‌ها، مقدار ثابت W باقی بماند. تا این که $T_2$ به مقدار $T_2$ (آستانه‌ی پاره شدن ریسمان) می‌رسد و ریسمان C پاره می‌شود (نمودار ۳).

هنگامی که ریسمان D به تندی کشیده می‌شود، این پدیده به صورت کاملاً متفاوتی در می‌آید. در این حالت، طول ریسمان C بی‌درنگ زیاد می‌شود تا با افزایش نیروی $T_2$ بتواند، کشش ریسمان C را تأمین کند. بنابراین در زمانی کوتاه، در حین کشش ریسمان D که به پاره شدن آن منجر می‌شود، جرم m به طرف پائین شتاب پیدا



می‌کند. هر چه نیروی $T_1$ بزرگ‌تر باشد، شتاب a هم بیش‌تر خواهد بود. در این حالت، کشش $T_1$ بزرگ‌تر از نیروی کشش ریسمان C، یعنی $T_2$ است. با توجه به رابطه‌ی (۲)، اگر ma>W باشد، $T_1 > T_2$ است. پس هنگامی که شتاب وزنه بیش‌تر از شتاب گرانشی g باشد، کشش ریسمان D بزرگ‌تر از کشش ریسمان C است.

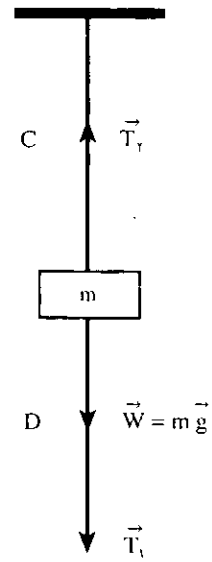
باید توجه داشت، گرچه جابه‌جایی وزنه (افزایش طول ریسمان C) بسیار کوچک است، ولی شتاب آن می‌تواند بسیار بزرگ باشد؛ زیرا جرم m در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاهی این شتاب را پیدا می‌کند. با توجه به نمودار ۳، هنگامی که کشش $T_1$ به سرعت افزایش می‌یابد، مقدار آن خیلی زود به $T_2$ (آستانه‌ی پاره شدن ریسمان) می‌رسد که موجب پاره شدن ریسمان D می‌شود. در این حالت، کشش ریسمان C با آهنگ بسیار کندتری افزایش می‌یابد. باید به این واقعیت توجه کرد که بلند بودن ریسمان C، در آزمایش نقش مهمی را بازی می‌کند. اگر چه افزایش طول این ریسمان بسیار کوچک است، اما باعث افزایش نیروی کشش $T_2$ به میزان لازم می‌شود.

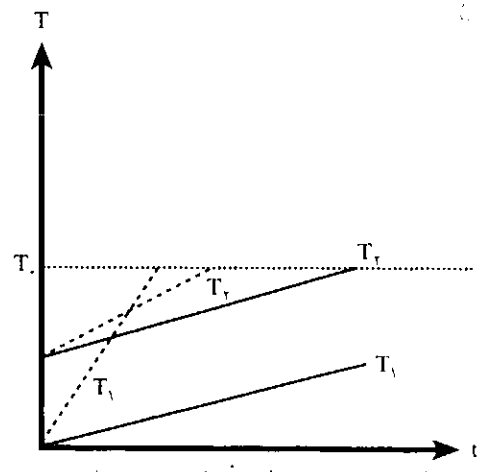
در حالتی که ریسمان D به تندی کشیده می‌شود، هنگام بلند بودن ریسمان C، کشش $T_1$ به مقدار حدی $T_2$ می‌رسد. لختی جرم آویخته، از حرکت سریع آن جلوگیری می‌کند. به بیان دقیق‌تر، نیروی بزرگی لازم است تا باعث حرکت سریع جرم m شود که ریسمان D قادر به تأمین آن نیست. تجربه نشان می‌دهد برای این‌که آزمایش با موفقیت انجام شود، لازم است ریسمان C به حد کافی بلند باشد.

در پایان، پدیده‌ای را که ابتدا به آن اشاره شد، با این آزمایش شبیه‌سازی می‌کنیم. نخ پلاستیکی که در قنادی‌ها برای بسته‌بندی به کار می‌رود، نقش ریسمان بلند C را بازی می‌کند (دوک این نخ معمولاً سنگین است و می‌توان فرض کرد که این نخ، محکم به نقطه‌ای بسته شده است). همچنین، انگشت اشاره‌ی سمت چپ شیرینی‌فروش، همانند جرم m عمل می‌کند و در نهایت قسمتی از نخ که به سرعت کشیده و پاره می‌شود، همان ریسمان D است. بنا بر آنچه گفته شد، کشیدن سریع ریسمان D باعث پاره شدن آن می‌شود.

**یک نکته‌ی آموزشی**: پدیده‌هایی که در زندگی روزمره اتفاق می‌افتند، اغلب اوقات پیش پا افتاده و بی اهمیت به نظر می‌رسند، در صورتی که دارای مفاهیم عمیق علمی و کاربردهای عینی هستند. چه خوب است در کتاب‌ها و کلاس‌های فیزیک، در هر سطحی (مقدماتی، پیشرفته و عالی) به این موارد گریزی زده شود تا قانون‌های فیزیک، از فضایی مجرد و انتزاعی به محیطی ملموس آورده و بیش‌تر قابل درک و فهم شوند.

**پرسش**: گاهی اوقات وقتی هندوانه می‌خریم، فروشنده آن را در کیسه‌ای پلاستیکی می‌گذارد و تحویل می‌دهد. اگر کیسه را به آرامی برداریم و حمل کنیم، دسته‌ی کیسه نازک و در نهایت پاره می‌شود (البته هنگامی که هندوانه سنگین باشد و مسافتی که آن را حمل می‌کنیم، طولانی باشد). اما اگر کیسه را به سرعت برداریم، ته کیسه پاره می‌شود و هندوانه می‌افتد. آیا این پدیده به موردی که بررسی کرده‌ایم ربطی دارد؟ توضیح دهید.




خط‌های راست مربوط به کند کشیدن ریسمان و خط چین‌های راست مربوط به تند کشیدن ریسمان هستند.


مراجع:

۱. هالیدی، دیوید و رزنیک، رابرت. مبانی فیزیک. ترجمه‌ی نعمت‌الله گلستانیان و محمود بهار. ۱۳۶۹.

۲. مجله‌ی گنجینه، شماره‌ی ۹، ص ۲۳.

3. Strelkov(1982). Mechanics.Mir.

تدریس فیزیک نوین

# بدفهمی‌هایی درباره‌ی فوتون

## که می‌تواند به شناخت آن آسیب برساند

**در فیزیک دوره‌ی دبیرستان و بالاتر، فیزیک نوین معمولاً با اثر «فوتوالکتریک» آغاز می‌شود. این نه‌تنها تصویر غلطی از نور ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند مانعی در شناخت عمیق ما از فیزیک کوانتومی باشد. بدیل‌هایی در این مورد پیشنهاد می‌شود.**

دیوید جی. سی. جونز[1]
مترجم: عبدالحسین بصیره

اخیراً درس‌های فیزیک چه در دبیرستان و چه در دانشگاه مورد بازنگری قرار گرفته‌اند. این بازنگری در مقیاس وسیع، مربوط به سطح تدریس این درس‌هاست. با این همه، باید درباره‌ی روش تدریس بخش‌های متفاوت درس نیز فکر کنیم.

«فیزیک نوین» حداقل باید دانش‌آموزان را با گنجینه‌ی ایده‌ها و مفاهیمی آشنا سازد که اساس فناوری نوین را تشکیل می‌دهند. هر دانشجوی فیزیک باید برداشتی از توان حیرت‌انگیز نظریه‌ی مکانیک کوانتومی داشته باشد. همین‌طور، شناخت مختصری از مسائل فلسفی که موفقیت مکانیک کوانتومی در دیدگاه ما نسبت به جهان را به وجود می‌آورد، سودمند است.

متأسفانه، اوضاع بدین‌گونه نیست. دانشجویان به جای گذر از مکانیک کلاسیک به مکانیک کوانتومی، اغلب اوقات با پیوند نامتجانسی روبه‌رو می‌شوند که بیش‌تر ترکیبی از آرا و نظریه‌های مطرح شده در سال‌های ۱۹۲۰ـ۱۹۰۰ است و ما به نام «نظریه‌ی کوانتومی قدیم» می‌شناسیم. این روال، مدل‌های خام و نادرست مفهومی را به وجود می‌آورد که مانع درک مطلب و ایجاد علاقه می‌شود. دلیل ظاهری این موضوع آن است که «فیزیک نوین»، بیش از آن‌که به صورت منطقی و استدلالی تدریس شود، فقط از نظر تاریخی بررسی می‌شود. این فرایند بی‌شک در حوزه‌های دیگر فیزیک اتفاق نمی‌افتد. مثلاً، در الکترومغناطیس از رهیافتی (نسبتاً) منطقی استفاده می‌کنیم که به معادله‌های ماکسول می‌انجامد و به بررسی دوباره‌ی استدلال‌های ماکسول و مدل‌های اتر و غیره نمی‌پردازیم.

اساس مسأله، وارد کردن زودهنگام اصطلاح «فوتون» و بن‌بست مفهومی است که این کار به وجود می‌آورد.

### راه ورود به «فیزیک نوین»

چون دانش‌آموزان معمولاً با این موضوع در سال آخر

دبیرستان روبه‌رو می‌شوند، در نتیجه برنامه‌ی درسی این دوره می‌تواند نشانه‌ای از برخورد با موضوع مورد بحث را دربرداشته باشد. آنچه در ادامه می‌آید، از برنامه‌ی درسی مدرسه‌های لندن در سال ۱۹۹۰ گرفته شده است که به غیر از مبحث رادیواکتیویته و اتم هسته‌ای، مبنای فیزیک نوین را تشکیل می‌دهد و شامل عنوان‌های زیر است:

- فوتون‌ها و ترازهای انرژی
- پایستگی انرژی برای امواج گسیل شده از چشمه‌ی نقطه‌ای در فضای آزاد. قانون عکس مجذوری
- اثر فوتوالکتریک
- فوتون‌ها: ثابت پلانک
- معادله‌ی فوتوالکتریک اینشتین
- طیف‌های گسیلی خطی

برنامه‌های درسی جاهای دیگر نیز بسیار شبیه این برنامه هستند. در هر صورت، دانش‌آموزان از مسیری تاریخی و از طریق کارهای **پلانک** و **اینشتین** به جهان فیزیک کوانتومی وارد می‌شوند. متأسفانه، به استثنای اشاره‌ای مختصر به ترازهای انرژی، از این حد فراتر نمی‌روند. وقتی این دانش‌آموزان وارد دانشگاه می‌شوند، شروع کار فرق زیادی با این برخورد ندارد. برای مثال، به نقل قول از کتاب **جکسون**[۲] چاپ ۱۹۸۹ می‌پردازیم:

«اینشتین... فرض‌های زیر را مطرح کرد:

۱. تابش الکترومغناطیسی با بسامد $\nu$، از کوانتوم‌های انرژی به نام **فوتون‌ها** تشکیل شده است که دارای انرژی $E = h\nu$ هستند و با سرعت نور حرکت می‌کنند.

۲. در اثر پدیده‌ی فوتوالکتریک، الکترون به‌طور کامل فوتون را جذب می‌کند.»

در پایان یک دوره‌ی مقدماتی، دانشجویان احتمالاً با مفهوم معروف «دوگانگی موجی ـ ذره‌ای» کار را به پایان می‌رسانند:

«بنابراین، الکترون‌ها گاهی رفتار موجی دارند و گاهی رفتار ذره‌ای: نور گاهی رفتار ذره‌گونه دارد و گاهی رفتار موج‌گونه. تنها چیزی که لازم داریم، نسخه‌ای است که به ما بگوید رفتار (الکترون یا نور) در هر مورد چیست.»

این خط فکری هیچ سرنخی برای توسعه‌ی مفهومی که مکانیک کوانتومی به آن نیاز دارد، در اختیار نمی‌گذارد. در بهترین حالت، وقتی این دانشجویان به درس مکانیک کوانتومی می‌رسند، درمی‌یابند که باید همه چیز را از اول شروع کنند. چه‌بسا به این فکر بیفتند که چرا از این «فوتون» حیاتی سخنی به میان نمی‌آید و تا رسیدن به سال‌های بالاتر دوره‌ی کارشناسی و حتی کارشناسی ارشد، مفهومی فرعی باقی می‌ماند. نظری اجمالی به هر کتاب درسی عالی مکانیک کوانتومی نشان می‌دهد که واژه‌ی فوتون، چند بار در فصل‌های اول یا مقدماتی ظاهر می‌شود، ولی بعداً به زحمت می‌توان آن را یافت (برای مثال نگاه کنید به: **رای**[۳]، ۱۹۸۵).

در کتاب **شیف**[۴] این واژه حتی در نمایه‌ی کتاب نیز نیامده است. طُرفه آن که هر چه کتاب در سطح بالاتری باشد، این کلمه دیرتر ظاهر می‌شود. در کتاب **مکانیک کوانتومی بالنتاین**[۵] (۱۹۹۰) تنها رجوع در این مورد، بین صفحه‌های ۴۰۰ تا ۴۵۲ است.

این پارادوکس از آن‌جا به وجود می‌آید که آنچه در دبیرستان مفهوم اساسی «فیزیک نوین» است، در دانشگاه بی‌مقدمه کنار گذاشته می‌شود. در واقع، دانشجو با شروع مکانیک کوانتومی مقدماتی، به این نتیجه می‌رسد که معادله‌ی فوتوالکتریک اینشتین اگر چه بدون شک دلیل کوانتیده بودن انرژی است، اما بی‌تردید دلیل کوانتیده بودن میدان الکترومغناطیسی نیست! این ایده هنوز از نظر بسیاری از کسانی که فیزیک نوین را به صورت سنتی درس می‌دهند، نوعی بدعت است.

مؤلف هنوز شوک فرهنگی حاصل از مقاله‌ی ماندگار **لمب**[۶] با عنوان «**نظریه‌ی یک میزر اپتیکی**» (۱۹۶۴) را به‌خاطر دارم؛ نظریه‌ی بسیار کامل و موفق لیزر بدون این‌که واژه‌ی «فوتون» حتی یک بار در آن ظاهر شود! باور کردنی نیست!

## اینشتین و کوانتیده کردن تابش

به راحتی می‌توان حدس زد که چرا اصل فوتوالکتریک، قهرمان اصلی این صحنه است. آزمایش (اصولاً) بسیار ساده است و نتیجه‌های آن چشمگیرند. دانشجویان می‌توانند تصویر کارتونی اینشتین را مجسم کنند که روی دستگاه اندازه‌گیری خم شده است و فریاد می‌زند: «آه، انرژی الکترون تابع بسامد است، نه شدت!»

واقعیت بسیار متفاوت‌تر و جالب‌تر است. در سال‌های ۱۹۰۰ـ۱۸۹۵ پلانک مسأله‌ی طیف تابش جسم سیاه را بررسی و به صورت تجربی پیشنهاد کرد، تنها راه سازگاری طیف اندازه‌گیری شده با طیف نظری آن است که چشمه‌های میدان تابش را نوسانگرهای مستقل با انرژی‌های کوانتیده به صورت مضرب صحیح $h\nu$ در نظر بگیریم.

اینشتین در مقاله‌ی سال ۱۹۰۵ خود که برنده‌ی جایزه‌ی نوبل فیزیک شد، بررسی کرد که چگونه تابش حاصل از این «مشددهای پلانک» می‌تواند با آن‌ها در تعادل باشد. او با توجه به آنتروپی دستگاه و شباهت آن با آنتروپی یک گاز مولکولی، به این نتیجه رسید که **از نظر ویژگی‌های ترمودینامیکی**، تابش تکفام باید با محیط ناپیوسته‌ی متشکل از کوانتوم‌های انرژی مستقل هم‌ارز باشد. اثر فوتوالکتریک صرفاً به صورت یکی از پیامدهای این تحلیل ارائه شده بود.

اینشتین این کار را در مقاله‌ی مشهور ترمبال ۱۹۱۷ خویش توسعه داد و تعادل میان این میدان و گاز مولکولی را بررسی کرد. با فرض برقراری تعادل در دستگاه تابش و گسیل انرژی بین مولکول‌ها و میدان، و این که توزیع سرعت مولکول‌ها با آنالیز «ماکسوال ـ بولتزمن» سازگار باشد، انتقال انرژی و تکانه بین مولکول‌ها و میدان را بررسی کرد. این کار با جذب و گسیل برانگیخته‌ی تابش و با گسیل خودبه‌خود صورت می‌گرفت.

او رابطه‌ی بین احتمال‌های جذب و گسیل خودبه‌خود و نیز گسیل برانگیخته را به دست آورد. اصولاً، با استفاده از اصطلاحات جدید، او گذارهای اتمی‌ای را در نظر گرفت که هر یک از آن‌ها می‌توانستند در دو حالت انرژی $E_1$ و $E_2$ وجود داشته باشند که: $E_2 - E_1 = h\nu$. احتمال گذار بین تراز ۲ و تراز ۱ با گسیل خودبه‌خود از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$dW = A_{21}dt \qquad (1)$$

و احتمال هر یک از دو گذار بین ترازهای ۱ و ۲ با جذب انرژی از میدان یا گذار از تراز ۲ به تراز ۱، با جذب انرژی توسط میدان عبارت بود از:

$$dW' = B_{12}P(\nu)dt \qquad (2)$$

که $P(\nu)$ چگالی انرژی میدان بین بسامدهای $\nu$ و $\nu + d\nu$ است.

$A_{21}$ و $B_{12}$ احتمال گذار برای دستگاه اتمی معین است. ملاحظات تعادل محاسبه‌ی نسبت زیر را امکانپذیر می‌ساخت:

$$A_{21} / B_{12} = 8\pi h\nu^3 / c^3 \qquad (3)$$

اما هیچ نظریه‌ی اتمی برای پیش‌بینی مقادیر A و B وجود نداشت.

به نظر اینشتین، مهم‌ترین نتیجه از ملاحظات پایستگی تکانه به دست می‌آمد. اگر برای جذب یا گسیل، مقدار انرژی $h\nu$ از مولکول می‌گرفتند، یا به آن منتقل می‌کردند، تکانه‌ی منتقل شده $h\nu/c$ بود. پایستگی تکانه ایجاب می‌کرد که هر فرایند جذب یا گسیل، جهتی باشد.

این موضوع دو پیامد داشت: پیامد اول که از لحاظ نظری دردسر کم‌تری را به وجود می‌آورد، این بود که در فرایند گسیل برانگیخته‌ی تابش، تابش گسیل شده باید با تابشی که باعث برانگیختگی می‌شود، هم‌فاز و در یک جهت باشد (همین طور برای جذب). این نتیجه که در نظریه‌ی کلاسیک تابش کاملاً قابل قبول است، دوباره کشف شد و شالوده‌ی توسعه‌ی لیزر در سال‌های ۱۹۶۰ را تشکیل داد.

نتیجه‌ی تکان دهنده‌ی‌تر این بود که گسیل خودبه‌خود نیز، به جای این که جبهه‌ی موج کروی کلاسیک را تولید کند، باید فرایندی جهتی باشد. این نتیجه، و تنها این نتیجه، ضرورت نظریه کوانتومی تابش را به وجود آورد.

به طور خلاصه، اینشتین با شروع از ترمودینامیک کلاسیک و نظریه‌ی تابش، تصویر برهم‌کنش ماده و میدان تابش را به وجود آورد که پیامد تعریف تابشگر کوانتیده‌ی ابداعی پلانک بود. تصویر اساسی به‌وجود آمده به هیچ وجه نشان‌دهنده‌ی دگرگونی سازی نور به صورت «ذرات» کوچک دارای مکان معین نبود، بلکه می‌گفت، انتقال انرژی و تکانه بین میدان و تابشگر را می‌توان فقط با ملاحظات کوانتش این دو کمیت فیزیکی بیان کرد، و نه تمام موجودات دخیل در برهم‌کنش. همان طور که بعداً خواهیم دید، نتیجه‌ی حیاتی اثر فوتوالکتریک را می‌توان به راحتی از تصویر برهم‌کنش اتم کوانتیده با میدان کلاسیک به دست آورد. آنچه نمی‌توان به صورت متقاعدکننده‌ای انجام داد، پدیده‌ی گسیل خودبه‌خود است.

واژه‌ی «فوتون» در سال ۱۹۲۶ به عنوان بخشی از پیشنهاد ناموفق «پایستگی فوتون‌ها» مشابه پایستگی جرم وضع شد.

## توسعه‌ی مکانیک کوانتومی

نظریه‌ی اینشتین یکی از اجزای «نظریه‌ی کوانتومی قدیم» بود که به مکانیک کوانتومی انجامید که اکنون می‌شناسیم. شاید این فکر که امواج ویژگی‌های ذره‌ای دارند، رهنمون دوبروی به ویژگی «موج گونه‌ی» ذرات شده باشد؛ گرچه استدلال او هوشمندانه‌تر از این است (مانند مقاله‌ی دوبروی در ter Harr، ۱۹۶۷).

صحنه برای کار مشترک شرودینگر و هایزنبرگ، به صورت آنچه اکنون به نام مکانیک کوانتومی می‌شناسیم، آماده شد. معادله‌ی شرودینگر امکان به دست آوردن حالت‌های مانای ممکن ذرات در میدان نیرو را فراهم می‌سازد.

به صورت ساده‌ی یک بعدی:

$$Hu_n(x) = E_n u_n(x)$$

که در آن، $u_n(x)$ تابع حالتی است که احتمال یافتن ذره در x را تعریف می‌کند و $E_n$ انرژی این حالت است. H نیز عملگر انرژی است:

$$-(\hbar^2 / 2m)d^2 / dx^2 + V(x)$$

که در آن، $V(x)$ پتانسیل کلاسیکی است که ذره در آن قرار دارد. البته، برای مسائل وابسته به زمان، باید شکل کلی‌تر معادله‌ی شرودینگر را در نظر بگیریم:

$$H\Psi(x,t) = -i\hbar\partial\Psi(x,t) / \partial t$$

## نظریه‌ی تابش نیمه کلاسیک، بازگشت به اثر فوتوالکتریک

معادله‌ی شرودینگر کلید حل مسأله‌های بسیاری در فیزیک اتمی است. یکی از آن‌ها، محاسبه‌ی احتمال‌های جذب و گسیل

ـ ضریب‌های B اینشتین ـ است.

دستگاهی را با دو حالت مانای $u_1$ و $u_2$ در نظر بگیرید. اگر پتانسیل وابسته به زمان $V'$ که در مقایسه با $V$ کوچک است، اختلالی در دستگاه به وجود آورد. تابع حالت آن را می‌توان به صورت ترکیب خطی $u_1$ و $u_2$ نوشت:

$$a(t)u_1 + b(t)u_2$$

اگر در زمان $t=0$ داشته باشیم: $a(0)=1$ و $b(0)=0$، تغییرات زمانی a و b، محاسبه‌ی آهنگ گذار بین حالت‌های ۱ و ۲ را فراهم می‌سازد. سرانجام، اگر V چنان انتخاب شود که انرژی پتانسیل الکترون در اتم را مشخص کند، و $V'$ انرژی پتانسیل دربرهم کنش با میدان الکترومغناطیسی کلاسیک باشد، احتمال گذار ($W'$ اینشتین) به دست می‌آید. این نتیجه به «قانون طلایی فرمی» معروف است و معمولاً به دو مشکل بیان می‌شود.

برای دستگاه با دو تراز که با موج ناتکفام برهم کنش می‌کند، آهنگ گذار بین حالت‌های ۱ و ۲ از رابطه‌ی به دست می‌آید:

$$dW' = (1/\hbar^2)D^2P(\nu)dt \qquad (۴)$$

که D برای هر گذار، ثابتی است که با توابع موج دو حالت، و برهم کنش بین این دو بر اثر اختلال مشخص می‌شود.

گزاره‌ی هم ارز با آن برای موج ناتکفام، دربرهم کنش با دستگاهی که در آن حالت ۱ خوش تعریف و حالت ۲ یکی از حالت‌های پیوستار است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$dW' = (2\pi/\hbar^2)D^2P_e(E_2) \qquad (۵)$$

که $Pe(E_2)$ چگالی حالت‌های نزدیک به $E_2$ است.

تحلیل منتهی به این معادله‌ها، سرراست ولی دارای نکته‌های ظرف است. برخورد خوبی را می‌توان در «اتکینز»[۷] (۱۹۸۳) یافت.

اثر فوتوالکتریک حالت خاصی از این فرمولبندی دوم قاعده‌ی طلایی است. الکترون در یک حالت خوش تعریف مقید $E_1$، از تابش ناتکفام انرژی جذب می‌کند تا گذاری به حالت $E_2$ صورت گیرد که بخشی از یک پیوستار با حد پائین $E_0$ است. $E_0 - E_1$ کمینه‌ی انرژی لازم برای فرار الکترون از حالت مقید (تابع کار) است. $E_2 - E_0$ انرژی جنبشی الکترون آزاد شده خواهد بود.

این فرمولبندی معروف است، گرچه هنوز درباره‌ی آن بحث می‌شود. روش بالا نشان می‌دهد، این حکم بی‌قیدوشرط که آزمایش فوتوالکتریک وجود فوتون‌های ذره گونه‌ی جایگزیده در فضا را به نمایش می‌گذارد، بنیان فیزیک کوانتومی نیست. اگر انیشتین مقاله‌ی سال ۱۹۰۵ را ننوشته و لنارد[۸] آزمایش‌هایش را انجام نداده بود، تحولات منتهی به معادله‌ی شرودینگر می‌توانستند شکل دیگری به خود بگیرند، اما باز به همان نتیجه‌ی نهایی می‌رسیدند.

بنا کردن همه چیز بر پایه‌ی «فوتون» نه تنها ساده انگاری است، بلکه تصویری غلط در ذهن دانشجویان فیزیک به وجود می‌آورد که اگر بتوان، باید در مرحله‌های بعد از ذهنشان خارج ساخت.

## چه موقع به فوتون‌ها نیاز داریم؟

درست نیست که فکر کنیم هرگز به کوانتیده کردن میدان الکترومغناطیسی نیاز نداریم. بدیهی است که چون فرض **اصلی** ما سرشت کوانتیده‌ی انتقال انرژی است، کوانتیده بودن را باید در مورد انژری امواج الکترومغناطیسی نیز اعمال کنیم. این مطلب را نیز می‌توان بر حسب نظریه‌ی اینشتین بیان کرد.

دیدیم که چگونه می‌توان احتمال‌های گذار برای جذب و گسیل برانگیخته‌ی تابش را محاسبه کرد. اما در مورد گسیل برانگیخته چه می‌توان کرد؟ اگر برای الکترون حالت $u_2$ اختلالی صورت نگیرد، طبق تعریف باید همواره در آن‌جا باقی بماند. حل این مسأله باتوجه به انرژی ذخیره شده از یک میدان الکترومغناطیسی به دست می‌آید. روش متداول (که از نظر مفهومی چندان مفید نیست) برای انجام این کار، آن است که انرژی را برحسب پتانسیل برداری میدان بنویسیم. شکل این عبارت با حرکت مکانیکی ذره در پتانسیل هماهنگ یکسان است و در نتیجه، حالت‌های انرژی میدان می‌توانند به همان ترتیب کوانتیده شوند. توجیه فیزیکی (با گوش سپردن به پلانک و اینشتین) ممکن است آن باشد که اگر یک مد میدان الکترومغناطیسی با نوسانگر هماهنگ یک بار الکتریکی برهم‌کنش کند، انتظار داریم که حالت‌های انرژی آن مد، آینه‌ی بار نوسان‌کننده باشد (این به هیچ وجه استدلالی کلی نیست، چون مثلاً ذره‌ی باردار با شتاب خطی نیز تابش تولید می‌کند. در هر صورت، این نتیجه به دست می‌آید که در مورد نوسانگر، ترازهای انرژی کوانتیده‌اند:

$$E = (n + \frac{1}{2})h\nu$$

که در آن، n تعداد کوانتوم‌های انرژی آن مُد است و با تساهل، تعداد فوتون نامیده می‌شود.

اکنون به نکته‌ای می‌پردازیم. وقتی تعداد فوتون‌ها صفر باشد، هنوز مقدار انرژی $h\nu/2$ در آن مُد باقی می‌ماند (انرژی نقطه‌ی صفر). این انرژی را می‌توان انرژی ناشی از «میدان نقطه‌ی صفر» در نظر گرفت. برهم‌کنش دستگاه اتمی و این میدان باعث گسیل خودبه‌خود می‌شود.

بنابراین، این گسیل خودبه‌خود است، و نه اثر فوتوالکتریک که بدیهی‌ترین دلیل کوانتیده بودن نور را در اختیار می‌گذارد؛ با ربط دادن آن به بصیرت اینشتین در سال ۱۹۱۷ که نتیجه‌ی واقعاً

مهم این واقعیت بود که گسیل خودبه‌خود باید فرایندی «جهت‌دار» و در نتیجه‌ی غیرکلاسیک باشد.

## تصویر ما از فوتون

تحلیل منتهی به معادله‌ی (۶)، آخرین میخ را به تابوت «ذره‌ی جایگزیده‌ی نور» می‌کوبد که با توجه به برخورد ابتدایی با اثر فوتوالکتریک انتظار داریم. اگر n تعداد فوتون‌ها باشد، پس این نیم فوتون عجیب نیست؟ اما اگر این تصویر را کنار بگذاریم، چه چیز را باید جایگزین آن کنیم؟

این پرسش را استرند[۹] (۱۹۸۶) و کید[۱۰] و همکارانش (۱۹۸۹) بررسی کرده‌اند. کید و همکارانش پس از بررسی مفصل مفهوم «ذره‌ی جایگزیده» و بسط استدلال بالا، سرشت منسوخ آن را به نمایش گذاشته‌اند که جنیز[۱۱] (۱۹۷۸) آن چنین یاد می‌کند: «بدفهمی کلامی استاندارد (یعنی نظریه‌ی فشنگی نور که در چند نسل از کتاب‌های درسی مقدماتی ادامه داشته است) و با آن دانشجویان را شست‌وشوی مغزی می‌دهیم.»

با کنار گذاشتن آن، این واقعیت باقی می‌ماند که اغلب پدیده‌هایی را که در آن‌ها، برهم کنش اتم‌ها و مولکول‌ها با میدان‌های تابش دخیل است، می‌توان با رهیافت «نیمه کلاسیک» بالا به صورت رضایت‌بخشی بررسی کرد که در آن میدان به صورت کلاسیک توصیف شده است. این موضوع از دیدگاه فیزیک مشکلی را به وجود نمی‌آورد. اگر تابع‌های میدان الکترومغناطیسی را با همان دستورالعمل به کار رفته برای تبدیل متغیرهای دینامیکی یک ذره به عملگرهای دینامیکی، به عملگرهای کوانتیده تبدیل کنیم، «الکترودینامیک کوانتومی» حاصل در حالت حدی که تعداد کوانتوم‌ها به ازای هر مُد بزرگ باشد ($1 << n$ در معادله (۶)) به الکترودینامیک کلاسیک تبدیل می‌شود. سنیتزکی[۱۲] (۱۹۷۸) فیزیک درگیر در مسأله را به خوبی مرور کرده است.

البته پیچیدگی‌هایی هم وجود دارند. مثلاً عملگر E که هم‌ارز دامنه‌ی میدان الکتریکی کلاسیک است، هرمیتی و در نتیجه قابل مشاهده نیست. مشاهده‌پذیرها، عملگر تعداد فوتون‌ها و چیزی است که معمولاً به صورت عملگر فاز فوتون تعریف می‌شود. اولی، معیاری از انرژی فوتون در آن مُد است و دومی، فاز موج نسبت به محورهای فضایی است. دو عملگر جابه‌جاپذیر نیستند. در نتیجه، آزمایشی که در آن تعداد فوتون‌ها کاملاً مشخص باشد، همه‌ی اطلاعات مربوط به فاز را از بین می‌برد، و آزمایشی که در آن فاز کاملاً مشخص باشد، همه‌ی اطلاعات مربوط به انرژی را نابود می‌کند.

برای تولید حالت‌هایی که به حد کلاسیک موج کاملاً تکفام با دامنه‌ی خوش تعریف تحویل یابند، باید مجموعه‌ی جدیدی از «حالت‌های همدوس» را تعریف کنیم که در آن، عدم قطعیت، هم در تعداد فوتون و هم در خانه، با بزرگ شدن تعداد میانگین فوتون‌ها، به صفر میل کند (نگاه کنید به بحث **لودون**[۱۳]، ۱۹۸۳).

پس به طور کلی، تصویر فیزیکی میدان تابش حاصل از الکترودینامیک کوانتومی (QCD) رضایت‌بخش است. مسأله‌ی مهم این است که دانشجویان غالباً در دوره‌ی کارشناسی QCD نمی‌خوانند یا آن را خیلی دیر می‌خوانند.

## چه چیزی را باید تدریس کنیم

همان‌طور که به اختصار بیان شد، مسأله مربوط به فیزیک نیست، بلکه به این روایت ساده شده مربوط می‌شود که می‌خواهیم به دانشجویان خود درس بدهیم. وسوسه می‌شویم که ابتدا الکتریسیته و مغناطیس کلاسیک را درس بدهیم، نظریه‌ی کوانتومی ماده را با مکانیک کوانتومی مقدماتی آغاز کنیم و سپس واژه‌ی وحشتناک «فوتون» را وقتی وارد کنیم که دانشجویان بتوانند با ایده‌ی مدهای کوانتیده‌ی میدان تابش روبه‌رو شوند.

یک موضوع قطعی است: قرار دادن این مفهوم تقارن در اختیار دانشجویان که الکترون گاهی موج است و گاهی ذره، هیچ مفهوم تازه‌ای را در اختیار آن‌ها نمی‌گذارد. در واقع، راه را روی مفاهیم جدید می‌بندد.

آنچه در ادامه می‌آید، چند پیشنهاد مقدماتی است: اصولاً، به جای دنبال کردن مسیر تاریخی نظریه‌ی کوانتومی قدیم، می‌توانیم راه‌های منطقی را دنبال کنیم که به معادله‌ی شرودینگر یا فرمولبندی هایزنبرگ از مکانیک کوانتومی می‌انجامد.

مورد شرودینگر احتمالاً راحت‌تر است. از نظریه‌ی موج کلاسیک و بحث مدهای نوسان و امواج ساکن، می‌توان مفهوم پراش باریکه‌ی الکترون را معرفی کرد. این را می‌توان «آزمایشی مرکزی» به جای اثر فوتوالکتریک در نظر گرفت. در واقع، نمایش پراش الکترون به عنوان آزمایشی کلاسیک، بسیار راحت‌تر از اثر فوتوالکتریک است. مثلاً، با بهره‌گیری از لامپ پرتوی کاتدی که پراش الکترون را مستقیماً نشان می‌دهد، و اطلاعاتی درباره‌ی نظریه‌ی توری پراش، اندازه‌گیری سرراست طول موج وابسته به الکترون بر حسب انرژی آن امکانپذیر است. بحث پیامدهای این آزمایش، به ایده‌ی امواج احتمال و معادله‌ی شرودینگر می‌انجامد.

حل معادله‌ی شرودینگر می‌تواند به ایده‌ی کوانتیده بودن انرژی و بحثی کیفی درباره‌ی اتم هسته‌ای و مدارهای اتمی بینجامد. بدین ترتیب، می‌توان بحث «الکترون ما به عنوان حلقه‌ای از سیم» را که در تحلیل اتم بور به کار می‌رود، کنار گذاشت و از بدفهمی مربوط به در نظر گرفتن «اتم به عنوان

منظومه‌ی شمسی کوچک» اجتناب کرد.

این رهیافت در امتداد مسیر کتاب‌های قدیمی مکانیک موجی مانند «مت»[14] (۱۹۵۹) است. اگر از اثر فوتوالکتریک صحبت به میان می‌آید، می‌تواند به عنوان نمایشی دیگر از کوانتیده بودن انرژی باشد، و مفهوم «فوتون» را می‌توان به ایده‌ی انتقال انرژی به صورت کوانتیده از میدان الکترومغناطیسی بسط داد یا به آن محدود کرد.

امکان دیگر، دنبال کردن مسیر از اندازه‌گیری‌های کلاسیک ناشی از متغیرهای فیزیکی چون طول یا تکانه به اندازه‌گیری در مقیاس کوچک‌تر و تعریف اندازه‌گیری با عملگری خطی است که حالت دستگاهی را تغییر می‌دهد و اندازه‌گیری روی آن انجام می‌شود. این موضوع اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را مستقیماً در مرحله‌ای ابتدایی وارد می‌کند. باز هم، مفهوم «فوتون» بخش اصلی تحلیل نخواهد بود.

## نتیجه گیری

اولین برداشت‌ها در آموزش و پرورش و در جاهای دیگر، اهمیت فراوان دارند. دانشجویان ما ابزارهای روزمره را که وجود خود را مدیون نظریه‌ی کوانتومی ماده هستند، می‌بینند و از آن‌ها استفاده می‌کنند. اگر می‌خواهیم دانشجویان را به این نظریه علاقه‌مند کنیم، باید طوری به آن‌ها آموزش دهیم که با ساده‌سازی بسیار، هیجان و بی پایان بودن نظریه را از بین نبریم. هر نسل می‌تواند پیشداوری‌ها و محدودیت‌های خود را به دانشجویان منتقل کند، اما وقت آن است که نقطه‌ی شروع «فیزیک جدید» را حداقل از ۱۹۰۰ به ۱۹۳۰ منتقل کنیم.

زیرنویس:

D.G.C.Jones

استاد فیزیک دانشگاه ساسکس و نایب رئیس مدرسه‌ی عالی علوم و ریاضی که علاقه‌ی فراوانی به تدریس فیزیک کوانتومی و اپتیک کوانتومی دارد.

2. Jackson
3. Rae
4. Schiff
5. Ballentine
6. Lamb
7. Atkins
8. Lenard
9. Starnd 1986
10. Kidd
11. Jaynes
12. Sentizky
13. Loudon
14. Mott

منبع:

1. Phys. Educ. 26 (1991)

پژوهشی

# کار عملی اقدام پژوهی چگونه؟

## می‌توانم علاقه‌ی دانش‌آموزان را نسبت به درس فیزیک افزایش دهم

ملیحه جعفری

### مقدمه

درس فیزیک، از نظر دانش‌آموزان یکی از درس‌های مشکل دبیرستان است، ولی تجربه‌ی دوران دانش‌آموزی خودم نشان می‌دهد که با علاقه می‌توان، بر تمام سختی‌ها و مشکلات به ظاهر حل نشدنی فائق آمد. پس مشکل بودن درس، به تنهایی عامل بی‌علاقه بودن و یا کم علاقه بودن فرد نیست، بلکه عامل اصلی برای یادگیری، علاقه‌مندی دانش‌آموزان به درس است. علاقه‌مند بودن خود معلم نیز یکی از شرط‌های اصلی ایجاد علاقه در دانش‌آموزان است. از آن‌جا که علاقه‌ی شدید نسبت به درس فیزیک را در خودم سراغ داشتم و دارم، بر آن شدم تا این علاقه را به دیگران نیز منتقل کنم؛ البته علاقه‌ای که در پس آن، تلاش و کوشش نهفته است. این موضوع پژوهشی، راهی را برای پیمودن جلوی رویم قرار داد که با گام‌های پرتلاش و نیز با علاقه، آن‌را خواهم پیمود.

### وضعیت دانش‌آموزان

کلاس دوم ریاضی من، شامل ۲۴ دانش‌آموز دختر است که غالباً از نظر اقتصادی و فرهنگی از خانواده‌های قشر متوسط هستند و در خانواده‌های آن‌ها، حداقل یک فرد با تحصیلات عالی مشاهده می‌شود.

این دانش‌آموزان از دو شیفت بودن مدرسه راضی نیستند. توانایی‌های ذهنی آن‌ها تفاوت‌های زیادی با هم دارد و بنابراین از نظر فعالیت در کلاس، کاملاً به دو گروه متضاد با هم تقسیم می‌شوند: نیمی فعال و نیمی دیگر غیرفعال.

### وضعیت مدرسه

مدرسه‌ی ما تقریباً امکانات یک دبیرستان معمولی و مدیریتی خوب دارد که کاملاً مراقب اوضاع و احوال مدرسه است

و در آن شرایط کار برای پژوهش معلم تقریباً مهیاست؛ البته نه به‌طور کامل؛ زیرا در این مدرسه هنوز به قوانین انضباطی و دست و پاگیر بیش از حد بها داده می‌شود.

## تشخیص مشکل

در هفته‌ی اول مهر به این نتیجه رسیدم که تفاوت علمی و فکری زیادی بین شاگردان وجود دارد. در کلاس غالباً روش تدریس بحث گروهی را در پیش می‌گرفتم، اما نیمی از شاگردان نمی‌توانستند و یا نمی‌خواستند در بحث‌ها شرکت کنند. با خودم فکر کردم، شاید دلیل بی‌رغبتی آن‌ها، نداشتن اطلاعات کافی است. از خود می‌پرسیدم: «واقعاً چگونه می‌توانم فاصله‌ها را در کلاس کم کنم و کلاسی با انگیزه‌های یادگیری بیش‌تر داشته باشم؟ چرا برخی از شرکت در بحث‌ها خودداری می‌کنند، ولی برخی دیگر، این چنین فعال و پویا هستند؟»

البته خرسند بودم که سرانجام موقعیتی پیش آمده است تا خود را خوب محک بزنم و فرصتی را که منتظر آن بودم تا تغییری در کلاس ایجاد کنم، در اختیار دارم. چرا که تا مداخله نمی‌کردم، تغییری صورت نمی‌گرفت؛ البته با کمک بچه‌ها و در حد کلاس، می‌خواستم در این خانه‌ی کوچک شاهد تحولی درونی باشم که خود ساکنانش عامل آن باشند.

به منظور رفع نقص‌ها و اثبات درستی پیش‌فرض‌های خود لازم دانستم، مشکل را با چند نفر از معلمانی که درس‌های دیگر نظیر ریاضی و شیمی را تدریس می‌کنند، در میان بگذارم. آن‌ها مشکل کلاس را ناشی از اشتباه در تعیین رشته و هدایت تحصیلی می‌دانستند و این تفاوت را امری طبیعی و مسأله‌ای حل نشدنی می‌پنداشتند. گرچه من در مورد اول با آن‌ها هم عقیده بودم، ولی در مورد دوم نظری عکس آنان داشتم و بر این باور بودم که می‌توان در کلاس تحول ایجاد کرد. متأسفانه هیچ فردی را هم‌سوی خویش نیافتم. از این‌رو، برنامه‌ریزی‌ها را از خود و منحصراً در درس خود و در کلاس دوم ریاضی آغاز کردم که شاگردانش را چهار ساعت در هفته ملاقات می‌کردم.

## انتخاب یک راه موقت

راه پیشنهادی من برای افزایش علاقه‌ی دانش‌آموزان، تعیین هدف‌های کوچک و رسیدن به آن‌ها توسط خود دانش‌آموزان و ایجاد احساس لذت ناشی از یادگیری در آن‌ها بود.

از تابلوی اعلانات مدرسه استفاده‌ی زیادی کردم. توجه من موقعی به این تابلو جلب شد که دریافتم، دانش‌آموزان در اوقات بی‌کاری، نوشته‌های روی تابلو را جمله به جمله می‌خوانند. تصمیم گرفتم برای دوری از کسالت ناشی از حرف‌های شاید تکراری خودم در کلاس، از طریق این تابلو با بچه‌ها سخن بگویم؛ مثلاً نمرات آن‌ها را روی تابلو نصب کنم، ارزشیابی درسی دقیقی به آن‌ها ارائه بدهم، از هر دانش‌آموزی به نحوی تشکر و قدردانی کنم (فقط با جملات)، آن‌ها را در رده‌های خاصی به نام تلاشگر، فعال کلاسی و منضبط کلاسی جای بدهم و زیر برگه‌ی نمرات از آن‌ها تشکر کنم و... این کار را هفته‌ها ادامه دادم تا به تدریج احساس مهم بودن تک تک دانش‌آموزان نزد من، در آن‌ها به وجود آمد. از آن پس با دقت بیش‌تری به حرف‌هایم گوش می‌دادند و بیش‌تر در بحث‌ها شرکت می‌کردند. این کار واقعاً بیش از حد انتظارم مؤثر واقع شد و در اعمال و نتایج دانش‌آموزان در کلاس و همچنین نمرات بعدی آن‌ها تغییر چشمگیری دیدم. حس کردم، اوضاع به خوبی پیش می‌رود، اگرچه هنوز وضع دلخواه من نبود. در فهرست زیر، تفاوت نمره‌های آن‌ها را در درس فیزیک، به فاصله‌ی یک ماه ملاحظه می‌کنید.

| نام دانش‌آموز | امتحان مهرماه (۱۵ نمره) | امتحان آبان ماه (۱۵ نمره) |
|---|---|---|
| نفیسه | ۶/۷۵ | ۷/۷۵ |
| فریده | ۷/۲۵ | ۱۰/۲۵ |
| ندا | ۷/۷۵ | ۵/۵ |
| مینو | ۱۲/۷۵ | ۱۳/۵ |
| سیما | ۳/۵ | ۴/۵ |
| سمیه | ۵ | ۷/۷۵ |
| معصومه | ۱۱/۲۵ | ۱۰/۲۵ |
| سهیلا | ۵/۷۵ | ۵/۷۵ |
| حدیثه | ۷/۵ | ۷/۷۵ |
| فاطمه | ۴/۲۵ | ۷ |
| شیرین | ۴/۲۵ | ۷ |
| ندا | ۸/۷۵ | ۸ |
| راحله | ۸/۷۵ | ۸ |
| مریم | ۱۱ | ۱۱/۷۵ |
| مهین | ۱۰/۷۵ | ۱۱/۷۵ |
| ثریا | ۳/۵ | ۴/۵ |
| فهیمه | ۵/۷۵ | ۶/۲۵ |
| مریم | ۶/۵ | ۸/۷۵ |
| مهین | ۴/۲۵ | ۹ |
| سعیده | ۹/۲۵ | ۱۰ |
| آرزو | ۶/۷۵ | ۸/۷۵ |
| سمیه | ۵/۵ | ۷/۵ |
| زهره | ۹/۵ | ۹/۵ |
| فاطمه | ۸ | ۵/۲۵ |

در ماه اردیبهشت، آخرین مرحله از آزمون‌های تشخیصی تکوینی را برگزار کردم و بچه‌ها نمره‌های خیلی بهتری گرفتند که وقتی آن‌ها را با نمره‌های ماه بهمن مقایسه کردم، شگفت‌زده شدم. پیشرفت دانش‌آموزانم تحسین برانگیز بود.

| نام دانش‌آموز | بهمن ماه (از ۲۰ نمره) | اردیبهشت ماه (از ۲۰ نمره) |
|---|---|---|
| نفیسه | ۱۵ | ۱۸ |
| فریده | ۱۵/۲۵ | ۱۶ |
| ندا | ۸/۷۵ | ۱۲/۵ |
| مینو | ۱۸/۵ | ۱۹/۵ |
| سیما | ۱۱/۵ | ۱۳ |
| معصومه | ۱۶/۷۵ | ۱۸/۷۵ |
| سهیلا | ۱۰/۷۵ | ۱۴/۵ |
| حدیثه | ۱۵/۲۵ | ۱۸ |
| فاطمه | ۸ | ۱۰/۵ |
| شیرین | ۱۳/۲۵ | ۱۸/۷۵ |
| ندا | ۱۵/۲۵ | ۱۹ |
| راحله | ۱۵/۵ | ۱۹/۵ |
| مریم | ۱۹/۲۵ | ۲۰ |
| مهین | ۱۴/۵ | ۱۷ |
| ثریا | ۱۰ | ۱۲/۵ |
| فهیمه | ۴ | ۱۲/۵ |
| مریم | ۱۰/۲۵ | ۱۵/۷۵ |
| سعیده | ۱۴ | ۱۸/۲۵ |
| فاطمه | ۱۲/۷۵ | ۱۲/۵ |
| آرزو | ۱۶/۲۵ | ۱۷/۲۵ |
| سمیه | ۱۳/۲۵ | ۱۵ |
| زهره | ۱۴/۷۵ | ۱۷/۲۵ |

یکی از افتخاراتم در این کلاس، موفقیت دانش‌آموز خوبم، **مریم شعبانی** بود که در المپیاد فیزیک رتبه‌ی اول مرحله‌ی استانی را کسب کرد و وارد مرحله‌ی کشوری شد. کارهای بسیاری را برای رسیدن به این نتیجه‌های درخشان انجام دادم که برخی از آن‌ها عبارتند از:

برای تنوع در کارها، در دفتر بچه‌ها مطالبی را می‌نوشتم و از کم‌ترین فعالیت آن‌ها، بیش‌ترین قدردانی را می‌کردم. به تقاضای حق دانش‌آموزان توجه داشتم. گاهی اوقات بین آن‌ها و خواسته‌هایشان از کادر دفتری، پل ارتباطی می‌شدم. هرجا قولی و قراری از جانب من می‌گذاشتند، چون برایشان مهم بودم، تا آخرین مرحله پیش می‌رفتند و وظایف خود را موبه‌مو انجام می‌دادند. به این ترتیب، علاقه‌ی آن‌ها به فیزیک روزبه‌روز بیش‌تر و بیش‌تر شد. خودم را با موجی از علاقه‌های خالصانه مواجه می‌دیدم.

لازم است و خیلی هم مهم است که بگویم، من در هفته دو روز و گاهی سه روز، و هر روز ۱۲ ساعت در این مدرسه مشغول کار بودم (دو شیفت). معمولاً در ساعت آخر جسم من خسته بود، ولی دریغ از ذره‌ای خستگی روحی و فکری. با دیدن چهره‌های شاد بچه‌ها، اثری از خستگی در خود نمی‌یافتم. در ضمن از آزمایشگاه هم بهره می‌گرفتم. علاقه‌ی آن‌ها را به درس از این جا می‌فهمیدم که پس از پایان کار آزمایشگاه، آن جا را مانند خانه‌ی خودشان آب و جارو می‌کردند. با دستمال تمیز، وسایل را برق می‌انداختند و کمدها و کشوها را منظم می‌کردند. این‌ها همه نشانه‌ی علاقه‌ی فراوان دانش‌آموزان به کار در آزمایشگاه و درس فیزیک بود.

در جلسات بعد، وارد گروه‌ها شدم و با آن‌ها به بحث پرداختم. دیری نگذشت که خودم نیز مانند آن‌ها شدم. چه‌قدر حس خوبی داشتم! تا چه حد خود را پائین آورده بودم و چه‌قدر اشکالات را بهتر درک می‌کردم! نقش نظارتی خود را بین دانش‌آموزانم تقسیم کردم و با آن‌ها هم نیمکت شدم. دیدم، شنیدم و گفتم. ساعات چه‌قدر زود و خوش و پرحاصل می‌گذشتند. سعی می‌کردم، لذت یادگیری را به کامشان بچشانم. از جمله، آن‌ها را وادار به سخن گفتن می‌کردم و خودم جایشان پشت نیمکت می‌نشستم. یک بار دیدم یکی از بچه‌ها در جامدادی خود خط‌کش ندارد. به عنوان جایزه پس از یک امتحان، خط‌کش‌هایی فانتزی تهیه کردم، و به یادگار و با عنوان‌های گوناگون، شاید به ۹۰ درصد بچه‌ها هدیه کردم. این کار روابط عاطفی ما را بسیار بهبود بخشید. به آنان می‌آموختم که می‌توانند از توانایی‌هایشان بهتر استفاده کنند. ساعت‌ها می‌گذشتند و من آن‌ها را با نکته‌هایی فراتر از کتاب آشنا می‌ساختم. آرام آرام می‌گفتم. سخنانم را شمرده ادا می‌کردم تا دانش‌آموزان قوی لذت ببرند و دانش‌آموزان ضعیف عقب نمانند.

## گردآوری شواهد

در طول مدت هشت ماهی که کار موردنظر را انجام می‌دادم، از بازتاب کارهایم غافل نماندم و از طریق پرسش‌نامه که به صورت باز مطرح شده بود، نظر همه‌ی دانش‌آموزان را خواستار شدم. چون همه‌ی آن‌ها برایم مهم بودند، از تک‌تکشان خواستم برایم بنویسند. در طول مدتی که آن‌ها به نوشتن مشغول بودند، من هم سرگرم نوشتن برای آن‌ها شدم، تا این موضوع برایشان

مهم باشد. سپس نوشته‌های خودم را بر تابلو نصب کردم که خود این عمل هم باعث پیشرفت کار شد.

در ادامه، نمونه‌ای از نظرات دانش‌آموزان را می‌آورم:

**سؤال:** از دیدگاه شما، چگونه می‌توان دانش‌آموزان را به درس فیزیک بیش‌تر علاقه‌مند کرد؟

- ۹۰ درصد صرف وقت زیاد در این درس را مؤثر می‌دانستند.
- ۷۰ درصد داشتن فردی مجرّب در درس فیزیک و در خارج از مدرسه را مطرح کردند.
- ۱۰ درصد به کافی نبودن ساعات درس در برنامه‌ی هفتگی اشاره داشتند.
- ۶۰ درصد روش حل تمرین به‌طور گروهی را بسیار مفید و ضروری خواندند و ۴۰ درصد بقیه نیز آن را رد نکردند؛ چرا که هم وقت کافی در اختیار آن‌ها بود و هم می‌توانستند در کلاس به دلخواه جابه‌جا شوند و اشکالشان را از هر فردی که دوست داشتند، بپرسند.
- ۸۰ درصد با مطرح شدن این پرسش، به دنبال یافتن علاقه به فیزیک در درون خود برآمدند؛ و حتی آن‌هایی که از نظر درسی ضعیف بودند، احساس کرده بودند که می‌توانند جبران مافات کنند. این موضوع برای من چراغی فروزان برای ادامه‌ی راهی بود که در پیش گرفته بودم.

## ارزشیابی تأثیر روش جدید

آنچه دیدم و حس کردم سبب شد، مصمم‌تر از گذشته هفته‌هایم را با یکدیگر متفاوت سازم. در مجموع نتایج مثبت کارم را می‌توانم این‌گونه شرح دهم:

۱. جایگزین ساختن عشق و علاقه به یادگیری درس فیزیک، به جای دلزدگی و بی‌علاقگی؛

۲. لذت بردن دانش‌آموزان از یادگیری، و تداوم و استمرار در آن به واسطه‌ی روش تدریس هم‌یاری (روش نوین تدریس)؛

۳. به وجود آمدن علاقه و تلاش در دانش‌آموزان، به‌طوری که اوقات بی‌کاری آن‌ها به صفر رسید؛ با توجه به این‌که دانش‌آموزان خود درس را می‌آموختند و می‌آموزاندند؛

۴. تعدیل در روش تدریس به صورت سخنرانی که غالباً کسالت‌آور است و مشاهده‌ی اثربخشی آن در عمل؛

۵. به وجود آمدن علاقه در دانش‌آموزان به فراگیری فیزیک از کتاب‌های دیگر و در نتیجه افزایش علاقه به مطالعه‌ی کتاب در آن‌ها نسبت به اول سال، به میزان ۳۰ درصد؛

۶. گرایش بچه‌ها به شرکت در بحث‌ها (نیمی از دانش‌آموزان کلاس) و تبدیل افراد غیرفعال به فعال، به میزان ۴۰ درصد در پایان.


دفتر انتشارات کمک آموزشی

آشنایی با مجله‌های رشد

**مجله‌های رشد توسط دفتر انتشارات کمک آموزشی سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وابسته به وزارت آموزش و پرورش، با این عناوین تهیه و منتشر می‌شوند:**

**مجله‌های دانش‌آموزی (به صورت ماهنامه ـ ۹ شماره در هر سال تحصیلی ـ منتشر می‌شوند):**

- **رشد کودک** (برای دانش‌آموزان آمادگی و پایه‌ی اول دوره‌ی ابتدایی)
- **رشد نوآموز** (برای دانش‌آموزان پایه‌های دوم و سوم دوره‌ی ابتدایی)
- **رشد دانش‌آموز** (برای دانش‌آموزان پایه‌های چهارم و پنجم دوره‌ی ابتدایی).
- **رشد نوجوان** (برای دانش‌آموزان دوره‌ی راهنمایی تحصیلی).
- **رشد جوان** (برای دانش‌آموزان دوره‌ی متوسطه).

**مجله‌های عمومی (به صورت ماهنامه ـ ۹ شماره در هر سال تحصیلی منتشر می‌شوند):**

- **رشد مدیریت مدرسه، رشد معلم، رشد آموزش ابتدایی، رشد آموزش راهنمایی تحصیلی، رشد تکنولوژی آموزشی، رشد مدرسه فردا**

**مجله‌های تخصصی (به صورت فصلنامه و ۴ شماره در سال منتشر می‌شوند):**

- **رشد برهان راهنمایی (مجله‌ی ریاضی، برای دانش‌آموزان دوره‌ی راهنمایی تحصیلی)، رشد برهان متوسطه (مجله‌ی ریاضی، برای دانش‌آموزان دوره‌ی متوسطه)، رشد آموزش معارف اسلامی، رشد آموزش جغرافیا رشد آموزش تاریخ، رشد آموزش زبان و ادب فارسی، رشد آموزش زبان رشد آموزش زیست شناسی، رشد آموزش تربیت بدنی، رشد آموزش فیزیک رشد آموزش شیمی، رشد آموزش ریاضی، رشدآموزش هنر، رشد آموزش قرآن رشد آموزش علوم اجتماعی، رشد آموزش زمین‌شناسی، رشد آموزش فنی و حرفه‌ای، رشد مشاور مدرسه.**

**مجله‌های رشد عمومی و تخصصی برای معلمان، آموزگاران، مدیران و کادر اجرایی مدارس**
**دانشجویان مراکز تربیت معلم و رشته‌های دبیری دانشگاه‌ها و کارشناسان تعلیم و تربیت تهیه و منتشر می‌شوند.**

- **نشانی: تهران، خیابان ایرانشهرشمالی، ساختمان شماره۴ آموزش و پرورش، پلاک ۲۶۸، دفتر انتشارات کمک‌آموزشی.**
**تلفن و نمابر: ۸۸۳۰۱۴۷۸**

## برگ اشتراک مجله های رشد

**شرایط**

۱ـ واریز مبلغ ۲۰/۰۰۰ ریال به ازای هر عنوان مجله درخواستی، به صورت علی الحساب به حساب شمارهٔ ۳۹۶۶۲۰۰۰ بانک تجارت شعبه سه راه آزمایش (سرخه حصار) کد ۳۹۵ در وجه شرکت افست.

۲ـ ارسال اصل رسید بانکی به همراه برگ تکمیل شده اشتراک.

- **نام مجله :** .....
- **نام و نام خانوادگی:** .....
- **تاریخ تولد:** .....
- **میزان تحصیلات:** .....
- **تلفن:** .....
- **نشانی کامل پستی:**

استان: ..... شهرستان: .....

خیابان: .....

.....

پلاک: ..... کدپستی: .....

- **مبلغ واریز شده:** .....
- **شماره و تاریخ رسید بانکی:** .....

**امضا:**

**نشانی: تهران ـ صندوق پستی مشترکین** ۱۶۵۹۵/۱۱۱

**نشانی اینترنتی:** www.roshdmag.org

**پست الکترونیک:** Email:info@roshdmag.org

**امور مشترکین:** ۷۷۳۳۶۶۵۶ـ۷۷۳۳۵۱۱۰

**پیام گیر مجلات رشد:** ۸۸۳۰۱۴۸۲ـ۸۸۸۳۹۲۳۲

**یادآوری:**

- هزینه برگشت مجله در صورت خوانا و کامل نبودن نشانی، بر عهده مشترک است.
- مبنای شروع اشتراک مجله از زمان وصول برگ اشتراک است.
- برای هر عنوان مجله برگ اشتراک جداگانه تکمیل و ارسال کنید (تصویر برگ اشتراک نیز مورد قبول است).


مروری

# جریان انرژی برای یک خازن با گاف متغیر


ناتانیل گرین[1]

مترجم: احمد توحیدی

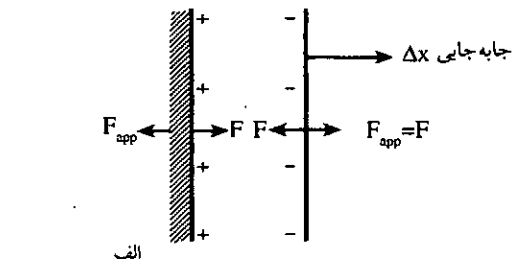

هنگامی که صفحه های خازن از هم دور شوند، برحسب این که بار صفحه ها ثابت بماند و یا ولتاژ دو سر آن ثابت بماند، انرژی الکترواستاتیکی خازن افزایش یا کاهش پیدا می کند. برای مورد ولتاژ ثابت، دانش آموزان با معمای جالبی روبه رو می شوند. چگونه ممکن است یک عامل خارجی روی خازنی کار مثبت انجام دهد و همزمان انرژی ذخیره شده در خازن کاهش یابد؟ نمودار جریان انرژی در مقاله ی آرت هابسون[2] به ما در مجسم کردن نقل و انتقال انرژی در قسمت های متفاوت یک دستگاه کمک می کند. آنچه را که **ریچارد فاینمن** در عبارت نیروی میان صفحه های خازن عامل «شگفت انگیز یک دوم» می نامد، معمای دیگری است که دانش آموزان باید رمز آن را بگشایند.

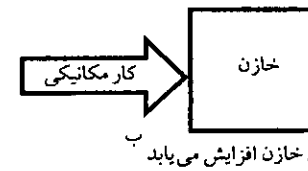
## حالت بار ثابت و عامل «شگفت انگیز» یک دوم

یک خازن صفحه موازی با بار ذخیره شده ی Q، از باتری جدا می شود. در این حالت، عاملی خارجی با حرکت یک صفحه ی خازن، درحالی که صفحه ی دیگر ساکن است، فاصله ی میان صفحه ها را از x به $x + \Delta x$ افزایش می دهد. انرژی اولیه ی ذخیره شده در میدان الکتریکی خازن برابر است با:

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}Q(E.x) = \frac{1}{2}\sigma AEx \qquad (1)$$

که در آن V اختلاف پتانسیل اولیه ی بین صفحه ها، E میدان الکتریکی یکنواخت میان آن ها، $\sigma$ چگالی سطحی بار، و A




شکل ۱ـ الف) نیروی وارد، صفحه‌ی منفی را با سرعت ثابت به طرف راست حرکت می‌دهد، درحالی که صفحه‌ی مثبت، ساکن نگه داشته شده است. بار خازن Q ثابت است.
ب) در این نمودار جریان انرژی، کار مکانیکی انجام شده به‌وسیله‌ی نیروی وارد شده، انرژی ذخیره‌شده‌ی خازن را افزایش می‌دهد.

مساحت هر صفحه است. انرژی ثانویه‌ی ذخیره‌شده با افزایش فاصله‌ی صفحه‌ها برابر با $U'_{خازن}=\frac{1}{2}\sigma AE(x+\Delta x)$ می‌شود. بنابراین تغییر انرژی خازن برابر است با

$$\Delta U_{خازن}=\frac{1}{2}\sigma AE\Delta x \qquad (۲)$$

این افزایش انرژی از کجا می‌آید؟ عامل خارجی دارد؛ یعنی فردی که با اعمال نیروی F، که مقدار آن برابر نیروی جاذبه‌ی الکترواستاتیکی بین صفحه‌هاست، یک صفحه‌ی خازن را با سرعت ثابت از صفحه‌ی دیگر دور می‌کند. نیروی اعمال شده کار مثبت انجام می‌دهد.

$$W_{خارجی}=F.\Delta x \qquad (۳)$$

شکل ۱ ـ الف این وضعیت را نشان می‌دهد و شکل ۱ ـ ب نمودار جریان انرژی وابسته به این حالت است. کار ورودی مستقیماً به انرژی الکترواستاتیکی تبدیل می‌شود: یعنی $W_{خارجی}=\Delta U_{خازن}$. با مقایسه‌ی رابطه‌های (۲) و (۳) خواهیم داشت:

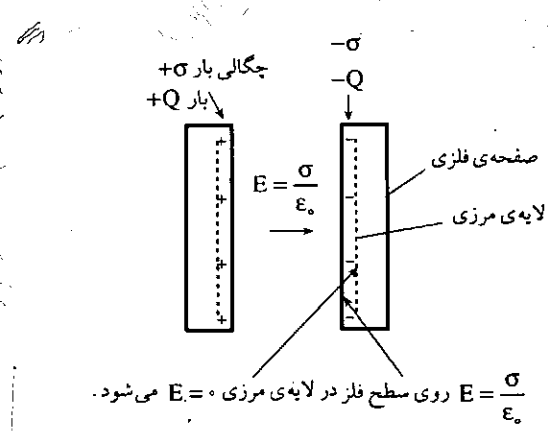
$$F=\frac{1}{2}\sigma AE=\frac{1}{2}QE \qquad (۴)$$

عامل یک دوم در عبارت بالا شایان توجه است. معمولاً، به دانش‌آموزان می‌آموزیم که نیروی الکتریکی برابر است با حاصل‌ضرب بار در میدان الکتریکی که بار در آن قرار دارد: $F=QE$. یک توضیح برای عامل یک‌دوم آن است که بار Q تنها تحت‌تأثیر میدان الکتریکی صفحه‌ی دیگر قرار می‌گیرد، نه صفحه‌ای که خود در آن است. میدان الکتریکی یک ورقه‌ی باردار منزوی $\sigma/2\varepsilon_0$ است که برابر با نصف مقدار میدان بین صفحه‌ها، E، است. رابطه‌ی (۴) را می‌توان به صورت $E/2$ نوشت، اما قانون گاؤس بین میدان ناشی از این صفحه یا آن صفحه تفاوت نمی‌گذارد. با تجزیه و تحلیل یک جعبه قرص گاؤسی که در هریک از صفحه‌های خازن قرار دارد و سر دیگر آن داخل توده‌ی فلزی است، میدان الکتریکی بین صفحه برابر با $\sigma/\varepsilon_0$ به دست می‌آید. بر پایه‌ی قانون گاؤس، درواقع بار Q تحت تأثیر میدانی برابر با $\sigma/\varepsilon_0$ قرار می‌گیرد، اما چرا این بار نیروی کامل QE را احساس نمی‌کند؟ ریچارد فاینمن با بینش درخشان خود به این نظر مخالف پاسخ می‌دهد. بار Q به عمق کم ولی محدود در صفحه نفوذ می‌کند. در واقع، میدان الکتریکی در سطح داخلی صفحه برابر با $\sigma/\varepsilon_0$، اما میدان در حجم صفحه‌ی فلزی $E=0$ است. بنابراین، میدان الکتریکی در عبور از مرز لایه کاهش می‌یابد و عبارت $\sigma/2\varepsilon_0$ نشانگر میدان میانگین در لایه‌ی مرزی است (شکل ۲).

انجام پژوهش‌های تجربی درباره‌ی نیروی بین صفحه‌های خازن با ابزارهای ساده امکانپذیر است و وجود عامل یک‌دوم را نیز می‌توان بررسی کرد.

## مورد ولتاژ ثابت و جریان انرژی

اکنون تمرین بالا را تکرار می‌کنیم، اما در این حالت خازن، هنگامی که فاصله‌ی بین صفحه‌های آن افزایش می‌یابد، به یک باتری با ولتاژ V متصل است. انرژی ذخیره شده‌ی اولیه و ثانویه‌ی خازن به ترتیب عبارتند از:




شکل ۲. با توجه به توضیح فاینمن، بار صفحه‌ی خازن روی لایه‌ی مرزی کم‌عمقی قرار دارد. روی سطح فلز، شدت میدان الکتریکی حداکثر و در تمام گاف، هوای بین صفحه‌های بزرگ خازن یکنواخت است (اثر لبه را نادیده می‌گیریم). اما در داخل لایه‌ی مرزی، میدان الکتریکی با نفوذ به داخل فلز به سمت صفر میل می‌کند. شدت میدان مؤثری که روی بار Q- اثر می‌کند، برای اندازه‌گیری نیروی الکتریکی وارد بر صفحه، برابر با نصف مقدار سطحی آن است.

$$U_{\text{اولیه}} = \frac{1}{2}CV^2$$

$$U'_{\text{ثانویه}} = \frac{1}{2}C'V^2$$

اختلاف انرژی در دو حالت از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta U = -\frac{1}{2}|\Delta C|V^2 \qquad (۵)$$

علامت منفی صرفاً برای تأکید بر این واقعیت است که انرژی ذخیره‌شده در خازن کاهش می‌یابد (بار کم‌تر، پیامد کاهش ظرفیت خازن و درنتیجه انرژی کم‌تر است).

اما، عامل خارجی کار مثبت انجام می‌دهد، زیرا برای جدا کردن صفحه‌های خازن از هم باید تلاش کند. کار انجام‌شده برابر است با:

$$W_{\text{خارجی}} = \int_{x}^{x+\Delta x} F.dx = \int_{x}^{x+\Delta x} \frac{1}{2}QEdx$$

$$= \frac{1}{2}\int_{x}^{x+\Delta x}(CV)(\frac{V}{x})dx = \frac{1}{2}V^2\int_{x}^{x+\Delta x}(\frac{C}{x})dx$$

با فرض این‌که صفحه‌های خازن موازی بزرگ هستند، می‌توانیم برای ظرفیت از رابطه‌ی $\frac{\varepsilon.A}{x}$ استفاده کنیم. بنابراین:

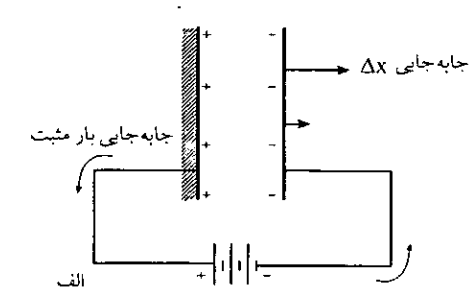
$$W_{\text{خارجی}} = \frac{1}{2}V^2\int_{x}^{x+\Delta x}\frac{\varepsilon.A}{x^2}dx$$

$$= \frac{1}{2}\varepsilon.A\left[\frac{1}{x} - \frac{1}{x+\Delta x}\right]V^2 = +\frac{1}{2}|\Delta C|V^2 \qquad (۶)$$

با مقایسه‌ی رابطه‌های (۵) و (۶) نتیجه‌ی عجیبی آشکار می‌شود. به‌رغم این واقعیت که انرژی به خازن وارد می‌شود ($W$ مثبت است)، انرژی ذخیره‌شده در خازن کم می‌شود ($\Delta U$ منفی است). برای توجیه این ناسازگاری در انرژی که دوبرابر $W$ است، باید به برهم‌کنش خازن با باتری توجه کنیم. خلاصه‌ی این وضعیت در شکل (۳) نشان داده شده است.

با دور شدن صفحه‌ها از هم، کاهش ظرفیت خازن ایجاب می‌کند که بخشی از انرژی خازن از طریق باتری تخلیه شده باشد. بارهای آزاد شده در جهت «غلط» طوری از باتری می‌گذرند که گویی یک باتری قابل شارژ را «شارژ» می‌کنند. درواقع، اگر باتری قابل شارژ باشد، انرژی به صورت انرژی شیمیایی در باتری ذخیره می‌شود. اگر چنین اتفاقی روی ندهد، انرژی در مقاومت داخلی باتری به صورت گرما تلف می‌شود.

برای مقایسه، انرژی منتقل‌شده به باتری را محاسبه می‌کنیم. کار الکتریکی انجام‌شده روی باتری با حاصل ضرب افت بار




شکل ۳ـ الف) صفحه‌ی منفی در حالی که اختلاف پتانسیل دو سر خازن ثابت نگه داشته شده است، به طرف راست حرکت داده می‌شود. در این فرایند، ظرفیت خازن کم می‌شود؛ یعنی بخشی از انرژی خازن به درون باتری تخلیه می‌شود.
ب) انرژی از عامل خارجی به داخل خازن جریان می‌یابد، اما مقدار بیش‌تری انرژی (دو برابر) از خازن خارج می‌شود و روی باتری کار الکتریکی انجام می‌دهد. بنابراین انرژی ذخیره‌شده در خازن کاهش می‌یابد.

خازن در ولتاژ باتری به آسانی به دست می‌آید.

$$W_{\text{الکتریکی}} = |\Delta Q|V = (|\Delta C|V)V = 2W_{\text{خارجی}}$$

آن مقدار انرژی که به باتری داده می‌شود، بزرگ‌تر (درست دو برابر) از مقدار انرژی است که عامل خارجی به خازن داده است. این وضعیت با نمودار جریان انرژی در شکل ۳ـ ب سازگار است.

برخلاف نمودارهای جریان انرژی هابسون که در آن‌ها جریان انرژی در فرایندهای حالت پایا یا چرخه‌ای پایسته می‌مانَد، در این جا با وضعیتی روبه‌رو می‌شویم که در آن، جریان انرژی خروجی از خازن بیش‌تر از جریان انرژی ورودی به آن است. از مقایسه با یک دستگاه هیدرولیکی با سرعت ثابت جریان استفاده می‌کنیم. اگر لوله‌ی آب ورودی به دستگاه نازک ولی لوله‌ی خارجی از آن کلفت باشد، بدیهی است که محتوای آب ذخیره شده در دستگاه کم می‌شود. خازن هم به همین ترتیب انرژی ذخیره‌شده را از دست می‌دهد.

زیرنویس:

1. Nathaniel R. Greene
2. Art Itobson

منبع:

* Energy Flow for a Variable-Gap Capaoitor. The Physics Teacher, Vol 43, se Ptember 2005.

# انرژی تجدیدپذیر دریا

الهام عسگری

## مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت کره‌ی زمین و نیاز روزافزون بشر به انرژی، به ویژه انرژی الکتریکی، پیش‌بینی می‌شود برق اتمی و برق حاصل از انرژی‌های نو، سهم بیش‌تری در تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز بشر در سال‌های آینده داشته باشند. از میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی دریاها و اقیانوس‌ها منبعی است بسیار عظیم که علاوه بر تأمین نیازهای انرژی قادر است بخش قابل توجهی از احتیاجات غذایی بشر را در دهه‌های آینده تأمین کند. منابع باستانی همچون نفت، گاز و ذغال سنگ، علاوه بر این‌که تجدیدپذیر نیستند، باعث آلودگی محیط نیز می‌شوند[۱].

شواهد نشان می‌دهند که با آزاد شدن مقدار زیادی دیوکسید کربن و دیگر گازها به جو، آن‌ها از راه‌های زیادی از جمله باران اسیدی، دوباره به محیط بازمی‌گیرند. اما انرژی دریاها و اقیانوس‌ها نه تنها تجدیدپذیر است، بلکه باعث آلودگی نیز نمی‌شود و می‌تواند به تنهایی تمام برق مورد نیاز بشر را در آینده تولید کند[۱].

«مرکز اطلاعات انرژی آمریکا»[1] در سال ۱۹۹۹، انرژی مورد استفاده در جهان برای منابع گوناگون را به صورت زیر اعلام کرد:

ذغال سنگ ۵۱/۴ درصد، هسته‌ای ۱۹/۸ درصد، گاز طبیعی ۱۵/۱ درصد، آب ۸/۳ درصد، نفت ۳/۱ درصد و انرژی‌های تجدیدپذیر ۲/۳ درصد که خود شامل توده‌ی گیاهی ۷۸/۲٪ درصد، زمین گرمایی ۱۷/۱ درصد، باد ۴/۳ درصد و خورشید ۰/۴ درصد. طبق شواهد، انرژی دریاها و اقیانوس‌ها تا سال ۱۹۹۹ عملاً در مصرف کل انرژی جهانی نقشی نداشته است. همین‌طور، تا این سال، کم‌ترین هزینه‌ی تولید الکتریسیته، $۰/۰۲ kWh/$ ـ $۰/۰۱ برای انرژی زمین گرمایی، $۰/۰۳ kWh/$ برای انرژی باد و آب، $۰/۰۴ kWh/$ برای انرژی خورشید و توده‌ی گیاهی، $۰/۰۶ kWh/$ ـ $۰/۰۵ برای جریان‌های دریایی و تابش‌های نوری، و کم‌ترین هزینه‌ی تولید گرما $۰/۰۰۵ kWh/$ برای زمین گرمایی، $۰/۰۱ kWh/$ برای توده‌ی گیاهی، و $۰/۰۳ kWh/$ ـ $۰/۰۲ برای خورشید گرمایی گزارش شده است[۲].

به هر حال بررسی‌ها نشان می‌دهند، انرژی‌های تجدیدپذیر ۵۰ ـ ۲۰ درصد ذخیره‌ی انرژی جهان را در نیمه‌ی دوم قرن ۲۱ تأمین می‌کنند و سیاست بسیاری از کشورها، سرمایه‌گذاری روی این منبع بسیار عظیم انرژی است[۲].

## جدول ۱ . فناوری تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر

| فناوری | انرژی حاصل | کاربرد |
|---|---|---|
| **● انرژی توده‌ی گیاهی** | | |
| احتراق (مقیاس خانگی) | گرما (پختن) | قابل استفاده در بیش‌تر مکان‌ها : فناوری پیشرفته موجود است . |
| احتراق (مقیاس صنعتی) | گرما ، بخار ، الکتریسیته | قابل استفاده در بیش‌تر مکان‌ها : دارای توان بالقوه برای پیشرفت |
| تبدیل بخار/ تولید انرژی | گرما ، الکتریسیته | |
| تبدیل بخار/ تولید سوخت | هیدروکربن ، متانول ، هیدروژن | در حال تکامل و پیشرفت |
| هیدرولیز و تخمیر | اتانول | تجارتی برای محصولات شکر و نشاسته : تولید |
| تجزیه‌ی شیمیایی با گرما/ | نفت‌های گیاهی | از چوب در حال پیشرفت در حال راهنمایی : |
| تولید سوخت مایع | | بعضی موانع فنی |
| تجزیه‌ی شیمیایی با گرما/ | ذغال چوب | فراوان به کار رفته است : کارآیی بالا |
| تولید سوخت جامد | | |
| تقطیر | دیزل | فراوان به کار رفته است : نسبتاً گران |
| دم کردن | گاز | تجارتی |
| **● انرژی باد** | | |
| پمپ آب و شارژ باتری | حرکت ، توان | ماشین‌های کوچک ، فراوان به کار رفته است . |
| توربین‌های ساحلی | الکتریسیته | تجارتی ، فراوان به کار رفته است . |
| توربین‌های دور از ساحل | الکتریسیته | نمایشی و در حال توسعه |
| **● انرژی خورشیدی** | | |
| تبدیل انرژی خورشیدی به | الکتریسیته | فراوان به کار رفته است : گران ، نیاز به توسعه |
| الکتریکی | | بیش‌تر دارد . |
| الکتریسیته‌ی گرمایی خورشید | گرما ، بخار ، الکتریسیته | نمایشی : به توسعه‌ی بیش‌تر نیاز دارد . |
| انرژی خورشیدی دمای پائین | گرما (پختن ، سرد و خشک کردن) | تجارتی : اجاق‌ها ، نمایشی : خشک‌کن ، |
| | | فراوان به کار رفته است . |
| انرژی خورشیدی غیرفعال | گرما ، سرما ، نور ، تهویه | نمایشی ، فعال نیست . |
| ترکیب نور مصنوعی | سوخت‌های قوی هیدروژنی | تحت بررسی نهایی ، به کار رفته است . |
| **● انرژی آب** | الکتریسیته ، توان | تجارتی : مقیاس کوچک و بزرگ |
| **● انرژی گرمایی زمین** | گرما ، بخار ، الکتریسیته | تجارتی |
| **● انرژی دریایی** | | |
| انرژی جزر و مد | الکتریسیته | به کار رفته است : نسبتاً گران |
| انرژی موج | الکتریسیته | تحت بررسی و توسعه است . |
| انرژی گرمایی اقیانوسی | الکتریسیته ، گرما | تحت بررسی و توسعه است ، نمایشی . |
| گرادیان شوری/ انرژی اسمزی | الکتریسیته | نظری |
| توده‌ی گیاهی دریایی | سوخت‌ها | تحت بررسی و توسعه است . |

## انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان

از آغاز پیدایش تمدن، منابع انرژی تجدیدپذیر برای انسان بسیار مهم بوده است. بشر در طول تاریخ از راه‌های متفاوت، از این منابع انرژی برای گرم کردن، پختن، حرکت دادن اجسام و تولید الکتریسیته استفاده کرده است. در جدول ۱، فناوری استفاده از منابعی همچون «بیوماس» یا توده‌ی گیاهی، باد، خورشید، انرژی آب، انرژی گرمایی زمین و انرژی دریا آورده شده است [۲].

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از راه‌های جدید، پاسخی به هدف‌های اقتصادی، محیطی، اجتماعی و سیاسی کشورهاست، از جمله:

- ایجاد شکل‌های گوناگونی از انرژی که برای تولید گرما، سوخت‌ها و الکتریسیته به کار می‌روند.
- ایجاد تعادل بین استفاده از سوخت‌های فسیلی و نجات آن‌ها به منظور کاربردهای دیگر برای تولیدات آینده.
- توسعه‌ی منابع انرژی تمیز و پاک.
- افزایش تغییرپذیری سیستم‌های انرژی.
- کاهش آلودگی و تابش از سیستم‌های انرژی.
- کاهش مصرف سوخت‌های وارداتی.

البته بسیاری از فناوری‌های تجدیدپذیر انرژی، برای کاربردهای کوچک در مناطق دور یا روستایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که باعث ایجاد شغل‌های محلی و پاسخگوی اقتصاد محلی هستند. اما با پیشرفت سریع فناوری می‌توان به استفاده‌ی هرچه بیش‌تر از این منابع امیدوار بود. در جدول ۲ میزان رشد استفاده از فناوری‌های منابع نشان داده شده است. بعضی از این منابع انرژی در ۲۰ سال آینده نسبت به بقیه رشد سریع‌تری خواهند داشت، اما باید هزینه‌های مربوط به ساخت و تولید آن‌ها را نیز در نظر گرفت. در همه‌ی موارد، منابع انرژی سهم بزرگ‌تری برای ذخیره‌ی الکتریسیته نسبت به حال دارند. مهم است توجه شود که تعادل میان منابع گوناگون انرژی می‌تواند راهکاری برای جانشینی انرژی فسیلی باشد [۳].

### ۱. انرژی تجدیدپذیر دریاها و اقیانوس‌ها

طیف‌های متفاوتی از انرژی را می‌توان در دریاها شناسایی کرد. وقتی انسان مشاهده می‌کند که یک کشتی بزرگ تجاری توسط امواج در هم‌شکسته می‌شود، یا یک کشتی در اثر جریان‌های دریایی کیلومترها از مسیر خود فاصله می‌گیرد، و یا امواج سهمگین در دریای توفانی تجهیزات بندری را ویران می‌کنند، به وجود پتانسیل بالای انرژی دریا پس می‌برد.

چندین نمونه از منابع انرژی دریا وجود دارند. بیش‌ترین دستگاه‌های تبدیل انرژی دریا عبارتند از: انرژی جزر و مد که از میدان‌های گرانشی ماه و خورشید ناشی می‌شود، انرژی گرمایی که نتیجه‌ی مستقیم تابش خورشیدی است، جریان‌های دریایی متأثر از اختلاف شوری و دما به اضافه‌ی اثرهای جزر و مدی، و

**جدول ۲. رشد استفاده از فناوری منابع تجدیدپذیر**

| سال / عنوان | ۲۰۰۱-۱۹۹۶ | ۲۰۱۰-۲۰۰۱ | ۲۰۲۰-۲۰۱۰ | ۲۰۳۰-۲۰۲۰ | ۲۰۴۰-۲۰۳۰ |
|---|---|---|---|---|---|
| توده‌ی گیاهی | ٪۲ | ٪۲/۲ | ٪۳/۱ | ٪۳/۳ | ٪۲/۸ |
| آب زیاد | ٪۲ | ٪۲ | ٪۱ | ٪۱ | ۰ |
| آب کم | ٪۶ | ٪۸ | ٪۱۰ | ٪۸ | ٪۶ |
| باد | ٪۳۳ | ٪۲۸ | ٪۲۰ | ٪۷ | ٪۲ |
| خورشید گرمایی | ٪۱۰ | ٪۱۶ | ٪۱۶ | ٪۱۴ | ٪۷ |
| خورشید گرمایی الکتریکی | ٪۲ | ٪۱۶ | ٪۲۲ | ٪۱۸ | ٪۱۵ |
| زمین گرمایی | ٪۶ | ٪۸ | ٪۸ | ٪۶ | ٪۴ |
| دریایی | ۰ | ٪۸ | ٪۱۵ | ٪۲۲ | ٪۲۱ |

## جدول ۳ . منابع انرژی دریا و کاربرد آن‌ها

| منبع | محدوده | بهترین مصرف |
|---|---|---|
| جزر و مد | آب دریا و اقیانوس | انرژی الکتریکی ـ جنبشی |
| امواج | آب دریا و اقیانوس | انرژی الکتریکی |
| دما | آب دریا و اقیانوس | انرژی الکتریکی ـ گرمایی |
| شوری | آب دریا، حوضه‌های شور رودخانه | انرژی الکتریکی ـ شیمیایی |
| جریان‌ها | آب دریا و اقیانوس | انرژی الکتریکی ـ جنبشی |
| توده‌ی گیاهی دریایی | آب دریا و اقیانوس | انرژی الکتریکی |

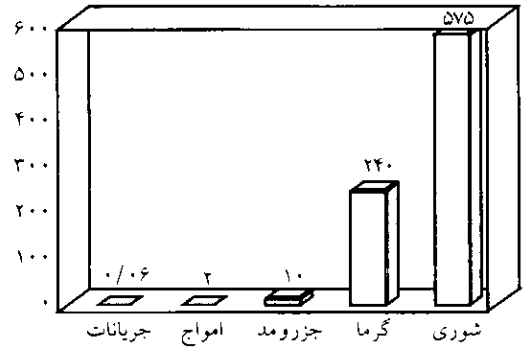
امواج دریا که با وزش باد روی سطح آن تولید می‌شوند. دیگر فناوری‌ها، مثل طرح گرادیان شوری، در سطح پائین‌تری از توسعه هستند. جدول ۳، منابع انرژی دریا و کاربرد آن‌ها را نشان می‌دهد [۴].

انرژی جزر و مد، از وقتی یک دستگاه با توان ۲۴۰ MW بیش از ۳۰ سال به طور موفقیت‌آمیز کار می‌کند، به عنوان بیش‌ترین راه کسب انرژی از دریا تلقی می‌شود. به خاطر هزینه‌ی زیاد این نوع، دستگاه‌های دیگری در مقیاس کوچک‌تر ساخته شده‌اند [۵].

استفاده از انرژی گرمایی دریا به دلیل عوامل اقتصادی و سرمایه‌گذاری کلان، تا سال ۱۹۸۰ امیدوارکننده نبود. بهره‌برداری از جریان‌های دریایی با ساختن دستگاه‌های زیرآبی مثل آسیاب‌های بادی می‌تواند مورد استفاده‌ی فراوانی قرار گیرد. به خاطر مشخصات پیچیده‌ی امواج دریایی، پیشرفت فناوری مهار این منبع عظیم، به تلاشی گسترده‌تر از دیگر انواع منابع احتیاج دارد [پیشین].

به منظور مقایسه‌ی این انرژی‌ها فرض می‌کنیم، توان خروجی هر کدام از روش‌های فنی، تبدیل آن‌ها به نیروی الکتریسیته باشد. در سال ۱۹۷۰ در کل دنیا، ظرفیت تولید نیروی الکتریسیته‌ی نیروگاه‌ها، حدود یک میلیون مگاوات بود که ثلث آن در ایالات متحده‌ی آمریکا، ثلث آن در اروپا و بقیه در سایر نقاط جهان تولید می‌شد [۴].

یک راه مناسب برای مقایسه‌ی چگالی انرژی منابع گوناگون، در نظر گرفتن هر کدام از آن‌ها به صورت انرژی پتانسیل یک ستون آب است (نمودار ۱). انرژی که می‌توان از یک محوطه‌ی موردنظر از سطح دریا به دست آورد، بسته به روش مورد استفاده فرق می‌کند که بیش‌ترین مقدار مربوط به شوری و کم‌ترین مقدار مربوط به جریان‌هاست [۴].



## ۲. انرژی گرادیان شوری

یکی از منابعی که می‌توان انرژی زیادی از آن به دست آورد، در محل برخورد آب شیرین و آب شور به وجود می‌آید. تاکنون پیشنهادهای گوناگونی به منظور استفاده از این پتانسیل ارائه شده است. برای مثال، از این منبع می‌توان در محل ورود آب رودها به دریاها، یعنی مصب رودها استفاده کرد. این قدرت را می‌توان به وسیله‌ی اختلاف فشار تراوش بین محلول‌های با غلظت‌های متفاوت از نمک نشان داد که به وسیله‌ی یک غشای نیمه تراوا که اجازه‌ی عبور آب از یک سمت را می‌دهد، ولی اجازه‌ی عبور نمک از سمت دیگر را نمی‌دهد. [۴].

یکی از رودخانه‌های مهم دنیا، رودخانه‌ی کلمبیاست. تحقیقات نشان می‌دهد که به مقدار کل انرژی تولید شده توسط سدهایی که روی رودخانه بسته شده است، انرژی بر اثر مخلوط شدن کنترل نشده‌ی آب شیرین با آب دریا در دهانه‌ی رودخانه به هدر می‌رود. این رودخانه دارای دبی ۶۶۰۰ لیتر بر ثانیه است. اگر پتانسیل تراوشی نصف جریانی را که وجود دارد، با کارایی ۳۰ درصد در نظر بگیریم، می‌توان ۲/۳kW الکتریسیته تولید کرد [۴].

## ۳. انرژی گرمایی دریا

بیش از ۷۰ درصد از سطح کره‌ی زمین را دریاها و اقیانوس‌ها پوشانده‌اند. بنابراین، بیش‌تر انرژی تابشی خورشید را که به سطح زمین می‌رسد، این قسمت دریافت می‌کند. به ویژه نواحی استوایی که زاویه‌ی تابش خورشید نسبت به سطح زمین بیش‌تر است، انرژی گرمایی بیش‌تری را دریافت می‌کنند و این موضوع، باعث تولید اختلاف دما بین آب‌های سطحی و عمقی می‌شود. دستگاه‌های طراحی و ساخته شده‌اند که قادرند، با استفاده از انرژی گرمایی موجود در دریاهای نواحی استوایی، برق تولید کنند که به اختصار OTEC[۲] نامیده می‌شوند [۱].

این دستگاه‌ها از آب گرم و سطحی دریاها (با دمای ۲۴ تا ۲۸ درجه‌ی سلسیوس) به عنوان چشمه‌ی گرما با دمای بالا و از آب‌های سرد اعماق ۵۰۰ تا ۱۲۰۰ متر (با دمای ۴ تا ۸ درجه‌ی سلسیوس) به عنوان چشمه‌ی گرما با دمای پائین‌تر استفاده می‌کنند. اختلاف انرژی گرمایی را می‌شود به کار مکانیکی تبدیل و از آن برای تولید برق استفاده کرد [۱]. کارایی یک ماشین گرمایی کارنو از رابطه‌ی کارنو (۱) به دست می‌آید:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \qquad (1)$$

که $T_c$ دمای چشمه‌ی سرد و $T_H$ دمای چشمه‌ی گرم است. اگر در نواحی استوایی، بیش‌ترین دما را به ۳۰ سلسیوس یا ۳۰۳ کلوین و کم‌ترین دما را ۴° سلسیوس یا ۲۷۷ کلوین بگیریم، با داشتن بهترین شرایط و ماشین گرمایی ایده‌آل، کارایی ماشین ۸/۶ درصد به دست می‌آید و بیش از ۹۰ درصد انرژی گرمایی آب سطحی دریا تلف می‌شود. البته با در نظر گرفتن تلفات گرمایی و مصرف پمپ‌ها و سایر اجزا، به بازدهی حدود ۳ـ۲/۵ درصد می‌رسیم که بسیار کم است. بنابراین، برای جبران این کارایی کم، باید حجم بالایی از آب دریا را درون دستگاه پمپ کنیم. درعوض، با چشمه‌ی عظیمی از انرژی گرمایی که منطقه‌های وسیعی را در برمی‌گیرد، روبه‌رو هستیم که علاوه بر تجدیدپذیر بودن می‌توان به صورت ۲۴ ساعته نیز از آن استفاده کرد [۱].

## ۴. انرژی جزر و مد

انرژی جزر و مد، اولین فناوری انرژی اقیانوسی است که مانند دستگاه‌های تبدیل نیروی آب، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافته است. مناطقی که در آن‌ها انرژی جزر و مد از نظر اقتصادی می‌تواند توسعه یابند، به نسبت کم هستند [۶] به طور کلی، به بالا و پائین رفتن آب‌های سطح زمین در مدت زمان مشخص جزر و مد یا کشند گویند که منشأ آن، گرانش ماه و خورشید و چگونگی قرار گرفتن آن‌ها نسبت به کره‌ی زمین است. جزر و مد، حرکتی دوره‌ای و دارای دوره‌ی تناوب، بسامد، دامنه، فاز و سرعت است و حرکت کشندی، حرکتی موجی است که می‌تواند سینوسی یا کسینوسی باشد [۱].

بهره‌برداری از انرژی جزر و مدی در جاهایی که متوسط گستره‌ی جزر و مدی بزرگ‌تر از ۵ متر و توپوگرافی منطقه برای ساختار دستگاه مناسب است، عملی به نظر می‌رسد. میزان انرژی قابل حصول از یک جزر و مد، تقریباً با مربع گستره‌ی جزر و مد تغییر می‌کند. توان خروجی از یک دستگاه جزر و مدی با ضریب چهار از یک چرخه‌ی ضعیف به شدید جزر و مد تغییر می‌کند؛ هرچند که انرژی جزر و مدی هم دراندازه و هم از نظر زمانی، به میزان زیادی قابل پیش‌بینی است.

## ۵ . انرژی امواج

انرژی امواج نتیجه‌ی تأثیر باد روی اقیانوس‌ها و دریاهاست . در واقع باد که بر اثر اختلاف دمای زمین تولید می‌شود ، با وزش روی محیط‌های آبی قسمتی از انرژی‌اش را به انرژی موج تبدیل می‌کند . میزان انرژی منتقل شده به موج ، سرعت باد ، مدت زمان هر وزش باد و فاصله‌ای که باد روی آب می‌وزد (طول بادگیر) ، بستگی دارد [۵] . انرژی امواج سطحی به دو صورت پتانسیل و جنبشی است . کل انرژی به ازای واحد عرض تاج موج ، به صورت زیر است :

$$E = \gamma H^{2} L / 8 \qquad (۲)$$

که در آن ، H ارتفاع موج ، L طول موج و γ چگالی آب دریاست .

طبق نظریه‌های گوناگون ، ایستگاه‌های بزرگ تولید انرژی می‌توانند تقریباً همه‌ی نیاز ما به انرژی را برطرف سازند . البته عوامل محیطی بسیاری در تحقق این امر وجود دارند و در عمل ، دستگاه‌های تجارتی برای طرح‌هایی در مقیاس کوچک ساخته شده‌اند .

توان قابل حصول در دریاهای واقعی در آب‌های عمیق ، به صورت توان به ازای واحد طول درعرض تاج موج بیان شده است :

$$P = 0/5 H_s^{2} T_e \qquad (۳)$$

که P بر حسب کیلووات بر متر ، $H_s$ بر حسب متر و $T_e$ بر حسب ثانیه است .

در آب‌های عمیق که طول موج کوچک‌تر از نصف عمق آب است ، امواج انرژی خود را به آهستگی از دست می‌دهند . پس می‌توانند با کم‌ترین اتلاف انرژی ، در فاصله‌های دور به صورت امواج مرده پیش روند . بنابراین ، سواحلی با طول بادگیرهای بزرگ و بیش‌ترین جهت باد غالب برای بهترین شرایط به دست آوردن انرژی امواج ، اساساً بین عرض جغرافیایی ۴۰ تا ۶۰ در نیمکره‌ی شمالی و جنوبی قرار دارند ؛ مانند سواحل غربی آمریکا ، اروپا به خصوص انگلستان ، استرالیا و نیوزلند [پیشین] .

توان نیروگاه‌های موجی در جهان TW ۱۰ ـ ۱ تخمین زده شده است و در منطقه‌های معتدل با دمای بین ۳۰ تا ۶۰ درجه ، توان متوسط سالیانه بین ۲۰ تا ۷۰ کیلووات بر متر به دست آمده است . البته این تخمین با توجه به پدیده‌های موجی گوناگون محاسبه شده است [۵] .

## ۶ . انرژی جریان‌های دریایی

استفاده از انرژی جریان‌های اقیانوسی با استفاده از روش‌های مشابه به دست آوردن انرژی از باد ، ابتدا در اروپا به صورت نظری مطرح شد . توان کلی جریان‌های اقیانوسی حدود 5TW تخمین زده شده که همان مقدار مصرف الکتریسیته جهانی است . البته بهره‌برداری از انرژی جریان‌ها فقط در محیط‌هایی که جریان‌ها متمرکز شده‌اند ، مانند تنگه‌ها و آبراهه‌های باریک بین جزیره‌ها و خشکی‌ها ، عملی است . بنابراین ، فقط یک قسمت کوچکی از این انرژی را می‌توان به الکتریسیته با شکل‌های دیگر انرژی تبدیل کرد [پیشین] .

توان یک جریان از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید :

$$p = \frac{1}{2} \rho A V^{3} \qquad (۴)$$

که در آن ، A سطح مقطع پره‌ی توربین ، ρ چگالی آب و V سرعت جریان است .

طبق مطالعات انجام شده در کشورهای انگلستان ، یونان ، ایرلند ، فرانسه و ایتالیا ، استفاده از این منبع مهم است و ۱۰۶ مکان برای استفاده با ذخیره‌ی توان 48TWh در سال پیدا شده است . در چین می‌توان حدود ۷۰۰۰ mW انرژی از جریان‌های جزر و مدی به دست آورد [۵] .

برای جریان‌های جزر و مدی در بیش‌تر مکان‌ها ، کارایی ۵۰ ـ ۴۰ درصد و برای جریان‌های غیرجزر و مدی ، کارایی ۸۰ درصد پیشنهاد شده است . هرچند هنوز اطلاعات در مورد جریان‌های دریایی کامل نشده است ، اما ارزیابی‌ها به طور جامع و وسیع ادامه دارند [۵] .


مراجع :

۱ . رستم‌پور ، و . (۱۳۷۷) . استفاده‌ی بهینه از انرژی گرمایی نواحی جنوبی دریای خزر در تولید برق . پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد فیزیک دریا . دانشگاه تربیت مدرس .

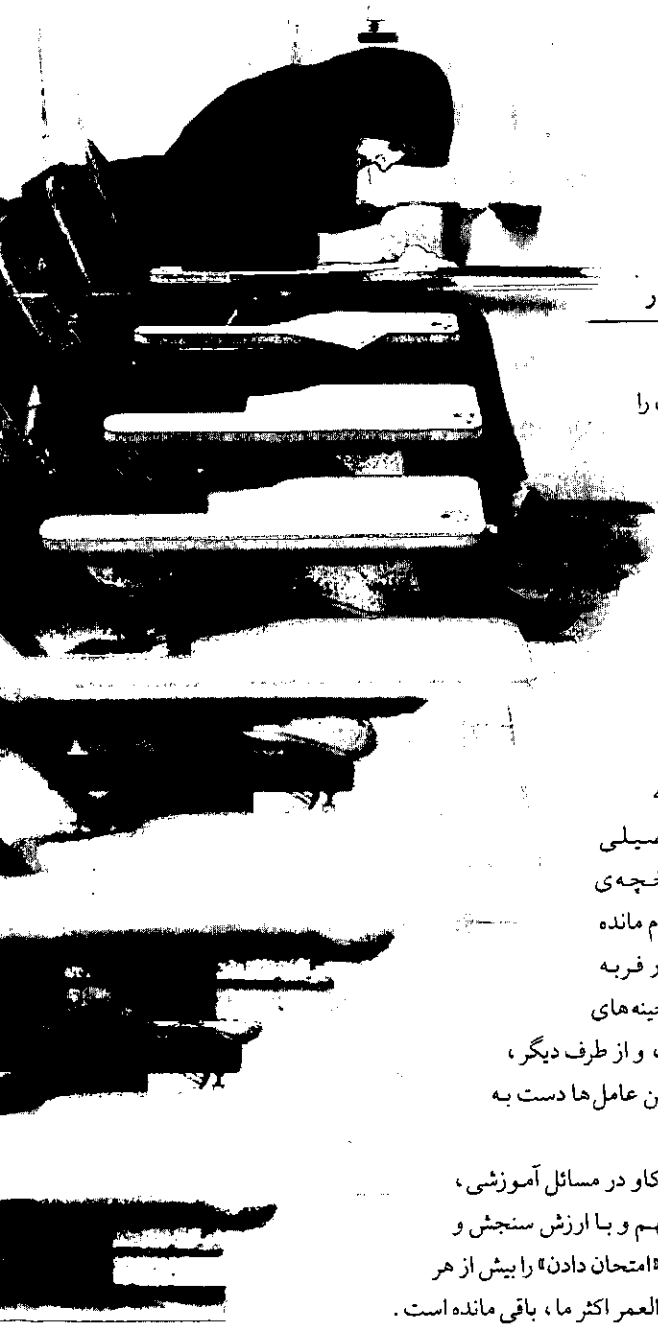
2. Turkenbury, W.C. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. chapter 7: Renewable energy technology. 220-271.

3. www. Erec-renewable.org/renewable energy scenario to 2040. ppt: 1-16.

۴ . ملازنیل ، م . (۱۳۷۷) . انتخاب سیستم بهینه‌ی جذب انرژی از امواج دریا در نواحی شمالی خلیج‌فارس . پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک . دانشگاه صنعتی شریف .

5. Pontes, M.T. and Falcao, A. Ocean energy conversion. Instituto nacional de engenharia e tecnologia industrial, Lisboa, Portugal.

6. www. wavegen.uk



# رویکردهای نو در سنجش آموخته‌های دانش‌آموزان

طاهره رستگار


## چکیده

در این مقاله می‌کوشیم، رویکردهایی نو در شیوه‌های سنجش از دانش‌آموزان را به صورت مختصر مرور کنیم. مطالعات جهانی دربارهٔ آن‌ها را مورد تحلیل و بررسی قرار دهیم. با کمک مستندات پژوهشی لزوم تغییر نگرش و گذر از شیوه سنتی به شیوه‌های معتبر را یادآوری کنیم و راه‌هایی جدید در جهت بهبود امر سنجش در اختیار خواننده قرار دهیم.


**کلید واژه‌ها:** سنجش، دانش‌آموز، امتحان، آموزش فیزیک

## مقدمه

مقایسه‌ی سرعت تغییر و تحول در شیوه‌های آموزش و ارزشیابی، در اکثر نظام‌های آموزشی جهان یادآور مسابقه‌ی خرگوش و لاک‌پشت است. در حالی که شیوه‌های آموزش مدام در حال متحول و نو شدن هستند، ارزشیابی پیشرفت تحصیلی دانش‌آموزان، شیوه‌های چند دهه‌ی قبل را تکرار می‌کنند. به عبارت دیگر، تاریخچه‌ی نظام‌های آموزشی در مقوله‌ی ارزشیابی کیفی و جامع از دانش‌آموزان، بسیار لاغراندام مانده است، در حالی که در زمینه‌ی ارزشیابی از مهارت‌های ساده و دانش حافظه‌ای بسیار فربه است. حاصل این کار از یک طرف، روانه کردن افرادی به جامعه است که دارای گنجینه‌های دانش و احتمالاً مهارت‌های قطعه قطعه‌ای هستند که کاربردی در زندگی روزمره ندارند، و از طرف دیگر، دسته‌بندی مدرسه‌ها و دانش‌آموزان به نمونه، تیزهوش، المپیادی و... است. تمام این عامل‌ها دست به دست هم داده‌اند تا رغبت یادگیری را در دانش‌آموزان متوسط به پائین، کاهش دهند.

در این مقاله سعی شده است، ابتدا یک پرسش اصلی طرح شود و سپس با کندوکاو در مسائل آموزشی، پاسخی برای آن پیدا کرد: «چرا ما نتوانسته‌ایم شیوه‌هایی مناسب برای فرایند بسیار مهم و با ارزش سنجش و ارزشیابی طراحی کنیم؟ هر کدام از ما به خوبی می‌دانیم که در طول عمر تحصیلی خود «امتحان دادن» را بیش از هر کار دیگری تجربه کرده‌ایم امّا اکنون خاطره‌ی اغلب آن‌ها، به صورت کابوس‌های مادام‌العمر اکثر ما، باقی مانده است.

در واقع، مسؤولیت اندیشیدن، مطالعه و بررسی کردن، پژوهش کردن و سپس کار کارشناسی بر اساس

یافته‌های پژوهش انجام دادن، به عهده‌ی کدام بخش از وزارت آموزش و پرورش است؟ معلم، برنامه‌ریزان درسی، محققان دانشگاهی و یا دفترهای سنجش و ارزشیابی؟ پیدا کردن راه چاره برای گذر از روش سنتی به روش‌های معتبری که بر اساس پژوهش معرفی شده‌اند، بر عهده‌ی کدام ارگان آموزشی است؟ بدیهی است در این راه مانع‌های متعددی وجود دارند که حذف آن‌ها به شرط روشن بودن برنامه‌ی جایگزین، عزم تمام دست‌اندرکاران آموزش را می‌طلبد.

چند دهه قبل، دیویی، هم زمان با انتشار اولین آزمون استاندارد هشدار داد که خطر آزمون استاندارد در ماهیت این نوع ابزارهای اندازه‌گیری نیست، بلکه در افرادی است که آن را اجرا می‌کنند و فراموش می‌کنند آنچه این آزمون اندازه می‌گیرد، در واقع همان روش‌های موجود در آموزش است. امروزه نیز مسأله همچنان باقی است. در کشور ما انبوهی از این گونه آزمون‌ها را شرکت‌های گوناگون چاپ و منتشر می‌کنند و میلیون‌ها معلم و دانش‌آموز هم در سراسر جهان از آن‌ها استفاده می‌کنند؛ بی‌آن‌که به محدودیت‌های روانی، آموزشی و تربیتی آن‌ها توجه داشته باشند. امروزه اعتقاد بر این است که فرایندهای آموزش، بسیار درهم تنیده‌تر از آنی هستند که ما در لفظ، و بعضی مواقع در عمل به کار می‌بریم. رینولدز [۱]، فرایندهایی را که طی می‌شوند تا آموزش به واقع اتفاق افتد، یعنی تهیه‌ی استانداردهای برنامه، برنامه‌ی تدریس و سیستم سنجش را، سه رأس یک مثلث می‌داند و بیان می‌کند، استانداردهای برنامه با برنامه‌ی تدریس در ارتباط هستند. برنامه‌ی تدریس و شیوه‌ی ارزشیابی اتحاد دارند و سیستم سنجش و ارزشیابی باعث اعتبار برنامه‌ی درسی می‌شود. آیا در فرایند آموزشی که ما طی می‌کنیم، چنین ارتباط هماهنگی بین رأس‌های مثلث در شکل ۱ وجود دارد؟

آنچه واقعیت دارد این است که ما همواره در کلاس درس، آموزش را در خدمت سنجش درآورده‌ایم. در حقیقت، آن چیزی را آموزش می‌دهیم که قصد داریم در دانش‌آموزان بسنجیم و نه آن چیزی را می‌سنجیم که آموزش داده‌ایم؛ یعنی سنجش هدف شده است و نه وسیله. امروزه این پیام مهم پیش روی مجامع آموزشی وجود دارد: سنجشی که برای ارتقای یادگیری طراحی می‌شود، مهم‌ترین ابزار منحصر به فرد برای افزایش یادگیری و نیز تقویت یادگیری مادام‌العمر است. همگی ما معلمان زمانی دانش‌آموز بوده‌ایم و در آن زمان به خوبی ناتوانی نظام سنجش را در ارزشیابی خودمان با پوست و گوشتمان حس کرده‌ایم. به خوبی احساس کرده‌ایم که شیوه‌های سنجش متداول در سنجش بسیاری از توانایی‌ها و ارزش‌های خوبمان ناتوانند. ولی امروز که معلم شده‌ایم، همه را از یاد برده‌ایم و دانش‌آموزانمان را در همان دور باطلی که خودمان گرفتارش بوده‌ایم، گرفتار کرده‌ایم.

برای آسیب‌شناسی این مشکل لازم است ابتدا به پرسش‌های زیر پاسخ دهیم:

۱. فارغ‌التحصیل نظام آموزشی معتبر چه ویژگی‌هایی دارد؟

۲. ویژگی‌نمایی نظام آموزش معتبر چیست؟

۳. با توجه به پاسخ پرسش‌های ۱ و ۲، چه سنجشی می‌تواند به درستی تعیین کند که آیا هدف‌های نظام آموزش معتبر در خروجی‌های این نظام تحقق پیدا کرده است؟

دست اندرکاران ایجاد مدرسه‌های متفکر [۱] معتقدند که خروجی یک نظام آموزشی برای یادگیری مادام‌العمر باید دارای توانایی‌های زیر باشد:

- توانایی و دانش لازم در انتخاب شیوه‌ی برخورد با مسائلی که حل آن‌ها به تفکر و گذشت زمان نیاز دارد.
- تمایل و مهارت کار در گروه‌های اجتماعی.
- توانایی برقراری ارتباط مناسب در شرایط متفاوت.
- ارج گذاری به ارزش‌های والای اجتماعی، انسانی و فرهنگی.
- توانایی حل مسائلی که به خلاقیت و ذکاوت احتیاج دارد [۴].

با کمی تأمل در ویژگی‌های دانش‌آموزانمان که در پایان مقاطع متفاوت تحصیلی روانه‌ی اجتماع می‌کنیم، می‌توانیم به خوبی قضاوت کنیم که آیا در پرورش افرادی با چنین ویژگی‌هایی موفق بوده‌ایم یا خیر؟

بدیهی است اگر سیستم آموزشی ما بر مدار سنتی «معلم محور» بچرخد، نمی‌توان انتظار داشت که خروجی‌های این سیستم دارای ویژگی‌های بالا باشند. بنابراین، طبیعی است که در هر حرکتی نو، ابتدا شیوه‌ی آموزش سنتی رایج باید متحول شود. به راستی آموزش معتبر و با ارزش، از دیدگاه‌های فن آموزش و ارزشیابی چه ویژگی‌هایی دارد؟ گروهی از علمای فن آموزش که خود را بانیان مدرسه‌های متفکر می‌دانند، ویژگی‌های زیر را برای فرایند آموزش معتبر ذکر می‌کنند:

- با پژوهش همراه باشد.
- سعی در تلفیق دانش داشته باشد.
- زندگی گروهی فرد را اصل قرار دهد.
- فراگیر را به یادگیرنده‌های مادام‌العمر تبدیل کند.

در فرایند این شیوه‌ی آموزش، سنجش و ارزشیابی مفهومی متفاوت از برگزاری جلسه‌های سنتی ارزشیابی پیدا می‌کند و دانش‌آموز نقش بارزی در آموزش خود دارد [۴]. پاول بلک چه خوب بیان می‌کند که نیروی محرکه‌ی یادگیری آن کارهایی است

که معلم و دانش‌آموز در کلاس درس انجام می‌دهند؛ جایی که معلم مجبور است موقعیت‌های دشوار و پیچیده‌ای را مدیریت کند و با برانگیختن کنجکاوی، افزایش توان اجتماعی و فردی، به یک گروه حدوداً ۳۰ نفره کمک کند، یاد بگیرند و فراگیران بهتری برای آینده‌شان شوند. وی به درستی بیان می‌کند، تنها زمانی استانداردهای آموزش را می‌توان افزایش داد که معلم وظیفه‌ی هدایت دانش‌آموزان برای این‌که فراگیران بهتری شوند، به درستی پیش ببرد [۲] [۶] و [۳].

اما پرسش مهم این است که آیا ارتقای استانداردهای آموزش، فقط وظیفه‌ی معلم است؟ به واقع این توقع غیرعادلانه و عجیب است که مشکل‌ترین بخش فرایند آموزش، یعنی ارتقای استاندارد یادگیری را فقط به عهده‌ی معلم بگذاریم. وظیفه‌ی سیاستگذاران امر آموزش در این میان چیست؟ حتماً شیوه‌هایی وجود دارند که سیاست گذاران بتوانند معلمان را در کمک به ارتقای استانداردهای آموزشی هدایت کنند. در نظام آموزشی ما به نظر می‌رسد، معضل بزرگ کنکور و شیوه‌ی اجرای آن، راه را بر هرگونه تحولی در فرایند سنجش و ارزشیابی بسته است.

ابتدا بهتر است مروری داشته باشیم بر یافته‌های حاصل از پژوهش‌های «گروه اصلاح سنجش انگلستان» که با مسؤولیت پرفسور پاول بلک و دیلان ویلیام بر ایجاد تحول در شیوه‌های سنجش و ارزشیابی، دست به کارهای پژوهشی با ارزشی زده‌اند. این گروه هدف خود را بر اساس این ایده بنا نهاد که «سنجش باید در خدمت آموزش قرار گیرد هر سنجشی که از دانش‌آموز به عمل می‌آید، باید فرصتی برای بهبود فرایند یادگیری وی نیز تلقی شود. هدف ارزشیابی دانش‌آموز نه تنها اندازه‌گیری استانداردها، بلکه توسعه و بهبود آنهاست [۶]. این گروه بر اساس مطالعات گسترده‌ای دریافت که رویکرد سنجش مستمر و رشد دهنده استانداردهای آموزشی را ارتقا می‌بخشد و این امر به خصوص در مورد دانش‌آموزانی که توانایی کم‌تری دارند، محسوس‌تر است. پژوهش آنان بیان می‌کند: «آنچه در فرایند یادگیری بسیار مهم است، میزان اعتماد به نفس دانش‌آموزان است» و ارتقای آموزش از طریق سنجش را به پنج عامل اساسی زیر وابسته می‌داند [۵]:

- سنجش باید دانش‌آموزان را در فرایند یادگیری خود درگیر کند.
- هر سنجشی باید به دانش‌آموزان بازخورد مؤثر بدهد.
- معلم در طراحی هر مرحله‌ی تدریس از نتیجه‌های سنجش استفاده کند.
- شیوه‌ی سنجش، تأثیر غیرقابل تردیدی بر ایجاد علاقه و اعتماد به نفس در دانش‌آموزان دارد. علاقه و اعتماد به نفس، عوامل کلیدی بهبود فرایند یادگیری هستند.
- فرایند سنجش باید دانش‌آموز را در ارزیابی کردن و تصمیم‌گیری برای اتخاذ شیوه‌هایی به منظور اصلاح و بهبود آموخته‌هایشان توانا سازد.

دسترسی به هدف‌های آموزشی بالا از طریق سنجش پایانی امکان‌پذیر نیست. سنجش پایانی هدف‌های خاص خود را دارد که فعلاً به آن‌ها نمی‌پردازیم. اما اگر هدف آموزش و پرورش شهروندانی با ویژگی‌هایی است که در ابتدای مقاله گفته شد، توجه به سنجش مستمر، و رشد دهنده [۲]، و نه سنجش‌های مکرر که معمولاً ویژگی‌های سنجش مستمر را ندارند، باید در دستور کار سیاست‌گزاران سنجش و ارزشیابی قرار گیرد. این گروه برای سنجش مستمر، پویا و رشد دهنده‌ی شیوه‌ی خاصی راارائه نکرده است، اما بیان می‌کند آن سنجشی مستمر است که دارای ویژگی‌های معینی باشد که بخشی از این ویژگی‌ها در زیر آمده است [۷]:

- سنجش مستمر بخشی از فرایند یادگیری است.
- آنچه در سنجش مستمر مهم است، توجه به شیوه‌ی یادگیری دانش‌آموز است.
- مهارت انجام سنجش مستمر، باید مهارت کلیدی حرفه‌ی معلمی به شمار آید.
- سنجش مستمر باید رغبت و تعهد یادگیری را افزایش دهد و به وی نه تنها بگوید که چه یاد می‌گیرد و چگونه یاد می‌گیرد، بلکه تعیین کند، میزان یادگیری او بر اساس چه ملاک‌هایی سنجیده می‌شود.
- سنجش مستمر باید به: دانش‌آموز توصیه‌های سازنده پیشرفت ارایه کند.
- برای دانش‌آموز فرصت‌های خودارزیابی فراهم کند.
- سنجش مستمر بر همه‌ی موفقیت دانش‌آموز اشراف داشته باشد.

یک تفاوت مهم این نوع سنجش با سنجش‌های رایج، نوع نگاه آن به یادگیری است. این رویکرد فراگیر را مسؤول نهایی یادگیری خود می‌داند و نه فرد دیگر را. بنابراین، سنجش به هدف یادگیری باید دانش‌آموزان را در هدف‌های یادگیری شریک سازد و به آنان اطلاعات لازم در مورد میزان موفقیت‌ها و نقطه‌های ضعف ارائه دهد تا گام بعدی را به درستی بردارند. دانش‌آموز بسیاری از این اطلاعات را از بازخوردی که به معلم می‌دهد، می‌گیرد، ولی بسیاری را هم از طریق درگیر شدن مستقیم در سنجش کارهای خود گردآوری می‌کند. آگاه بودن فراگیر نسبت به آنچه قرار است بیاموزد و نیز توانایی وی برای آن‌که به درستی در جهت هدف‌های یادگیری گام بردارد، نقش بسیار اساسی در فرایند یادگیری مادام‌العمر وی دارد. فراموش نکنیم که مرحله‌ی نهایی در سنجشی که در خدمت آموزش قرار می‌گیرد، استفاده از اطلاعات به دست آمده برای بهبود فرایند یادگیری است. به عبارت دیگر، سنجشی اعتبار دارد که بتواند تصویری واضح و سه بعدی از رشد مهارت‌ها، توانایی‌ها، دانش و نگرش دانش‌آموز بدهد. چنین تصویری واضح و شفاف است و نه تنها معلم، بلکه دانش‌آموز می‌تواند با مشاهده‌ی این تصویر، شاهد رشد، بالندگی و پیشرفت خود باشد. در پایان سال نیز براساس آن مشاهدات، معلمان و

دانش‌آموزان می‌توانند قضاوت کنند که به چه هدف‌هایی نائل شده‌اند و چه هدف‌هایی پیش‌رو دارند که باید برای دستیابی به آن‌ها تلاش کنند.

**وظیفه‌ی دولت و وزارت آموزش و پرورش در این میان چیست؟**

همه به خوبی می‌دانیم، هر زمان که لازم است در فرایند آموزشی که در کلاس درس اتفاق می‌افتد تغییری ایجاد شود، مهم‌ترین وجه کار آماده ساختن معلمان برای اعمال آن تغییر است. و این کار امکان ندارد مگر این که معلمان اولاً خود امتیازهای اعمال آن تغییر را بدانند و ثانیاً از فضای حمایتی مناسبی برخوردار شوند. آموزش معلمان از طریق آموزش‌های پیش و ضمن خدمت برای افزایش کیفی سنجش‌های کلاسی، می‌تواند گام مثبتی در جهت ارتقای استاندارد یادگیری باشد. به عبارت دیگر، مهارت سنجش با هدف یادگیری، بایدیکی از شاخص‌های اساسی در ویژگی‌های حرفه‌ای معلمانی باشد که به دنبال بهبود شرایط حرفه‌ای خود و کسب تجربه هستند. بنابراین، به‌نظر می‌رسد دغدغه‌ی مهم دلسوزانی که در آموزش فرزندان این مرز و بوم نقشی دارند، باید توجه لازم به فرایند آموزش معلمان در جهت اصلاح شیوه‌های سنجش و ارزشیابی فراگیران باشد، به گونه‌ای که بتوانند در فراگیران مهارت خودارزیابی و اصلاح فردی را پرورش دهند.

**آرتورکاستا چه خوب بیان می‌کند که هدف آموزش و پرورش،** تبدیل دانش‌آموزان به افرادی است که بتوانند هر زمان که لازم باشد، خودشان را ارزشیابی کنند و مسؤولانه تصمیم بگیرند. اگر دانش‌آموزان ما زمانی که فارغ‌التحصیل می‌شوند، در تشخیص خوب و بد و حل مسایل روزمره‌ی زندگی خود متکی به نظر دیگران باشند، تمام مقوله‌ی آموزشی ما زیر سؤال می‌رود؛ چرا که به واقع هدف نهایی و عالی آموزش را گم کرده‌ایم. [۴]

زیرنویس:

1. Mindful school
2. Formative assessment

مراجع:


۱. رستگار، طاهره. ارزشیابی در خدمت آموزش. انتشارات منادی تربیت. ۱۳۸۲.

۲. رستگار، طاهره «آموزش معلمان و ارزشیابی رشد دهنده». مقاله‌ی ارایه شده در سمینار ASE دانشگاه لیدز، انگلستان.

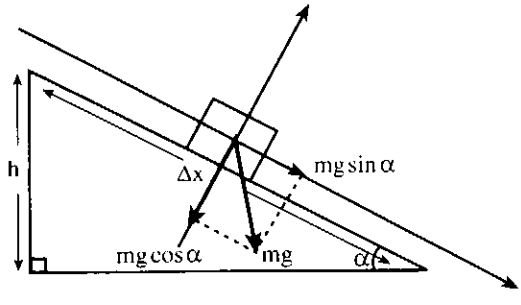
3. Assessment reform group, "Assessment for learning, Beyond the Black Box" (1999).
4. Bruck, Kay, "Assessing Authentic Learning".
5. Clark, S (2001), Unlocking f formative Assessment.
6. Blake, Paul and et. al "Inside The Black Box" (1989).
7. Assessment for Learning, 10 Principals for guiding the classroom practice" (1998).

# مقایسه زمان سقوط آزاد و زمان پایین آمدن جسم روی سطح شیبدار صاف

ناصر بصیری

**در کلاس درس بعد از محاسبه‌ی زمان رسیدن جسم روی سطح شیبدار بدون اصطکاک به آخر مسیر، برخی از دانش‌آموزان از دبیران می‌خواهند محور x را به موازات سطح افقی و محور y را عمود بر آن انتخاب کنند و زمان را به دست آورند که در متن زیر به این مطلب پرداخته می‌شود.**

جسمی که از بالای سطح شیبداری صاف (بدون اصطکاک) در شرایط خلأ رها می‌شود، با سرعت $v = \sqrt{2gh}$ در مدت زمان $t = \sqrt{\frac{2h}{g\sin^2\alpha}}$ به پائین سطح می‌رسد. این مطلب را در دو دستگاه مختصات بررسی می‌کنیم:



## الف) دستگاه مختصات با محور y عمود بر سطح

$F_x = ma_x \Rightarrow mg\sin\alpha = ma_x$

$\Rightarrow a_x = g\sin_\alpha$

با توجه به معادله‌ی مستقل از زمان داریم:

$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta x \Rightarrow v^2 - 0 = 2(g\sin\alpha)\frac{h}{\sin\alpha} \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$

با توجه به معادله‌ی حرکت با شتاب ثابت خواهیم داشت:

$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \Rightarrow \frac{h}{\sin\alpha} = \frac{1}{2}(g\sin\alpha)t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g\sin^2\alpha}}$

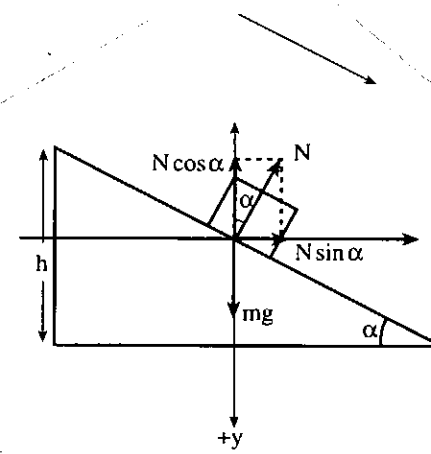
## ب) دستگاه مختصات با محور y قائم

در این دستگاه، ابتدا شتاب حرکت در راستای محور y را محاسبه می‌کنیم و آن‌گاه زمان پائین آمدن را به دست می‌آوریم:

$F_y = ma_y \Rightarrow mg - N\cos\alpha = ma_y$

از طرف دیگر، در سطح شیبدار مقابل $N=mg\cos\alpha$ است.

پس:




$mg - mg\cos^2\alpha = ma_y$

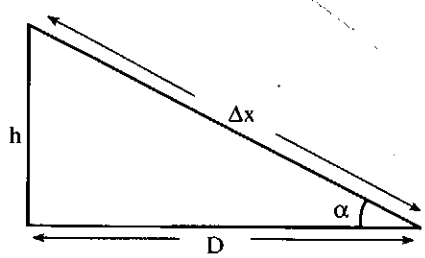
$\Rightarrow mg(1-\cos^2\alpha) = ma_y \Rightarrow a_y = g\sin^2\alpha$

با استفاده از معادله‌ی حرکت در راستای محور y خواهیم داشت:

$\Delta y = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \Rightarrow h = \frac{1}{2}(g\sin^2\alpha)t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g\sin^2\alpha}}$

با توجه به رابطه‌ی $t = \sqrt{\frac{2h}{g\sin^2\alpha}}$، زمان سقوط روی سطح شیبدار طولانی‌تر از زمان سقوط آزاد، یعنی $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ است.

در صورتی که در شکل مقابل D ثابت باشد، به ازای زاویه‌ی ۴۵°، آیا زمان سقوط روی سطح شیبدار صاف کم‌ترین مقدار است؟




$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \qquad (1)$

$\cos\alpha = \frac{D}{\Delta x} \Rightarrow \Delta x = \frac{D}{\cos\alpha}$

$(1) \Rightarrow \frac{D}{\cos\alpha} = \frac{1}{2}g\sin\alpha t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{4D}{g\sin 2\alpha}}$

برای کمینه شدن t باید $\sin^2\alpha = 1$ باشد؛ یعنی: $\alpha = 45°$.

IN THE NAME OF GOD

Ministry of Education
Organization of Research & Educational Planning
Teaching-Aids Publications Office

# Physics Education Journal

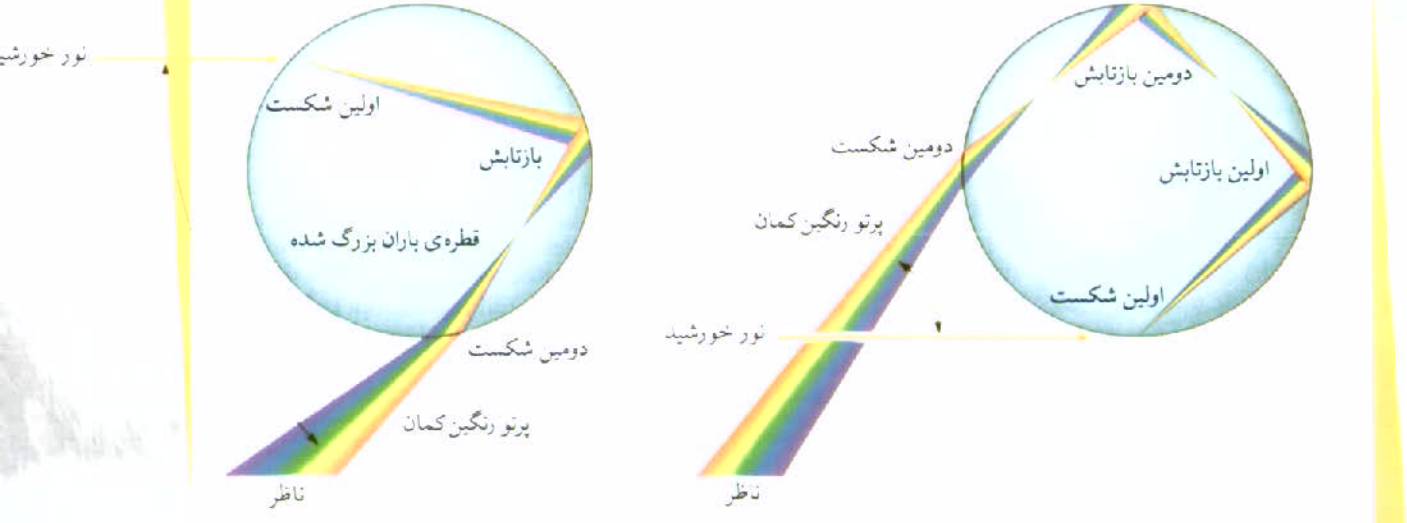
P.O. Box: 15875/6585
Department of Physics, Tehran-Iran

Vol.21 - No.75 - 2006
ISSN : 1606 - 917X

**Managing Editor :** Alireza Hajianzadeh
**Editor-in-Chief :** Manijeh Rahbar
**Executive Director :** Ahmad Ahmadi
**Graphic Designer :** Parvaneh Hadipour
**Editors :** Ahmad Ahmadi,
Jafar Mehrdad,Rouhollah Khalili,Manijeh Rahbar.

**The importance of inquisitivity** ◆ *by Editor* 2
**Quantum physics explains Newton's laws of motion** ◆ *by Jon ogborn, Edwin F Taylor* 3
**Magic with physics** ◆ *by V. Mayer, E. Mamaeva* 12
**Observational methods in ...** ◆ *by B. Khierandish, M. Ragabpoor Niknam and ...* 13
**Common errors in physics...** ◆ *by M. R. Khoshbin-e-Khoshnazar* 16
**Be careful with units** ◆ *by M. R. Khoshbin-e-Khoshnazar* 17
**Light trapping** ◆ *by L. Noorazar* 18
**Another approach to systematic equations** ◆ *by H. Alimohammadi* 21
**Finding the roots of physics terms** ◆ *by J. Mehrdad* 25
**Laser cooling and trapping of atoms** ◆ *by O. Sobhani* 27
**An experiment at home: Measuring the speed of sound** ◆ *by W. Pereira da etal* 32
**Quantum physics and planck constant** ◆ *by Z. Dodmani* 35
**The effect of inertia on tearing the string** ◆ *by S. Sarabi Dauesh* 39
**Teaching modern physics - misconceptions of the photon that can ...** ◆ *by D.G.C Jones* 41
**How can I make students interested in physics?** ◆ *by M. Jafari* 46
**Energy flow for a variable - gap capacitor** ◆ *by R. Natheniel Greene* 50
**Renewable energy of sea** ◆ *by E. Asgari* 53
**A new approach to evaluating students learning** ◆ *by T. Rastegar* 59
**Comparing the time of free fall with descending down a ...** ◆ *by N. Basiri* 62

الف ـ رنگین کمان دوتایی




ب ـ شکل‌های چپ و راست نشان می‌دهند که چگونه یک رنگین کمان دوتایی ایجاد می‌شود.

دوستت دارم ایران

## مجموعه
# کتاب‌های دوستت دارم ایران
### زیرنظرِ دفتر انتشارات کمک‌آموزشی
### (کتاب رشد)

**دوستت دارم، ایران!**
**ای سرزمین زیبایی‌ها و شگفتی‌ها!**
**تاریخ و تمدن کهن و فرهنگ غنی تو را و**
**مردمان کوشا و مهربانت را دوست دارم!**
**مجموعه «دوستت دارم ایران» کوششی است**
**برای نشان دادن جلوه‌های هر استان، تا**
**دانش آموزان شاد و امیدوار این سرزمین، با**
**میهن خود بیش‌تر آشنا شوند.**

- علاقه‌مندان می‌توانند این کتاب‌ها را از «واحد توزیع و بازرگانی دفتر انتشارات کمک‌آموزشی» و یا فروشگاه‌های انتشارات مدرسه تهیه نمایند.
- تلفن واحد توزیع و بازرگانی: ۷۷۳۳۶۶۵۶-۰۲۱ و ۷۷۳۳۵۱۱۰
- تلفن انتشارات مدرسه: ۹-۸۸۸۰۰۳۲۴-۰۲۱