

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 26

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۲۶

مترجم: معصومه عالی جوانانگروه

ویراستار و حروفچین: اسرا رضا فدایی، علی باقری کوچکسرائی

نسخه‌ی ۱۰ بهار ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

www.Zharfa90.ir

این صفحه مخصوصاً خالی گذاشته شده است.

فصل ۲۶

اپتیک: اصل کمترین زمان

۱۰۲۶ نور

این اولین قدم از فصل‌هایی با موضوع تابش الکترومغناطیسی است. نور مرئی فقط قسمت کوچکی از طیف گسترده‌ای از چیزهای مشابه است. قسمت‌های مختلف این طیف با مقادیر متفاوتی از متغیر خاصی به نام طول موج قابل تشخیص می‌شود. بنابراین در طیف مرئی با تغییر طول موج، رنگ نور به وضوح از آبی به قرمز تغییر می‌کند. اگر بخواهیم طیف را به ترتیب از طول موج بلندتر به کوتاه‌تر شرح دهیم، با امواج رادیویی شروع خواهیم شد. امواج رادیویی در محدوده‌ی وسیعی از طول موج‌ها، حتی بزرگ‌تر از طول موج استفاده شده در دستگاه‌های پخش یعنی حدود ۵۰۰ متر، قابل دسترس هستند؛ بنابراین با عنوان این امواج کوتاه، امواج رادار، امواج میلی‌متری و مشابه آن نامیده می‌شوند. با توجه به اینکه طبیعت با لبه‌ای تیز برای ما نمایش داده نشده است، مرز مشخصی میان یک محدوده از طول موج‌ها و همسایه دیگر آن وجود ندارد. اعداد نسبت داده شده به نام‌های مشخصی از امواج در محدوده‌های مختلف به صورت تقریبی است.

پس از یک راه طولانی از طریق امواج میلی‌متری به مادون قرمز و سپس به طیف مرئی می‌رسیم. با حرکت در جهت دیگر به محدوده ماورا بنفش و با قطع محدوده ماورا بنفش، محدوده اشعه‌ی ایکس شروع می‌شود، اما نقطه انفصال را نمی‌توان به طور دقیق تشخیص داد؛ که برابر با 10^{-8} متر یا 10^{-2} میکرومتر است. اشعه ایکس نرم سپس اشعه ایکس معمولی و سپس اشعه ایکس سخت و... به ترتیب برحسب مقادیر کوچک و کوچک‌تر از این ابعاد وجود دارد.

در میان طیف وسیعی از طول موج‌ها دو یا سه ناحیه تقریبی وجود دارد که به طور خاصی جالب هستند. در یکی از نواحی طول موج‌های موجود، در مقایسه با بعد ابزار و تجهیزات موجود جهت مطالعه آن‌ها و با توجه به نظریه کوانتومی، انرژی فوتون‌های آن‌ها در مقایسه با حساسیت انرژی ابزار کوچک‌اند. تحت چنین شرایطی با روش نورشناسی هندسی می‌توان تقریب اولیه‌ای ایجاد کرد. چنانکه طول موج‌ها قابل مقایسه با بعد ابزارها باشند، این کار برای نور مرئی مشکل و برای امواج رادیویی ساده‌تر است، همچنین اگر انرژی فوتون‌ها قابل چشم‌پوشی باشند، می‌توان با مطالعه رفتار امواج و حتی نادیده گرفتن مکانیک کوانتومی تقریب بسیار مفیدی را ارائه داد. این شیوه بر پایه نظریه کلاسیکی از تابش الکترومغناطیسی بنا نهاده شده است که در فصل بعدی بیشتر شرح داده خواهد شد. با رفتن به محدوده طول موج‌های کوتاه که مشخصه موجی قابل چشم‌پوشی باشد، اما فوتون‌ها انرژی بزرگی در مقایسه با حساسیت ابزار دارند، باز هم همه چیز ساده

می‌شود. این تصویر ساده‌ای از فوتون است که ما به صورت تقریبی بیان خواهیم کرد. تصویر کامل که همه چیز را در یک مدل قابل بیان می‌کند تا مدت زمان طولانی قابل دسترس نخواهد بود. در این فصل مشخصات طول موج و فوتون نور را فراموش کرده و محدود به نورشناسی هندسی می‌شویم و در زمان مناسب به شرح آن‌ها خواهیم پرداخت. حتی خود را برای تعریف نور به زحمت نمی‌اندازیم و فقط رفتار آن در مقیاس بزرگ در مقایسه با ابعاد مورد علاقه را بررسی می‌کنیم. تمامی این کارها برای تأکید بر بیان خیلی خام از نور است؛ با توجه به اینکه بایستی ادامه کار را با روشی دقیق انجام دهیم، این بخش یکی از بخش‌هایی است که بایستی آن را به فراموشی بسپاریم. هرچند نورشناسی هندسی فقط یک تقریب است اما به لحاظ فنی، بسیار مهم و به لحاظ تاریخی مورد علاقه بوده است. ما این موضوع را اندکی بیشتر از دیگران به لحاظ تاریخی بررسی خواهیم کرد تا دیدی از پیشرفت یک نظریه یا ایده فیزیکی دهیم.

از زمان‌های قدیم، نور برای هرکسی شناخته شده بود. اما مسئله در فرآیندی است که موجب دیده شدن نور می‌شود. نظریات زیادی بیان شده است اما فقط یکی از آن‌ها پذیرفته شد. بر اساس این نظریه چیزی وجود دارد که در چشم وارد می‌شود یعنی از طرف اجسام به چشم ساطع می‌شود. ما این ایده را آن قدر شنیده‌ایم که نهایتاً پذیرفته‌ایم و برایمان تقریباً غیرممکن است که فرد باهوش نظریه متضادی نظیر اینکه چیزی از چشم خارج می‌شود و جسم آن را حس می‌کند، را پیشنهاد کند. مشاهدات مهم دیگری نیز حرکت نور از یک نقطه به نقطه دیگر را بیان می‌کنند بطوریکه اگر چیزی بر سر راه آن قرار نگیرد بر روی خط مستقیم حرکت می‌کند و تداخل پرتوهای نور با یکدیگر به نظر نمی‌رسد. نور در تمام جهات اتاق در حال عبور است اما نور عبوری از خط دید ما هرگز تحت تأثیر نور خروجی از جسم قرار نمی‌گیرد. این بیان قدرتمندی در برابر نظریه ذره‌ای نور است که توسط هویگنس^۱ بیان شده است. اگر نور شبیه تیرهای تیراندازی افقی باشد، چگونه ممکن است که بردارها از میان یکدیگر عبور کنند؟ چنین بحث‌های فیلسوفانه‌ای چندان سنگین نیستند و همیشه می‌توان نور را حاصل از پرتوهایی دانست که می‌توانند از یکدیگر عبور کنند!

۲.۲۶ انعکاس و پخش

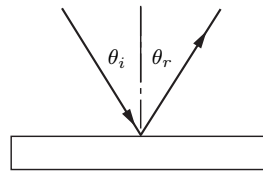
بحث‌های فوق فقط دیدی کلی از نورشناسی هندسی می‌دهد و اندکی بیشتر بایستی در مورد مشخصات کمی بحث کنیم. همان‌طور که گفتیم: نور در میان دو نقطه به خط مستقیم سیر می‌کند، در ادامه می‌خواهیم رفتار نور را در برخورد با موانع مختلف بررسی کنیم. ساده‌ترین مانع آینه با قانونی بدین ترتیب است که نور در صورت برخورد با آینه به خط مستقیم ادامه نخواهد داد و آینه آن را به خط مستقیم دیگری قابل تغییر با تغییر شیب آینه هدایت می‌کند. سؤال مطرح برای گذشتگان، رابطه میان دو زاویه‌ی درگیر در این برخورد بود؟ این رابطه سال‌های بسیار پیش کشف شده است. نور برخوردی به آینه در مسیری آن را ترک می‌کند که زوایای میان پرتوها و آینه باهم برابرند. به‌طور معمول زاویه از خط عمود بر سطح آینه سنجیده می‌شود و قانون انعکاس به صورت زیر است:

$$\theta_i = \theta_r. \quad (۱.۲۶)$$

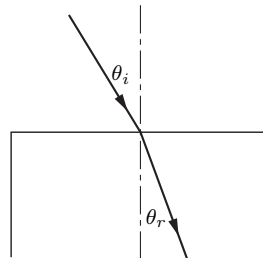
این قضیه ساده در انتقال نور از یک محیط به محیط دیگر، به عنوان مثال از هوا به آب، مشکلاتی دارد و در این صورت نور مستقیم حرکت نمی‌کند. پرتو داخل آب نسبت به مسیرش در هوا دارای انحرافی است؛ اگر زاویه θ_i را در حد خیلی نزدیک به خط عمودی تغییر دهیم زاویه شکست خیلی بزرگ نخواهد بود اما به

^۱Huygens

۲.۲۶. انعکاس و پخش



شکل ۱.۲۶: زاویه برخورد با زاویه انعکاس برابر است.



شکل ۲.۲۶: پرتو نور در برخورد به ماده واسط در مسیر پخش می‌شود.

جدول ۲.۲۶

زاویه در هوا	زاویه در آب
10°	$7^\circ - 1/2^\circ$
20°	15°
30°	22°
40°	29°
50°	35°
60°	$40^\circ - 1/2^\circ$
70°	45°
80°	48°

جدول ۱.۲۶

زاویه در آب	زاویه در هوا
8°	10°
$15^\circ - 1/2^\circ$	20°
$22^\circ - 1/2^\circ$	30°
29°	40°
35°	50°
$40^\circ - 1/2^\circ$	60°
$45^\circ - 1/2^\circ$	70°
50°	80°

فصل ۲۶. اپتیک: اصل کمترین زمان

ازای زوایای بزرگتر زاویه انحراف بسیار بزرگ خواهد بود. سؤال رابطه میان این دو زاویه است. این سؤال برای پیشینیان مدت زمان طولانی به عنوان معما بود و با وجود فهرستی از نتایج تجربی توسط فیزیکدانان یونانی پاسخی برای آن نیافتند. کلاودیوس^۲ به ازای زوایای مختلف در هوا فهرستی را برای زاویه در آب ارائه کرد. جدول ۱.۲۶ زوایای موجود در هوا و متناظر با آن زاویه در آب را برحسب درجه بیان می کند (مشهور به این است که دانشمندان یونانی هیچ تجربه ای را انجام نداده اند اما ارائه چنین جدولی بدون آگاهی از قوانین نور به جز باتجربه امکان پذیر نیست. توجه داریم که معمولاً به ازای هر زاویه اندازه دقیق مستقلی بیان نمی شود و برخی اعداد نتیجه جایگذاری در میان دیگر عبارات از تعداد کمی از اندازه گیری ها هستند به گونه ای که تمام آن ها بر روی قطاع مخروطی قرار گیرند).

مشاهده و سپس اندازه گیری کمیت و تنظیم جدول نتایج و در نهایت سعی در ارائه قانونی میان نتایج جدول یکی از قدم های مهم در توسعه قوانین فیزیک است. اعداد موجود در جدول در ۱۴۰ سال بعد از میلاد مسیح بیان شد اما کاربردی نداشت تا اینکه در سال ۱۶۲۱ فردی رابطه میان دو زاویه را یافت. قانون توسط ویلبرورد اسنل^۳، ریاضیدان هلندی، یافته شد و می توان آن را چنین بیان کرد: اگر θ_i زاویه در هوا و θ_r زاویه در آب باشد سینوس زاویه θ_i برابر است با حاصل ضرب ضریب ثابتی در سینوس زاویه θ_r :

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r. \quad (۲.۲۶)$$

مقدار n برای آب تقریباً ۱/۳۳ است. معادله (۲.۲۶) قانون اسنل نامیده می شود و امکان پیشگویی میزان انحراف نور در عبور از هوا به آب را می دهد. جدول ۲.۲۶ زاویه در آب و هوا را مطابق قانون اسنل نشان می دهد. به تطابق قابل توجه این جدول با لیست پتولمی توجه کنید.

۳.۲۶ اصل کمترین زمان فرمت^۴

در پیشرفت های بعدی علم به چیزی بیشتر از فرمول نیاز داریم. ابتدا مشاهده سپس اعدادی از این اندازه گیری و آنگاه قانونی که این اعداد را خلاصه نویسی کند، اما ارزش واقعی دانشمند در این است که بتواند روشی برای فکر کردن بیابد به گونه ای که قانون در آن آشکار باشد.

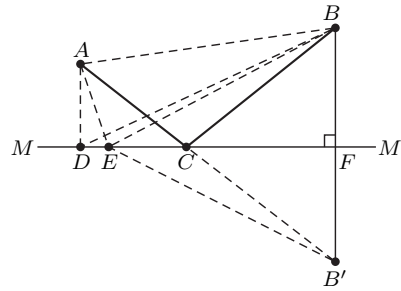
اولین قدم برای تفکر که قانونی برای رفتار آشکار نور ایجاد کرد توسط فرمت در حدود سال ۱۶۵۰ برداشته شد و اصل کمترین زمان فرمت نام گرفت، بدین ترتیب بود که در میان تمام مسیرهای ممکن که نور می تواند در رسیدن از نقطه ای به نقطه دیگر اختیار کند، مسیری را انتخاب می کند که به کمترین زمان نیاز داشته باشد.

ابتدا درستی این قانون را برای آینه بررسی می کنیم. این اصل ساده هر دو قانون مسیر مستقیم و قانون مربوط به آینه را دربر می گیرد. بنابراین ما در حال افزایش فهم مان هستیم! ابتدا جوابی برای مسئله ی زیر پیدا می کنیم. در شکل ۳.۲۶ دو نقطه A و B و طرحی از آینه MM' نشان داده شده است. در کدام مسیر رسیدن از A به B با کمترین زمان ممکن است؟ جواب مسیر مستقیم از A به B است! اما باوجود قانون اضافی برخورد نور به آینه و برگشت آن در کمترین زمان، جواب خیلی ساده نیست. یک جواب حرکت سریع به سمت آینه و سپس به نقطه B در مسیر ADB است که در این صورت مسیر طولانی DB را داریم. اگر اندکی به سمت راست، سمت E ، حرکت کنیم، فاصله اول به آرامی افزایش می یابد اما دومی به سرعت

²Claudius Ptolemy

⁴Fermat

³Willebrord Snell



شکل ۳.۲۶: نمایش اصل کمترین زمان

کاهش می‌یابد و از این رو کل مسیر و کل زمان حرکت کمتر خواهد بود. چگونه می‌توانیم نقطه C دارای کمترین زمان را بیابیم؟ این کار به سادگی با یک حقه‌ی هندسی امکان‌پذیر است.

با فرض وجود نقطه‌ی مجازی B' در سمت دیگر MM' با همان فاصله نقطه B از MM' خط EB' را رسم می‌کنیم. با توجه به زاویه BFM و $B'FM$ برابر با EB ، برابر با EB' است و بنابراین مجموع دو فاصله $AE + EB$ متناسب با زمان حاصل در حرکت با سرعت ثابت نور برابر با مجموع $AE + EB'$ خواهد بود و سؤال مطرح شده نیز بدین صورت خواهد بود که در چه صورتی این دو فاصله کمترین می‌شود؟ جواب ساده است: در صورتی که حرکت نور مستقیم و از طریق نقطه C از نقطه A به B' باشد! به عبارت دیگر بایستی نقطه‌ای را یافت که به سمت نقطه‌ی مجازی حرکت کنیم. اگر ACB' خط مستقیم باشد زاویه BCF مساوی زاویه $B'CF$ و بنابراین مساوی زاویه‌ی ACM است. بدین ترتیب برابری زاویه برخورد و انعکاس هم‌ارز با این بیان است که نور به آینه در چنان مسیری می‌رسد که در کمترین زمان به نقطه B' برگردد. این نکته که نور در مسیری حرکت می‌کند که به آینه و به نقطه دیگر در کمترین فاصله ممکن برسد، توسط هیرو^۵ از الکساندریا^۶ بیان شد، بنابراین یک نظریه مدرن نیست. به الهام از اصل فرمت او با خود فکر کرد که شاید پخش نیز به روش مشابه عمل کند. اما پخش نور از اصل کمترین فاصله تبعیت نمی‌کرد از این رو فرمت تلاش به دادن ایده‌ای کرد که کمترین زمان را در برگیرد.

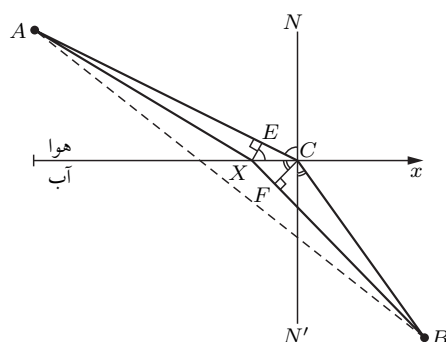
قبل از اینکه به آنالیز پخش بپردازیم بایستی نظریه دیگری در مورد آینه بسازیم. اگر منبع نوری را در نقطه B که نوری را به سمت آینه ساطع کند، قرار دهیم، نوری که از نقطه B به A می‌رود با رفتار کاملاً مشابه به نقطه A می‌رسد اگر جسمی در نقطه B' به جای آینه بود. چشم فقط نوری را آشکارسازی می‌کند که به طور فیزیکی به آن برسد، بنابراین وجود جسم در نقطه B و آینه‌ای که نور رسیده به چشم از آن است کاملاً مشابه با نور رسیده از جسم در نقطه B' عمل خواهد کرد و سیستم چشم-مغز وجود جسمی در نقطه B' را برای خود تفسیر می‌کند. تصور وجود جسمی پشت آینه صرفاً با توجه به این حقیقت است که نور ورودی در چشم دارای رفتاری مشابه با نور ورودی از جسم موجود در پشت آینه است (برای موارد غبار بر روی آینه و آگاهی مان از وجود آینه تصحیحاتی در مغز رخ می‌دهد).

در ادامه نشان خواهیم داد که اصل کمترین زمان، قانون اسنل مربوط به پخش را می‌دهد. با وجود اینکه می‌بایستی فرضی برای سرعت نور در آب داشته باشیم، سرعت نور در آب را با ضریب ثابت n نسبت به سرعت نور در هوا کمتر فرض خواهیم کرد.

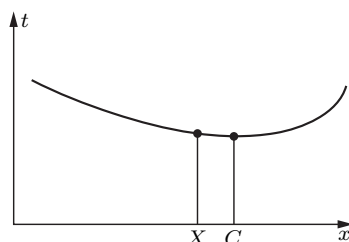
دوباره با توجه به شکل ۴.۲۶ به مسئله کمترین زمان حرکت از A به B می‌پردازیم. بهترین شیوه برای این کار حرکت در مسیر مستقیم است. دختر زیارویی را تصور کنید که از قایقی افتاده است و برای کمک گرفتن در آب از نقطه B فریاد می‌کشد. خط مشخص شده با X را خط ساحلی فرض کنید، ما در نقطه

^۵Hero^۶Alexandria

فصل ۲۶. اپتیک: اصل کمترین زمان



شکل ۴.۲۶: نمایش اصل فرمت برای پخش



شکل ۵.۲۶: زمان کمینه برای نقطه C و نقاطی با زمان نزدیک به آن

A از ساحل در حال تماشای رخداد می‌توانیم دویده و شنا کنیم، چه‌کاری برای سریع‌تر رسیدن با توجه به توانایی‌هایمان انجام دهیم؟ آیا در مسیر مستقیم برویم؟ بدون شک بله! هرچند با اندک هوشیاری بیشتر متوجه می‌شویم که به علت کند بودن سرعت در آب، طی مسافت بیشتر در ساحل به‌منظور کاهش مسافت در آب مفید خواهد بود (پیرو این خط فکری بهترین کار این است که به‌دقت آنچه را که باید انجام دهیم، محاسبه کنیم!). اجازه دهید نشان دهیم که جواب نهایی مسئله، مسیر ACB است که کمترین زمان نیز در آن رخ می‌دهد. کوتاه‌ترین زمان در این مسیر به معنی طولانی بودن سایر مسیرها در صورت انتخاب آن‌ها است. اگر در نموداری زمان را برابر موقعیت X رسم کنیم به منحنی‌ای مشابه با شکل ۵.۲۶ دست می‌یابیم که نقطه C با متناظر با کوتاه‌ترین زمان ممکن است. بدین ترتیب اگر از نقطه X به نزدیکی C حرکت کنیم، در تقریب نخست با توجه به صفر بودن شیب در ته منحنی هیچ تغییری در زمان وجود نخواهد داشت. بنابراین برای یافتن قانون در طی مسیر با حرکت‌های بسیار کوچک موقعیت را بدون تغییرات زمانی تغییر می‌دهیم. البته تغییرات بسیار کوچکی در مرتبه دوم وجود دارد؛ ما بایستی تغییرات افزایشی مثبت را در موقعیت در هر سویی از نقطه C داشته باشیم. به نقطه‌ای نزدیک X در نظر می‌گیریم مدت‌زمان لازم برای رسیدن از نقطه A به B را با دو مسیر متفاوت محاسبه و دو مسیر را باهم مقایسه کنیم. این کار خیلی ساده است، با توجه به کوتاه بودن فاصله XC ، اختلاف آن‌ها نزدیک به صفر است. ابتدا مسیر ساحلی را بررسی می‌کنیم. با رسم عمودی بر XE کوتاه شدن این مسیر را با توجه به مقدار EC می‌بینیم و بدون طی هیچ فاصله‌ی اضافی به هدف‌مان می‌رسیم. به عبارت دیگر، با کشیدن عمودی متناظر با CF در آب متوجه حرکتی اضافی به‌اندازه فاصله XF می‌شویم و این همان فاصله مفقودی است. به لحاظ زمانی، زمان لازم برای طی فاصله EC را به دست می‌آوریم اما مدت زمان لازم برای رفتن به XF مفقود می‌شود. از آنجایی که در تقریب اول هیچ تغییری در زمان‌ها وجود ندارد بایستی برابر باشند. با فرض $1/n$ برابر بودن سرعت

۴.۲۶. کاربرد اصل فرمت

نور در آب نسبت به هوا بایستی داشته باشیم:

$$EC = n \cdot XF. \quad (۳.۲۶)$$

بدین ترتیب در صورت داشتن نقاط واقعی رابطه $XC \sin EXC = n \cdot XC \sin XCF$ و با حذف طول XC توجه داریم که

$$EXC = ECN = \theta_i \quad \text{و} \quad XCF \approx BCN' = \theta_r \quad (\text{وقتی } X \text{ نزدیک } C \text{ است}),$$

داریم

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_r. \quad (۴.۲۶)$$

بدین ترتیب رسیدن از یک نقطه به نقطه دیگر در کمترین زمان با نسبت سرعت‌ها یعنی n صورت می‌گیرد و نور بایستی در زاویه‌ای وارد محیط دوم شود که نسبت سینوس‌های زوایای θ_i و θ_r برابر نسبت سرعت در دو محیط است.

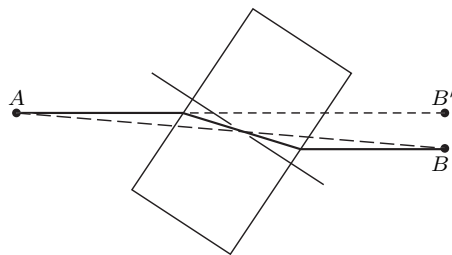
۴.۲۶ کاربرد اصل فرمت

اجازه دهید برخی نتایج جالب اصل کمترین زمان را بیان کنیم. اولین مورد اصل رفت و برگشتی است. اگر در رفتن از نقطه A به B مسیر مربوط به کمترین زمان را یافتیم و سپس به جهت مخالف آن برویم (فرض بر این است که سرعت نور در تمام جهات یکسان است) کمترین زمان در آن مسیر نیز خواهد بود و با ارسال نور در یک مسیر در دیگری نیز می‌تواند ارسال شود.

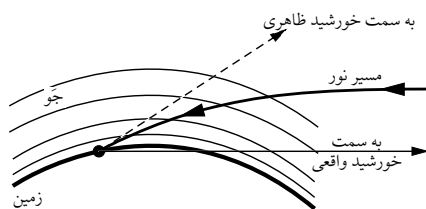
مورد دیگر جالب بلوک شیشه‌ای با سطوح موازی است که زاویه‌ای نیز با پرتو نور دارد. نور در حین عبور از داخل بلوک در رفتن از نقطه A به نقطه B (شکل ۴.۲۶) در مسیر مستقیم حرکت نمی‌کند اما در عوض با ایجاد زاویه‌ای در بلوک شیب‌دار، زمان کاهش می‌یابد و مقدار خیلی کمی در هوا مفقود می‌شود. با توجه به برابری زاویه ورودی و خروجی، پرتو به موازات خودش تغییر مکان می‌دهد.

پدیده جالب سوم زمان طلوع خورشید و تقریباً زیر افق است! مطابق شکل ۷.۲۶ زیر افق بودن آن‌گونه هم که فکر می‌کنیم، به نظر نمی‌رسد. اتمسفر زمین در بالا رقیق و در پایین غلیظ است. نور خیلی آرام در هوا و سپس در خلأ حرکت می‌کند، بنابراین در عوض حرکت مستقیم می‌تواند به آرامی و دورتر از افق به نقطه S برسد و از نواحی غلیظ‌تر، نواحی که با رسیدن به آن‌ها در شیب تندتری می‌گذرد، دوری می‌کند و زمانی که پایین افق به نظر می‌رسد در واقع خیلی پایین‌تر از افق قرار دارد. مثال دیگر از این پدیده سراب است که اغلب در رانندگی در جاده‌ها می‌بینید. شخص آبی را در جاده می‌بیند و زمانی که به آن می‌رسد آن را خشک مثل بیابان می‌بیند! این پدیده به صورت زیر است. در حقیقت آنچه ما می‌بینیم نور انعکاس یافته‌ی آسمان بر روی جاده است: نور رسیده از آسمان به جاده، مطابق شکل ۸.۲۶ می‌تواند به چشم ختم شود. چرا؟ هوا فقط روی جاده بسیار گرم است اما در نواحی بالاتر سردتر است. گرمای هوا گسترده‌تر و باریک‌تر از سرمای هواست و این امر سرعت نور را کاهش می‌دهد. بدین معنی که نور نسبت به نواحی سردتر در نواحی گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کند. بدین ترتیب، در عوض حرکت مستقیم بازهم مسیر با کمترین زمان را دارد از این‌رو در ناحیه‌ای وارد می‌شود که با حرکت سریع در بازه‌ای از زمان، مدت زمانی را ذخیره کند و بدین ترتیب در مسیر منحنی حرکت می‌کند.

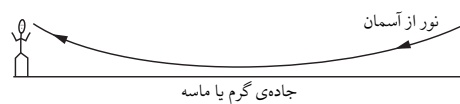
فصل ۲۶. اپتیک: اصل کمترین زمان



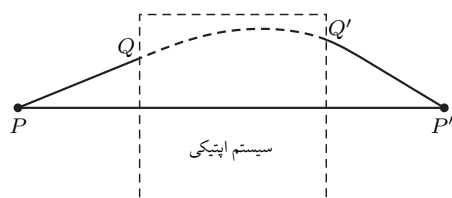
شکل ۶.۲۶: پرتویی از نور در عبور از بلوک عرضی



شکل ۷.۲۶: نزدیک افق خورشید ظاهری بالاتر از خورشید واقعی قرار دارد.

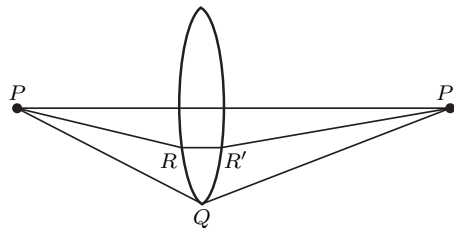


شکل ۸.۲۶: سراب



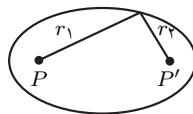
شکل ۹.۲۶: جعبه سیاه نوری

به عنوان مثال دیگر از اصل کمترین زمان، موقعیتی را فرض کنید که تمام نورهای خروجی از نقطه P در نقطه دیگر P' متمرکز شوند (شکل ۹.۲۶). هرچند نور می تواند در مسیر مستقیم از P به P' برود اما چطور می توان موقعیت را ترتیب داد که فقط به خط مستقیم حرکت نکند بلکه با شروع از نقطه P به نقطه Q رفته و همچنین به P' ختم شود؟ قصد داریم تمام نور را به آنچه فوکوس نامیده می شود، بازگردانیم. چطور؟ اگر نور همیشه مسیر با کمترین زمان را اختیار کند، قطعاً نباید از آن بخواهیم که در مسیر دیگری برود. تنها روش برای راضی ساختن نور، جهت انتخاب چندین مسیر نزدیک به هم این است که زمان طی مسیرها را کاملاً برابر بسازیم، در غیر این صورت یکی از آن ها با کمترین زمان را اختیار خواهد کرد. بدین ترتیب مسئله فوکوس سیستم صرفاً برای تهیه ابزاری است که زمان یکسان برای طی مسیرهای مختلف را برای نور فراهم می سازد!



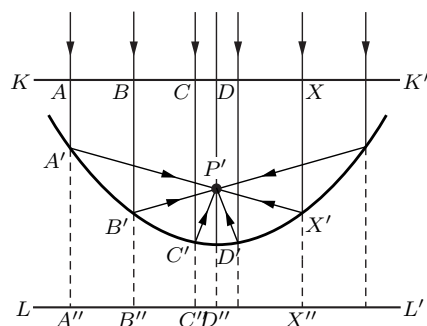
شکل ۱۰.۲۶: سیستم فوکوس نوری

این کار ساده است. تکه ای شیشه ای که نور در آن آرام تر از هوا حرکت می کند و پرتویی که در مسیر PQP' از هوا عبور می کند (شکل ۱۰.۲۶) را در نظر بگیرید. این مسیر طولانی تر از مسیر مستقیم P تا P' است و شکی در زمان طولانی تر برای طی آن نیست. اما اگر تکه ای شیشه با ضخامتی معقول (بعدها در مورد میزان ضخامت بحث خواهیم کرد) در مسیر وارد کنیم، با تحمیل حرکت منحنی وار برای نور، شاید بتوانیم زمان اضافی را جبران کنیم! در چنین شرایطی می توان مدت زمان حرکت مستقیم الخط نور را برابر با مدت زمان حرکت در مسیر PQP' ترتیب داد. پرتو $PRR'P'$ با اندک شیب که دارد به اندازه مسیر PQP' طولانی نیست و مجبور به جبران اختلاف خیلی زیاد آن با مسیر مستقیم نیستیم. این کار را با تکه ای شیشه مطابق شکل ۱۰.۲۶ انجام می دهیم. با این طرح از شیشه، تمام نوری که از نقطه P می آیند به نقطه P' خواهند رفت. این کار شناخته شده را عدسی می نامیم. در بخش بعدی برای شکلی از عدسی و داشتن فوکوس بهتر آن، محاسبات دقیقی را خواهیم داشت.



شکل ۱۱.۲۶: آینه بیضوی

به عنوان مثال دیگر فرض کنید می خواهیم تعدادی از آینه ها را چنان تنظیم کنیم که نور همواره از نقطه P به نقطه P' برود (شکل ۱۱.۲۶). در هر مسیری نور ابتدا به آینه ها رفته و سپس برمی گردد و تمام این زمان ها برابر خواهند بود. در این مورد، نور همواره در هوا سیر می کند و زمان و مسافت ها نسبی هستند. بدین ترتیب، این جمله که تمام زمان ها برابرند با این جمله که تمام مسافت ها برابرند یکی می شوند و خورشید



شکل ۱۲.۲۶: آینه شلجمی

برای دو موقعیت r_1 و r_2 یکی است. بیضی منحنی‌ای است که این خاصیت را دارد و خورشید از فاصله دو نقطه، برای هر نقطه‌ای بر روی بیضی، ثابت است؛ بنابراین می‌توان اطمینان داشت که نور از یک کانون به دیگری خواهد آمد.

اصل مشابهی برای جمع کردن نور ستارگان وجود دارد. تلسکوپ پلومار^۷ ۲۰۰ اینچ بر اساس همین اصل ساخته می‌شود. ستاره‌ای را میلیون‌ها مایل دورتر تصور کنید؛ قصد داریم تمام نور را وادار به ورود به فوکوس و رسیدن به آن کنیم. نمی‌توان تمام مسیرهایی که پرتو تا ستاره می‌رود را کشید اما هنوز هم می‌خواهیم برابری زمان را برای آن‌ها بررسی کنیم. می‌دانیم زمانی که پرتوهای مختلف به محور KK' عمود بر پرتوها، رسیده‌اند تمام زمان‌ها بر روی این خط برابرند (شکل ۱۲.۲۶). پرتوها بایستی به سمت آینه پایین بیایند و در زمان‌های برابر به سوی P' ادامه یابند. بایستی منحنی‌ای که خورشید از فاصله $XX' + X'P'$ ثابت است را بیابیم، مشکلی در انتخاب مکان X وجود ندارد. یک روش ساده برای یافتن آن بسط طول خط XX' تا خط LL' است. با مرتب کردن منحنی برحسب $A'A'' = A'P'$ و $B'B'' = B'P'$ و $C'C'' = C'P'$ و تا آخر $AA' + A'P' = AA' + A'A''$ ثابت بوده و منحنی مقبول را خواهیم یافت. این منحنی مکان هندسی تمام نقاط هم‌سطح از یک خط و نقطه هستند، چنین منحنی‌ای شلجمی نامیده می‌شود؛ آینه‌های ساخته شده با این طرح نیز آینه شلجمی گفته می‌شود.

مثال‌های فوق اصلی را که ابزارهای نورشناسی بر اساس آن ساخته می‌شوند را نشان می‌دهد. منحنی‌های واقعی بر اساس وقوع فوکوس می‌توانند ساخته شوند و زمان‌های طی مسیر برای تمام پرتوهای نور برابر باشند و هر مسیری نسبت به همسایه نزدیک خود زمان کمتری را بطلبد.

این ابزارهای نورشناسی را در بخش بعدی بیشتر توضیح خواهیم داد. وقتی که یک اصل نظری جدیدی نظیر اصل کمترین زمان، توسعه می‌یابد در برخورد اول شاید بگوییم که چه نظریه زیبایی و یا اینکه خیلی گیرا است اما این سؤال در ادامه پیش می‌آید که آیا در فهم فیزیک کمکی خواهد کرد؟ شاید برخی افراد بگویند بله، ببینید چه چیزهایی را حالا می‌توانیم درک کنیم! و یا شخص دیگری بگوید: خیلی زیاد، من می‌توانم حتی آینه را نیز بفهمم. من نیازمند به منحنی‌ای که در آن هر صفحه مماسی زوایای مساوی با دو پرتو ایجاد کند، هستم. من می‌توانم عدسی را نیز درک کنم، زیرا هر پرتویی که در آن وارد می‌شود تحت زاویه‌ای متناظر با قانون اسنل، خم می‌شود. از قرار معلوم بیان کمترین زمان و برابری زوایا در انعکاس و تناسب سینوس زوایای پخش یکی است. بنابراین آیا سؤال فوق یک سؤال فیلسوفانه یا زیبا است؟ می‌تواند در هر دو زمینه مورد بحث قرار گیرد.

⁷Palomar

با این وجود اهمیت این اصل، قدرتمندی آن در پیشگویی چیزهای جدید است. چیزهای قابل پیشگویی زیادی با اصل فرمت وجود دارد که بیان آن ساده است. وجود سه پوشش شیشه، آب و هوا را در نظر بگیرید و آزمایش پخش را انجام دهید، اندیس n را برای یک واسط نسبت به دیگری اندازه‌گیری خواهیم کرد. فرض کنید اندیس n_{12} برای هوا (۱) در برابر (۲)؛ n_{13} اندیس هوا (۱) در برابر شیشه (۳) بنامیم. اگر هوا را در برابر شیشه اندازه‌گیری کنیم بایستی اندیس دیگری به نام n_{23} را نیز تعریف کنیم. هیچ دلیل قبلی در مورد علت رابطه میان n_{12} و n_{13} و n_{23} وجود ندارد اما متناظر با اصل کمترین زمان رابطه معینی وجود دارد. اندیس n_{12} نسبت سرعت نور در هوا به آب؛ n_{13} نسبت سرعت در هوا به شیشه؛ و n_{23} نسبت سرعت در آب به شیشه است. بنابراین می‌توان هوا را حذف کرده و به رابطه زیر رسید:

$$n_{23} = \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_1/v_3}{v_1/v_2} = \frac{n_{13}}{n_{12}}. \quad (۵.۲۶)$$

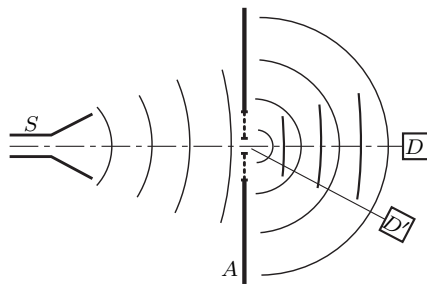
به عبارت دیگر، اندیس برای جفت جدیدی از مواد در برابر هوا و یا خلأ، از مواد منفرد به دست آید. بنابراین اگر سرعت نور در تمام مواد را اندازه‌گیری کنیم و عددی برای هر ماده گزارش کنیم و اندیس نسبی به خلأ را n_i بنامیم. (n_1 سرعت هوا نسبت به خلأ است...)، فرمول‌بندی ساده می‌شود. اگر اندیس‌ها برای هر دو ماده را با i و j نشان دهیم خواهیم داشت:

$$n_{ij} = \frac{v_i}{v_j} = \frac{n_j}{n_i}. \quad (۶.۲۶)$$

با توجه به قانون اسنل پایه و اساسی برای پیشگویی این مورد وجود ندارد. رابطه (۶.۲۶) به سادگی به دست آمد و بیان قوی برای اصل کمترین زمان بود. بیان دیگر برای اصل کمترین زمان چنین است که اگر سرعت نور در آب را اندازه‌گیری کنیم کمتر از هوا خواهد بود. این پیشگویی درخشانی است زیرا تمام زوایا را اندازه‌گیری کرده‌ایم؛ در این قسمت پیشگویی نظری کاملاً متفاوت از مشاهداتی داریم که فرمت از ایده کمترین زمان نتیجه‌گیری کرد. بدین ترتیب کمتر بودن سرعت نور در آب نسبت به هوا روشن می‌شود که تنها نسبت موردنیاز برای رسیدن به اندیس مناسب است!

۵.۲۶ بیانی دقیق از اصل فرمت

بایستی برای اصل کمترین زمان بیانی با شبهاتی کمتر بسازیم. در بالا این امر به خوبی ذکر نشد. این امر به اشتباه اصل کمترین زمان نامیده می‌شود و ما برای قانع کردن مسیر نادرستی را رفته‌ایم اما بایستی بیان درست را بیابیم. مطابق شکل ۳.۲۶ آینه‌ای را در نظر بگیرید. چه چیزی باعث می‌شود که نور فکر کند که بایستی به سوی آینه برود؟ به وضوح مسیر کمترین زمان، مسیر AB است. برخی مردم ممکن است بگویند که آن مسیر گاهی اوقات بیشینه زمان است. با توجه به اینکه مسیر منحنی شکل بیشترین زمان را خواهد داشت قطعاً بیشینه زمان نیست. بیان صحیح به صورت زیر است: پرتو در حال حرکت در مسیر خاص با تغییر کوچکی در پرتو رسیده به آینه، اعم از هر رفتاری یا موقعیتی یا شیب منحنی یا هر چیز دیگری تغییرات مرتبه اولی در زمان وجود نخواهد داشت و تغییرات زمانی را فقط در مرتبه دوم خواهیم داشت. به عبارت دیگر،



شکل ۱۳.۲۶: پیغام امواج رادیویی در عبور از تیغه

این اصل بدین ترتیب است که نور مسیری را با تعداد زیادی مسیر در همسایگی آن تقریباً با زمان یکسان انتخاب خواهد کرد.

در ادامه مشکل دیگر در مورد اصل کمترین زمان و مقبول نبودن نوع نظریات از طرف مردم و عدم تحمل آن‌ها را می‌آوریم. با توجه به قانون اسنل می‌توان نور را درک کرد. نور حرکت می‌کند، سطحی را می‌بیند، به علت کاری که در سطح انجام می‌دهد، خم می‌شود. درک ایده علی در مورد حرکت نور از یک نقطه به نقطه دیگر و دیگر و دیگر ساده است. اما اصل کمترین یک اصل فیلسوفانه و کاملاً متفاوت از روش کار آن در طبیعت است. به جای بیان آن به عنوان دلیل برای رخ دادن اتفاقات در نتیجه انجام یک سری کارها، بدین ترتیب بیان می‌کنیم: با تنظیم موقعیت، نور به تصمیم‌گیری در مورد کمترین زمان یا بهینه‌ترین آن و انتخاب مسیر می‌پردازد. اما چه کاری انجام می‌دهد و چطور آن را پیدا می‌کند؟ آیا نزدیک‌ترین مسیر را بو می‌کند و آن را نسبت به دیگر مسیرها بررسی می‌کند؟ جواب بله است، بدین ترتیب عمل می‌کند. این مشخصه‌ای است که در نورشناسی هندسی شناخته نمی‌شود و ایده طول‌موج در آن وارد می‌شود؛ طول‌موج به ما می‌گوید که تا چه حد نور باید مسیر را بو کند تا آن را بررسی کند. با توجه به اینکه طول‌موج‌ها بسیار کوچک‌اند، نشان دادن واقعیت در مقیاس نور سخت است، اما با امواج رادیویی، موج‌های ۳ سانتی‌متری یعنی فواصلی که امواج رادیویی در آن در حال بررسی هستند و بزرگ‌ترند، امکان‌پذیر است. اگر منبعی از موج‌های رادیویی، آشکارساز، و تیغه مطابق شکل ۱۳.۲۶ داشته باشیم، پرتوها از S به D می‌روند و از آنجایی که این خط مستقیم است، در صورت بسته نبودن شکاف‌ها، همه چیز روبه‌راه است و به حرکت راست خود ادامه می‌دهد. اگر آشکارساز را به طرف D' حرکت دهیم، امواج از طریق شکاف عریض از S به D' نخواهد رفت، زیرا چندین مسیر همسایه را بررسی می‌کند و می‌گوید که "نه دوست من، تمام آن‌ها متناظر با زمان مای متفاوت است". به عبارت دیگر، اگر با بستن مسیرها به شکاف بسیار باریک، مانع عبور تابش از مسیرهای بررسی شده شویم، فقط یک مسیر قابل دسترس وجود خواهد داشت و تابش آن را اختیار می‌کند! با یک شکاف باریک بیشتر تابش به D' و سپس به تیغه عریض می‌رسد!

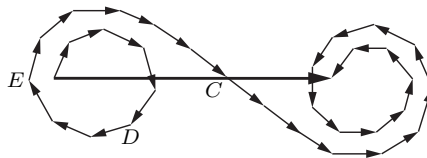
همین کارها را می‌توان با نور انجام داد اما تشخیص آن در مقیاس بزرگ سخت است. تحت چنین شرایطی واقعیت‌ها نیز مطابق زیر دیده می‌شود. نور کوچک و روشنی، نظیر یک لامپ نشی در فضای خیابانی دور و یا انعکاسی از نور خورشید در سپر اتومبیل، را ببینید. سپس دو انگشت خود را مقابل یک چشمتان قرار دهید، بطوریکه نور را از شکاف ببینید، تا رسیدن نور به صفر فشار دهید. شما تصویری از نور را خواهید دید که قبلاً نقطه کوچکی بود، کاملاً کشیده می‌شود و حتی در خط ممتدی گسترش می‌یابد. دلیل این امر این است که انگشتان بسیار نزدیک به هم هستند و نوری که فرض برآمدن آن در خط مستقیم است در یک زاویه گسترش می‌یابد بطوریکه هنگام ورود به چشم از چندین جهت متفاوت وارد می‌شود. اگر

۶.۲۶. این کار چگونه انجام می‌گیرد؟

بسیار مراقب باشید، حداکثر جهت‌گیری، چین‌های زیادی در لبه‌ها را متوجه خواهید شد، همچنین همه چیز رنگی می‌شود. همه این موارد در موعد مناسب شرح داده خواهد شد اما برای زمان حاضر، این توضیحات برای این است که نور همیشه به خط مستقیم حرکت نمی‌کند و این یکی از مواردی است که آن را به سادگی نشان می‌دهد.

۶.۲۶ این کار چگونه انجام می‌گیرد؟

در مرحله آخر، یک دیدگاه بسیار خام از آنچه در واقع رخ می‌دهد را می‌دهیم، همه چیز واقعاً چطور کار می‌کند، از میان آنچه ما اکنون به درست بودن آن معتقدیم، دیدگاه دقیق کوانتوم-دینامیکی است، که آن هم فقط به صورت کیفی توصیف می‌شود. با بررسی نور موجود از A به B در شکل ۳.۲۶، به نظر نمی‌رسد که نور اصلاً به شکل موج نیست و پرتوها از فوتون ساخته شده‌اند و تیک‌هایی در شمارنده فوتون ایجاد می‌کنند. درخشش نور متناسب با متوسط تعداد فوتون‌های رسیده در هر ثانیه است و آنچه ما باید محاسبه کنیم میزان احتمال رسیدن فوتون از نقطه A به B است که با ضربه به آینه آن را اعلام می‌کند. قانون برای این احتمال بسیار عجیب و غریب است. مسیری را اختیار کنید و زمان آن مسیر را بیابید؛ سپس عددی مختلط بسازید و یا اینکه بردار مختلط کوچکی، $pe^{i\theta}$ ، را طراحی کنید که زاویه θ متناظر با زمان است. تعداد دفعات چرخش در هر ثانیه فرکانس نور است. مسیر دیگری را در نظر بگیرید؛ زمان متفاوتی دارد، بنابراین بردار برای آن با زاویه متفاوتی تغییر می‌کند و همیشه متناسب با زمان خواهد بود. تمام مسیرهای ممکن را در نظر بگیرید و بردار کوچکی برای هر کدام اضافه کنید؛ احتمال رسیدن فوتون متناسب با مربع طول بردار نهایی از شروع تا انتها است.



شکل ۱۴.۲۶: مجموع احتمالات برای دامنه‌های مربوط به همسایگی‌های نزدیک به یکدیگر

حال اجازه دهید تا نشان دهیم چطور این امر دلالت به اصل کمترین زمان آینه دارد. تمام پرتوها، تمام مسیرها ممکن ADB ، AEB ، ACB و... در شکل ۳.۲۶ را در نظر می‌گیریم. مسیر ADB تصحیحات کوچک مشخصی را می‌خواهد اما مسیر بعدی AEB زمان کاملاً متفاوتی را دارد، بنابراین زاویه‌اش کاملاً متفاوت است. نقطه C را متناظر با کمترین زمان فرض می‌کنیم بطوریکه با تغییر مسیرها، زمان‌ها تغییر نمی‌کند؛ بنابراین برای مدتی زمان تغییر می‌کند و سپس تغییرات شروع به کاهش می‌کند تا اینکه به نقاط نزدیک C می‌رسیم (شکل ۱۴.۲۶). بردارهایی که بایستی اضافه کنیم در همان زاویه نزدیک C می‌آیند و زمان دوباره شروع به افزایش می‌کند و فازها حول مسیر دیگری می‌گردند. به وضوح گرهی محکم را داریم. برای احتمال کل فاصله میان یکی از دیگری مجذور می‌شود. تقریباً تمام تراکم احتمال در منطقه‌ای رخ می‌دهد که فلش‌ها در یک جهت قرار گیرند (و یا اینکه در یک فاز باشند). تمام تصحیحات مربوط به مسیرهای با زمان‌های مختلفی که با تغییر مسیر تغییر می‌کنند، با اشاره به جهت‌های مختلف، خودشان را حذف می‌کنند. این کار بدان علت است که اگر مسیر بهینه آینه را مخفی کنیم، تقریباً همان انعکاس را بازهم

فصل ۲۶. اپتیک: اصل کمترین زمان

خواهیم داشت؛ زیرا همه کاری که ما انجام دادیم این بود که تکه‌ای از نمودار را داخل انتهای مارپیچ بگیریم که این کار باعث تغییرات بسیار کمی در نور شد. بدین ترتیب رابطه بین تصویر نهایی فوتون‌ها با احتمال ورود به بسته با انبوهی از فلش‌ها و اصل کمترین زمان را بیان کردیم.