طراحی ابزارهای کاربردی و سادهٔ اپتیکی

حسن اتحادمهرآباد، محمد سبزی، مرضیه روان‌بخش

چکیده

یکی از شاخه‌های اساسی و مهم فیزیک در تمام سطوح تحصیلی، اپتیک است. ابزارهای ساده و جدیدی را طراحی کردیم و به‌کار بردیم. در این نوشتار اندک، سعی خواهیم کرد با استفاده از قوانین ساده اپتیک هندسی ابزارهایی به شرح زیر را طراحی و توضیح دهیم.

الف. فاصله‌سنجی با بهره‌گیری از اپتیک هندسی (متر لیزری ساده)

ب. عدسی استوانه‌ای یک قطعه اپتیکیِ شکل‌دهنده باریکه و مولد خط نور

ج. طراحی شاقول لیزری ساده

کلیدواژه‌ها: اپتیک هندسی، ابزارهای ساده، فاصله‌سنجی، شاقول سادهٔ لیزری.

مقدمه

تا وقتی که طول موج نور تابشی خیلی کوچک‌تر از ابعاد شکاف‌ها یا سوراخ‌های محدودکننده مسیر نور باشد، اصل انتشار مستقیم‌الخط نور معتبر است و پدیده پراش اتفاق نمی‌افتد.

بنابراین می‌توان بر مبنای پیروی از مسیرهای مستقیم‌الخط پرتوهای نور، انتشار نور در دستگاه‌های اپتیکی را ردیابی کرد. اپتیک هندسی چنین مباحثی را بررسی و توضیح می‌دهد.

معمولاً در اپتیک هندسی با قانون‌های بازتاب و شکست نور تحت عنوان قوانین اسنل دکارت سروکار داریم که در توضیح قانون‌های بازتاب به‌طور خلاصه می‌توان نوشت:

اگر خط قائمی در نقطهٔ تابش نور به یک سطح، رسم کنیم:

- **اولاً:** زاویه تابش با زاویه بازتابش برابر خواهد بود. (i=r)
- **ثانیاً:** پرتو فرودی، پرتو بازتابیده و خط عمود بر سطح در نقطه تابش هر سه در یک صفحه قرار دارند.

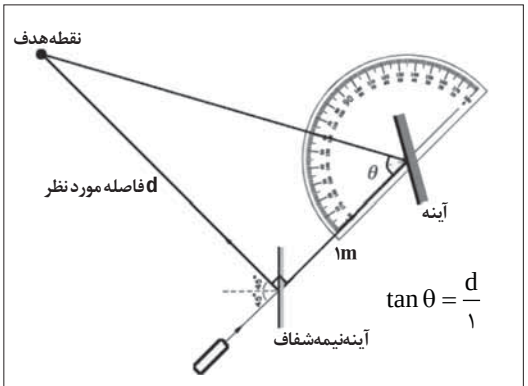
و در توضیح مختصر قانون‌های شکست نور می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد.

- پرتو فرودی، خط عمود بر سطح جداکننده دو محیط در نقشه تابش و پرتو شکسته شده، هر سه در یک صفحه قرار دارند.
- برای پرتوهایی که از یک محیط شفاف وارد محیط شفاف دیگری می‌شوند، نسبت سینوس زاویه تابش به سینوس زاویه شکست مقداری ثابت است. [۱] و [۲]

فاصله‌سنجی با بهره‌گیری از اپتیک هندسی (طراحی متر لیزری ساده)

با توجه به اینکه لیزر واگرایی ناچیزی دارد می‌توان با استفاده از لیزر و با یک روش هندسی ساده و سرعت بالا فاصله‌های طولانی را اندازه گرفت. با توسعه به‌کارگیری لیزر در صنعت، فاصله‌سنج‌های لیزری جایگزین ابزارهای متداول فاصله‌سنجی می‌گردند. فاصله‌سنج‌های لیزری بیشتر در اندازه‌گیری مسافت‌های طولانی کاربرد دارند. روش زمانی، روش تداخل‌سنجی و روش هندسی از عمده‌ترین روش‌های فاصله‌سنجی با لیزر است.

برای فاصله‌سنجی بین دو نقطه، به روش هندسی، چشمه نور لیزر را مطابق شکل (۱) در مقابل یکی از این نقاط قرار می‌دهیم و باریکه‌ای از لیزر را از دو محل متفاوت به نقطه دیگر که همان نقطه هدف است، تابش می‌دهیم. در این حالت یکی از پرتوها به‌طور مستقیم و دیگری از فاصله معین و به‌صورت مایل به هدف تابانده می‌شود. با تشکیل یک مثلث قائم‌الزاویه و اندازه‌گیری زاویه و طول قاعده مثلث قائم‌الزاویه، این فاصله‌سنجی صورت می‌گیرد. [۴]



شکل ۱. مسیر پرتوها و نحوه قرارگیری اجزا متر لیزری ساده

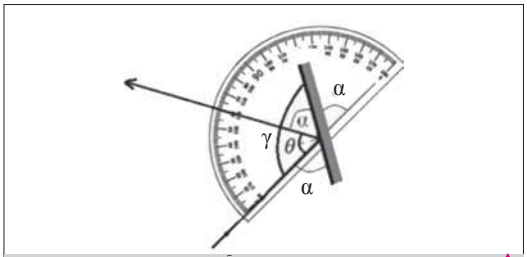
اگر مطابق (شکل ۱) باریکه لیزر را ابتدا تحت زاویه ۴۵ درجه به یک قطعه شیشه بازتابنده (که به‌عنوان آینه نیمه

شفاف عمل می‌کند) بتابانیم باریکه‌های بازتابیده و عبوری از آن با هم زاویه ۹۰ درجه می‌سازند.

اگر نور عبوری در فاصله یک متری به یک آینهٔ چرخان سوار بر یک نقاله برخورد کند، با تنظیم سطح آینه پرتو بازتابیده از آن به سمت نقطه هدف که در فاصله عمودی از چشمه لیزر قرار دارد نشانه‌گیری می‌شود و سرانجام با استفاده از زاویه‌ای که نقاله نشان می‌دهد فاصله عمودی هدف تا لیزر را می‌توان از رابطه $\tan\theta = \frac{d}{۱}$ تعیین کرد.

یک نکته

اگر مطابق (شکل ۲) θ یکی از زاویه‌های مثلث تشکیل شده باشد در این صورت زاویه α متمم زاویه تابش (و یا زاویه بازتاب) خواهد بود.



شکل ۲. زاویه‌های مختلف در بازتاب نور از آینه کامل سوار بر نقاله

فرض می‌کنیم γ زاویه بین سطح آینه با پرتو تابش و یا همان زاویه‌ای باشد که روی نقاله خوانده می‌شود. در این صورت:

$$\alpha = ۱۸۰ - \gamma$$
$$\theta = \gamma - \alpha$$
$$\theta = \gamma - (۱۸۰ - \gamma)$$
$$\theta = ۲\gamma - ۱۸۰$$

الف. وسایل لازم برای طراحی متر لیزری ساده

لیزر با پایه مناسب، یک آینه نیمه شفاف (شیشه بازتابنده)، یک آینه با پایه مناسب، نقاله چاپ شده روی کاغذ، خمیر بازی، چسب گرمایی.

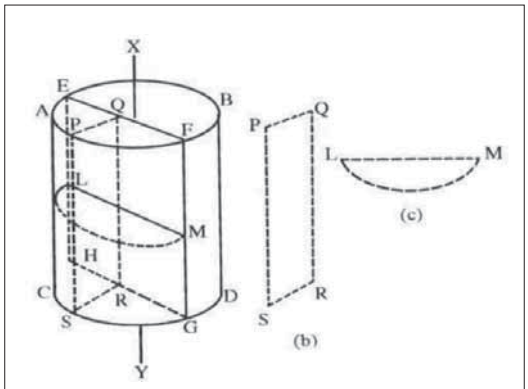
ب. روش کار

- تخته‌ای به ابعاد حداقل ۱۲۰ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر تهیه می‌کنیم و در دو طرف آن دو نقاله کوچک کاغذی و چاپ شده را با نوارچسب به فاصله یک متر از هم می‌چسبانیم.
- با چسب گرمایی چشمه لیزر را در یک انتهای تخته ثابت می‌کنیم و برای اینکه پرتو لیزر موازی با سطح افقی تخته باشد برای تنظیم می‌توانیم مقداری خمیر قابل انعطاف زیر آن بگذاریم.
- آینه نیمه‌شفاف را با زاویه ۴۵ درجه مقابل باریکه لیزر قرار می‌دهیم و با چسب گرمایی آن را ثابت می‌کنیم به طوری که پرتو بازتابیده به هدفی که در راستای عمود بر آن قرار دارد، بتابد.
- آینه تخت با پایه مناسب را در پشت آینه نیمه‌شفاف قرار می‌دهیم تا پرتو عبوری از نیم آینه، به آن بتابد. آینه را به قدری می‌چرخانیم که پرتو بازتابیده از آن نیز بر روی هدف بتابد.
- زاویه آینه دوم را از روی نقاله می‌خوانیم.
- فاصله آینه تا آینه نیمه شفاف را دقیقاً برابر یک متر تنظیم می‌کنیم و اگر این کار مقدور نبود، فاصله مورد نظر (x) را اندازه می‌گیریم.
- فاصله عمودی هدف تا لیزر را می‌توان با رابطه $\tan\theta = \frac{d}{x} = \frac{d}{۱}$ تعیین کرد.

عدسی استوانه‌ای یک قطعهٔ اپتیکیِ شکل‌دهندهٔ باریکه و مولد خط نور

عدسی‌ها محیط‌های شفاف همگنی هستند که با تغییر مسیر نور می‌توانند ظاهر یک تصویر را تغییر دهند و ممکن است کروی یا استوانه‌ای یا ... باشند و به دو دسته همگرا و واگرا تقسیم می‌شوند. عدسی‌های کرویِ همگرا نور را متمرکز می‌کند. چون شکل کروی دارند، در نتیجه تمام پرتوهای تابیده، در تمام جهت‌ها را به‌طور مساوی به سمت نقطه‌ای به نام کانون هدایت و متمرکز می‌کنند.

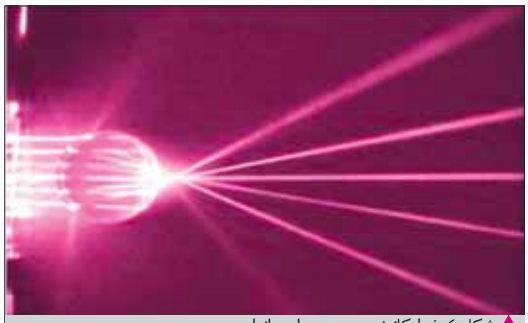
عدسی‌های استوانه‌ای مطابق (شکل ۳) دارای دو نصف‌النهار هستند. یکی نصف‌النهار افقی که خمیده است و عدسی در راستای این نصف‌النهار مانند یک عدسی کروی کار می‌کند. دیگری نصف‌النهار عمودی PQRS که خمیده نیست و عدسی در راستای آن مانند یک تیغهٔ متوازی‌السطوح کار می‌کند این نصف‌النهار عمودی را محور عدسی استوانه‌ای می‌نامند.



شکل ۳. نصف‌النهارهای عدسی استوانه‌ای

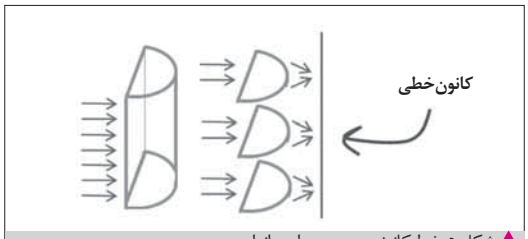
در یک عدسی کروی همهٔ نصف‌النهارها دارای خمیدگی یکسان هستند و پرتوهایی که از یک نقطه می‌آیند پس از برخورد به عدسی، خود و یا امتدادشان در یک نقطه همگرا می‌شوند. در صورتی که در عدسی‌های استوانه‌ای، پرتوهایی که به موازات محور استوانه و به‌طور عمود بر سطح مقطع آن می‌تابند شکسته نمی‌شوند. اما دسته پرتوهایی که در راستای عمود بر محور استوانه و به مقطعی از سطح انحنادار عدسی می‌تابند، مطابق (شکل ٤) پس از عبور همگرا و در نقطه‌ای کانونی یا متمرکز می‌شوند. [٤]

عدسی‌ها محیط‌های شفاف همگنی هستند که با تغییر مسیر نور می‌توانند ظاهر یک تصویر را تغییر دهند

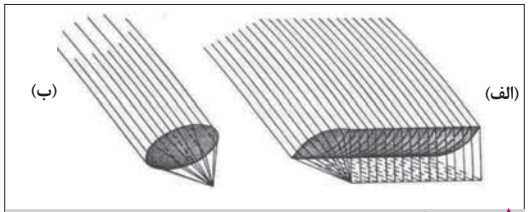

شکل ٤. خط کانونی در عدسی استوانه‌ای

بنابراین یک بخش از پرتوهای موازی در یک کانون اصلی مانند F گردآوری می‌شوند. این کار در همهٔ طول استوانه انجام می‌گیرد و دیده می‌شود که به جای یک نقطهٔ کانونی، یک خط کانونی وجود دارد که موازی محور استوانه است و از تعداد بسیاری کانون مانند f_3، f_2، f_1 و... درست شده است. (مطابق شکل‌های ٥ و ٦)

خط به دست آمده از نقاط f_3، f_2، f_1 و... خط کانونی عدسی نامیده می‌شود. از این‌رو اگر یک نقطهٔ نورانی در برابر این عدسی قرار گیرد، تصویر به دست آمده به جای یک نقطه روشن، یک خط روشن خواهد بود.



شکل ٥. خط کانونی در عدسی استوانه‌ای



شکل ٦. همگرایی دسته پرتوهایی که در راستای عمود بر محور استوانه و به سطح خمیدهٔ عدسی می‌تابند.
الف. نمایش همگرایی در همهٔ طول استوانه
ب. نمایش همگرایی در یک مقطع فرضی از استوانه

یک میله شفاف شیشه‌ای (نظیر یک همزن شیشه‌ای آزمایشگاهی)، نوع ساده‌ای از عدسی استوانه‌ای است که فقط در یک راستا دارای خاصیت کانونی کردن نور است و در راستای عمود بر آن یا همان راستای امتداد میله این ویژگی وجود ندارد. در این صورت میله شفاف می‌تواند در جهت عمود بر امتداد میله، نور را کانونی و بلافاصله بعد از گذر از کانون آن‌ها را واگرا کند. ولی در جهت راستای میله تغییری در نور ایجاد نمی‌کند و در نتیجه یک خط نوری یا یک صفحه واگرای نوری در صفحه روبه‌رو که مقطع آن یک خط راست است، می‌سازد. (شکل‌های ٥ و ٦)

شکل ۷. میله‌های شفاف شیشه‌ای نظیر یک همزن شیشه‌ای آزمایشگاهی نمونه‌ای از عدسی‌های استوانه‌ای هستند.

اندازه خط ایجاد شده، به قطر و جنس میله شیشه‌ای بستگی دارد و کیفیت خط نورانی ایجاد شده را مرغوبیت ماده شفاف میله، همگن و بدون واپیچیدگی بودن میله، کیفیت سطح از نظر خمیدگی و صیقل تعیین می‌کند.

از کاربردهای جذاب خط نور، تعیین خط تراز افقی یا خط نشانه قائم یا مایل است. (شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰)

مطابق شکل ۸ اگر خط نور را روی دیواری بتابانیم، پستی و بلندی‌ها و اجسام مقابل دیوار (مثل کمد و...) خط را بریده می‌کند به عبارتی می‌توان با عکس‌برداری از موضع، توپولوژی دیوار را ثبت نمود.

شکل ۸. ثبت توپولوژی دیوارهای اتاق، کاربردی از خط نور لیزر است. [٦]

شکل ۹. نشانه‌گذاری خط تراز معین در راه‌پله ساختمان، کاربردی از خط نور لیزر [٥]

شکل ۱۰. ایجاد خط برش برای قیچی، کاربردی از خط نور لیزر

الف. وسایل لازم برای ایجاد یک خط نور لیزری

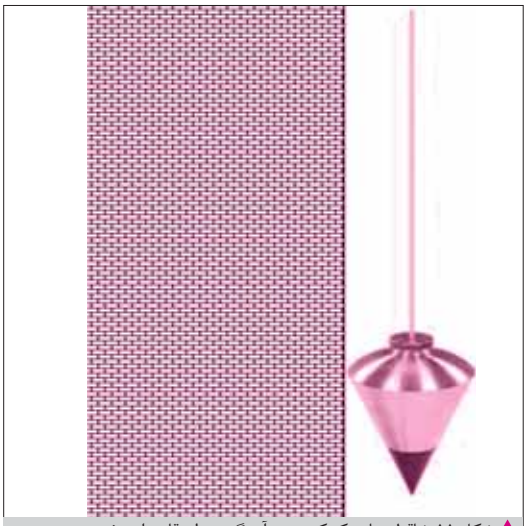
لیزر با پایه مناسب، عدسی استوانه‌ای یا میله شیشه‌ای یا همزن‌های شیشه‌ای آزمایشگاهی با قطرهای مختلف

ب. روش کار

- میله شیشه‌ای یا یک لیوان پر از آب شفاف را به‌طور قائم روی میز قرار می‌دهیم.
- لیزر مدادی را روی میز در موقعیت ثابت طوری تنظیم می‌کنیم که پرتو خروجی آن موازی سطح و مقابل میله شیشه‌ای باشد.
- روی دیوار مقابل یا پرده قائم خط نورانی از لیزر مشاهده می‌شود.
- باید توجه کنیم برای ایجاد خط افقی باید میلهٔ شیشه‌ای به‌صورت عمودی قرار گیرد و برای ایجاد خط قائم لازم است میله شیشه‌ای را به‌صورت افقی قرار دهیم.
- با نزدیک کردن پرده به میله می‌توانیم کانون عدسی استوانه‌ای (میله شیشه‌ای یا لیوان پر از آب) را مشاهده کنیم و فاصله کانونی آن را نیز اندازه بگیریم.

طراحی شاقول لیزری ساده

شاقول، گلوله‌ای فلزی و سنگین است که آن را به ریسمانی می‌بندند و از بالای دیوار یا سطح قائمی آویزان می‌کنند، تا کجی و برآمدگی سطح قائم یا دیوار را تشخیص بدهند. (شکل ۱۱)



▲ شکل ۱۱. شاقول بنایی که کجی و برآمدگی سطح قائم را تشخیص می‌دهد

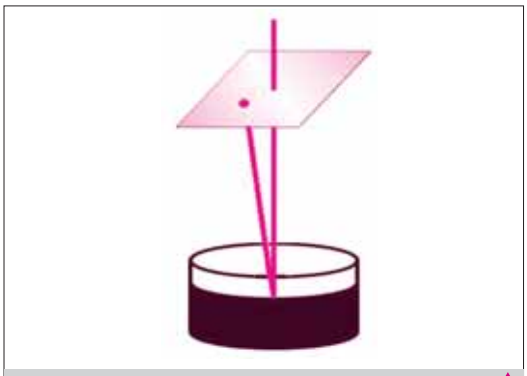
با توسعه به‌کارگیری لیزر در صنعت ساختمان‌سازی، شاقول و ترازهای لیزری به علت دقت بسیار زیاد، جایگزین شاقول‌های متداول و معمولی شده‌اند. مناسب‌ترین مورد کاربرد شاقول‌های لیزری در ساختمان‌های خیلی بلند و همچنین نصب ریل‌های آسانسورها است زیرا خطای بسیار ناچیزی دارند.

با استفاده از سه واقعیت و اصل فیزیکی زیر می‌توان یک شاقول اپتیکی درست کرد:

- پرتو نوری که به‌طور عمود بر یک سطح می‌تابد، پرتو روی خودش باز می‌تابد.
- باریکه نور لیزر برای فاصله‌های خیلی دور واگرایی ناچیزی دارد.
- سطح مایعات در حالت تعادل دینامیکی افقی هستند.

با بهره‌گیری از این موارد، می‌توان شاقولی ساخت، که در آن با تنظیم راستای پرتو لیزر فرودی و قرار گرفتن پرتو بازتابیده روی پرتو تابش کجی یا پستی و بلندی سطحی را تعیین کرد.

برای رسیدن به این هدف می‌توانیم با تابش لیزر به وسط سطح افقی مایع در حال تعادل در سطح زمین و کاهش زاویه تابش به صفر، پرتو تابش و بازتابش آن را بر هم منطبق کنیم. [٤]



▲ شکل ۱۲. تابش عمودی و بازتاب پرتو نور لیزر به سطح افقی روغن سوخته در حال تعادل

الف. وسایل لازم

لیزر با پایه مناسب، ظرف روغن سوختهٔ صاف شده، یک صفحه کاغذ سفید

ب. روش کار

- ابتدا ظرف حاوی روغن را روی سطح زمین قرار می‌دهیم و نور لیزر را به قسمت مرکزی ظرف می‌تابانیم.
- روی صفحه کاغذ سوراخی به اندازه باریکه لیزر ایجاد می‌کنیم به طوری‌که وقتی کاغذ را جلوی لیزر قرار دهیم، باریکه از این روزنه عبور کند و به سطح مایع برسد. با تنظیم راستای پرتو فرودی، پرتو بازتابیده لکه‌ای نورانی را روی کاغذ ایجاد خواهد کرد.
- با تغییر راستای تابش لیزر لکه نورانی بازتابیده را به سوراخ ایجاد شده نزدیک و سرانجام بر سوراخ ایجاد شده منطبق می‌کنیم. در این صورت نور لیزر روی خودش بازتابیده است و پرتو لیزر راستای قائم را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از اپتیک هندسی مقدماتی و استفاده از انتشار نور روی خط راست، قانون‌های بازتاب و عبور نور از سطوح تخت مختلف و واگرایی ناچیز لیزر و سایر قابلیت‌های لیزر می‌توان آزمایش‌های جذاب و ابزارهایی ساده و پرکاربرد طراحی و استفاده کرد.

با توسعه به‌کارگیری لیزر در صنعت ساختمان‌سازی، شاقول و ترازهای لیزری به علت دقت بسیار زیاد، جایگزین شاقول‌های متداول و معمولی شده‌اند

منابع

۱. پورقاضی، اعظم؛ شیوایی، سیدمهدی؛ عزیزی، حسن؛ محمودزاده، غلامعلی. **فیزیک ۱ و آزمایشگاه**. تهران. شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران. (۱۳۹۲).

۲. پل جی، هیوئیت. ترجمه دکتر منیژه رهبر. **فیزیک مفهومی** ویرایش دهم جلد سوم چاپ اول انتشارات فاطمی. (۱۳۸۸)

3. Eugene Hecht. (2002). Optics (4th Edition). 96-150.

4. www.sbu.ac.ir

5. www.blog.science-geekgirl.com

6. www.laserpointer-forums.com