ملاحظه می‌کنید حساسیت چشم با طول موج به تندی تغییر می‌کند و در طول موجهای ۰/۵۱ میکرون و ۰/۶۱ میکرون حساسیت چشم فقط ۵۰ درصد حداکثر است. تشعشعات خورشید که طول موج آنها کمتر از ۰/۲۹ میکرون است توسط طبقه ازن که در بالای اتمسفر است جذب می‌شوند و تشعشعاتی که طول موجشان بیشتر از ۱/۴ میکرون است نیز توسط بخار آب و گاز کربنیک هوا جذب می‌شوند و به زمین نمی‌رسند. منحنی حساسیت چشم انسان نشان‌دهنده این حقیقت است که چشم انسان طی قرون متمادی خود را با شرایط محیط زندگی تطبیق داده است.

در شدت روشناییهای خیلی کم منحنی استاندارد دیگری به‌دست می‌آید که به اندازه ۵۰ نانومتر در سمت چپ منحنی شکل ۱ ـ ۲ واقع می‌شود.

## ۱ ـ ۵ ـ انتشار، انعکاس و شکست امواج نورانی

انتشار، انعکاس و شکست نور تابع قوانین الکترومغناطیسی است که در دروس مربوط بررسی می‌شود. در اینجا برخی مباحث لازم به اختصار تشریح می‌شوند و خوانندگان علاقه‌مند به مطالعه بیشتر این مطالب به مرجع شماره یک آخر کتاب راهنمایی می‌شوند. هر موج الکترومغناطیسی دارای دو میدان الکتریکی E و مغناطیسی H است که بر هم و همچنین بر جهت انتشار عمود هستند. جهت میدان الکتریکی پلاریزاسیون موج را معین می‌کند.

### ۱ ـ ۵ ـ ۱ ـ انتشار نور

در محیطهای یکنواخت امواج نورانی در خط راست حرکت می‌کنند. در محیطهای غیرهادی ($\sigma = 0$) انتشار موج بدون تضعیف صورت می‌گیرد لیکن در محیطهای هادی ($\sigma \neq 0$) انتشار با تضعیف دامنه موج صورت می‌گیرد. سرعت انتشار موج در هر محیط بستگی به ضرایب نفوذپذیری الکتریکی $\in$ و نفوذپذیری مغناطیسی $\mu$ و ضریب هدایت $\sigma$ دارد. در محیطهای غیرهادی سرعت انتشار با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \in}} \qquad (۳ ـ ۱)$$

در محیط خلأ

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$ هنری بر متر

$$\in = \in_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$$ فاراد بر متر

در نتیجه سرعت انتشار چنین است:

$$v = \frac{1}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}}} = 3 \times 10^{8} \quad \text{متر بر ثانیه}$$

در غالب محیطهای عملی $\mu$ برابر $\mu_0$ است لیکن $\epsilon$ چندین برابر $\epsilon_0$ ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$) است[۱۰] و در نتیجه سرعت انتشار به‌صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$v = \frac{3 \times 10^{8}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{متر بر ثانیه} \qquad (۱-۴)$$

$\sqrt{\epsilon_r}$ را معمولاً به‌صورت $n$ نشان می‌دهیم که به ضریب شکست نور در محیط معروف است. در محیطهای دارای تلفات ($\sigma \neq 0$) در طی انتشار، دامنه موج کاهش می‌یابد. ضریب تضعیف یا ضریب هدایت و فرکانس موج افزایش می‌یابد و امواج نوری به‌علت فرکانس خیلی بالا نمی‌توانند حتی در هادیها با ضریب هدایت کم نفوذ کنند و انرژی آنها سریعاً به حرارت تبدیل می‌شود.

فاصله‌ای که طی آن موج در حال انتشار، یک سیکل کامل تغییرات را طی می‌کند طول موج نامیده می‌شود و تعداد سیکلهای کامل در ثانیه فرکانس نامیده می‌شود. رابطه سرعت، طول موج، و فرکانس به‌صورت زیر است:

$$v = n\lambda \qquad (۱-۵)$$

فرکانس موج توسط منبع نور معین می‌شود و در محیطهای مختلف تغییر نمی‌کند لیکن طول موج تابع خواص محیط است که موجب تغییر سرعت انتشار در محیطهای مختلف می‌شود. در مواردی که طول موج بدون ذکر نوع محیط مشخص می‌شود منظور طول موج در فضای خالی است.

مثال ۱-۲

نور قرمزی به طول موج ۰/۷۵ میکرون در خلأ منتشر می‌شود. فرکانس آن را تعیین کنید. در صورتی که این نور وارد شیشه با ضریب نفوذپذیری نسبی ۲/۲۵ گردد طول موج و فرکانس آن چگونه تغییر می‌کند؟

با استفاده از (۱-۵)

---

۱۰. $\epsilon_r$ ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی محیط نامیده می‌شود.

$$f = \frac{3 \times 10^8}{0.75 \times 10^8} = 4 \times 10^{14} \quad \text{هرتز}$$

در شیشه فرکانس تغییر نمی‌کند و سرعت به‌صورت زیر است:

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.25}} = 2 \times 10^8 \quad \text{متر بر ثانیه}$$

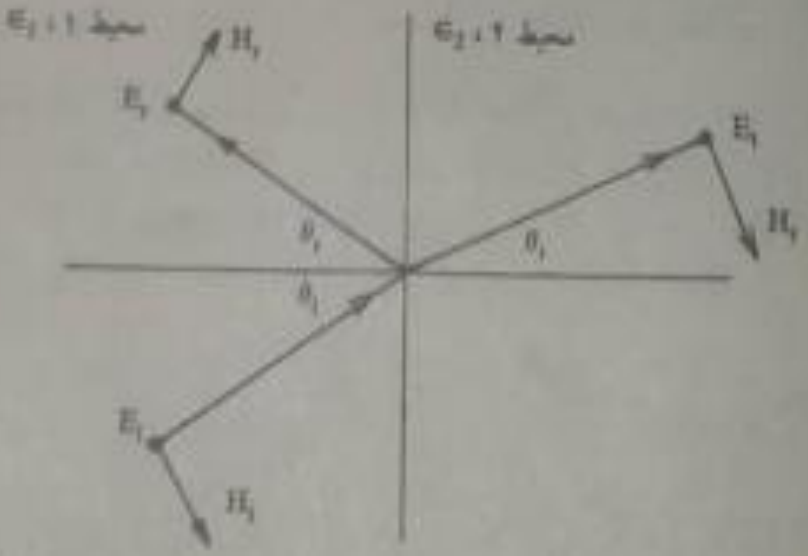
طول موج برابر است با:

$$\lambda = \frac{2 \times 10^8}{4 \times 10^{14}} = 0.5 \times 10^{-6} \quad \text{متر} = 0.5\ \mu\text{m}$$

۱ـ۵ـ۲ـ انعکاس و انتقال نور در برخورد به سطح مشترک دو محیط مختلف

در صورتی که نور به سطح مشترک کاملاً صاف بین دو محیط مختلف (دارای پارامترهای متفاوت) بتابد، قسمتی از آن منعکس می‌شود و قسمتی دیگر از سطح مشترک عبور می‌کند و به محیط دوم منتقل می‌شود. میزان انتقال و انعکاس بستگی به پارامترهای دو محیط، زاویه تابش و پلاریزاسیون موج دارد.

برای بررسی موضوع، دو محیط غیرهادی ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$) وغیرمغناطیسی ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) با ضرایب نفوذپذیری الکتریکی $\varepsilon_1$ و $\varepsilon_2$ را مطابق شکل ۱ـ۳ درنظر بگیرید.




شکل ۱ ـ ۳: انعکاس و انتقال موج با پلاریزاسیون عمودی

ملاحظه می‌کنید که موج تابش با زاویه $\theta_1$ نسبت به خط عمود بر سطح مشترک می‌تابد. براساس قانون اسنل[11] موج منعکس شده با همین زاویه خارج می‌شود لیکن موج منتقل شده با زاویه $\theta_2$ منتشر می‌شود. اگر $\theta_2$ از $\theta_1$ بزرگتر باشد، $n_2$ از $n_1$ بزرگتر است و $\theta_2$ از $\theta_1$ کوچکتر می‌شود. یعنی شعاع نور در عبور از محیط رقیقتر به محیط غلیظتر طوری می‌شکند که به خط عمود نزدیکتر شود. رابطه بین دو زاویه به‌صورت زیر است:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (۶-۱)$$

در این شکل میدانهای الکتریکی هر سه موج عمود بر صفحه تابش (صفحه‌ای که به وسیله خط جهت انتشار موج و خط عمود بر سطح مشترک ساخته می‌شود) هستند که پلاریزاسیون عمودی نامیده می‌شود. ضریب انعکاس که نسبت $\frac{E_r}{E_i}$ است و به $\rho$ نشان داده می‌شود پس از حل مسئله به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\rho = \frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \qquad (۷-۱)$$

ضریب انتقال که نسبت $\frac{E_t}{E_i}$ است و به $\tau$ نشان داده می‌شود برابر است با:

$$\tau = \frac{2n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \qquad (۸-۱)$$

مجذور مقدار $\rho$ با اهمیت است زیرا نسبت توان منعکس شده به توان تابش را مشخص می‌کند. اگر موج تابش را مطابق شکل ۱-۲ با پلاریزاسیون موازی یعنی با میدان الکتریکی در صفحه تابش درنظر بگیریم معادله (۱-۶) به قوت خود باقی می‌ماند و ضرایب انتشار و انتقال به صورت زیر درمی‌آیند:

$$\rho = \frac{n_2 \cos\theta_1 - n_1 \cos\theta_2}{n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2} \qquad (۹-۱)$$

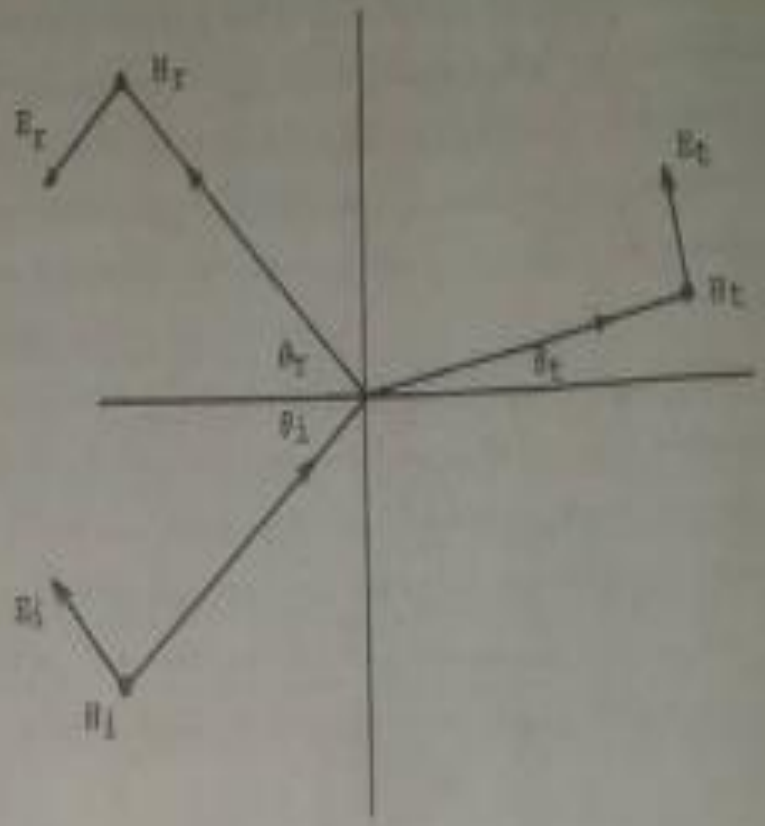
$$\tau = \frac{2n_1 \cos\theta_1}{n_2 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2} \qquad (۱۰-۱)$$

**مثال ۱-۳**

نور از هوا به شیشه با ضریب شکست ۱/۵ می‌تابد. زاویه تابش ۴۰ درجه است. درصد توان

11. Snell's Law

منعکس شده را برای پلاریزاسیون عمودی و موازی محاسبه و مقایسه کنید.




شکل ۱ ـ ۴ : انعکاس و انتقال موج با پلاریزاسیون موازی

برای پلاریزاسیون عمودی با استفاده از (۱ ـ ۶)

$$1 \times \sin 40^\circ = 1.5 \times \sin\theta_t$$

$$\sin\theta_t = 0.43 \Rightarrow \cos\theta_t = 0.90$$

$$\cos 40^\circ = 0.77$$

با استفاده از (۱ ـ ۷)

$$\rho = \frac{1 \times 0.77 - 1.5 \times 0.90}{1 \times 0.77 + 1.5 \times 0.90} = -0.274$$

$$|\rho|^2 = 0.075$$

برای پلاریزاسیون موازی با استفاده از (۱ ـ ۱۰)

$$\frac{1.5 \times 0.77 - 1 \times 0.90}{}$$

ضرایب انعکاس متوسط برای برخی سطوح معمولی و برای رنگهای موجود در جدول ۱ ـ ۲ آمده است.

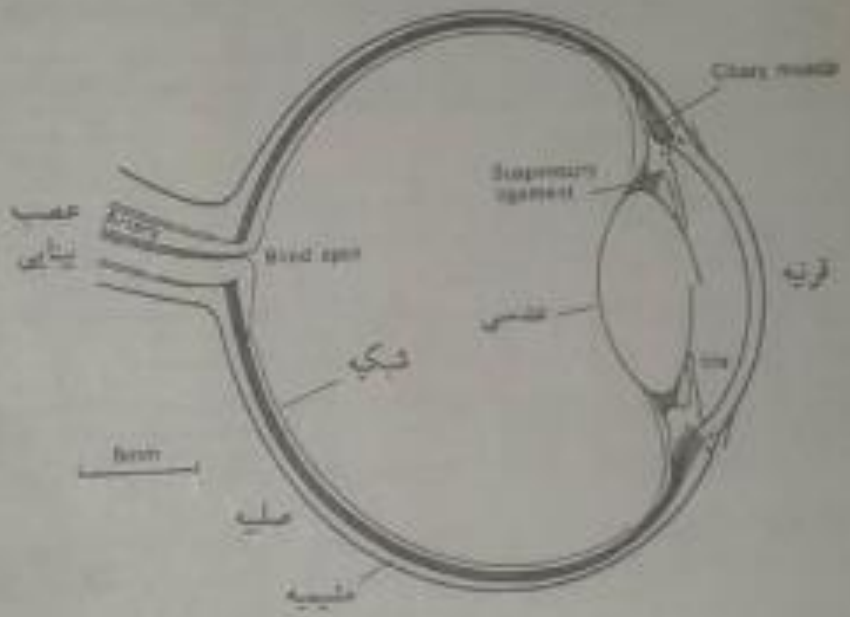
جدول ۱ ـ ۲: ضرایب انعکاس توان $|\rho|^2$ برای سطوح مختلف (مقادیر میانگین)

| سطح | درصد انعکاس | رنگ سطح رنگ شده | درصد انعکاس |
|---|---|---|---|
| گچ خشک (تازه) | ۸۰ | سفید | ۸۰ |
| گچ خشک (کهنه) | ۶۵ | زرد | ۶۵ |
| سیمان خشک (تازه) | ۴۵ | صورتی روشن | ۵۰ |
| سیمان خشک (کهنه) | ۲۰ | خاکستری روشن | ۵۰ |
| آجر قرمز | ۱۰ | آبی روشن | ۴۵ |
| آجر سفید | ۲۵ | سبز روشن | ۴۵ |
| آسفالت یا اندود قیر | ۱۲ | قرمز روشن | ۴۰ |
| سنگ مرمر سفید | ۸۰ | خاکستری تیره | ۱۵ |
| آلومینیوم پرداخت شده | ۷۵ | آبی تیره | ۱۵ |
| آلومینیوم کدر | ۵۵ | سبز تیره | ۱۵ |
| کاشی سفید | ۸۰ | قرمز تیره | ۱۵ |
| شیشه روشن ۲ میلیمتری | ۸ | قهوه‌ای تیره | ۱۵ |
| شیشه مات ۳ میلیمتری | ۱۲ | سیاه | ۵ |
| شیشه شیری ۳ میلیمتری | ۵۵ | | |
| آب | ۹۰ | | |

سیستمهای روشنایی را طوری طراحی کنیم که آسیبی به آن وارد نسازند.

۱ـ۲ـ۱ـ ساختمان چشم انسان

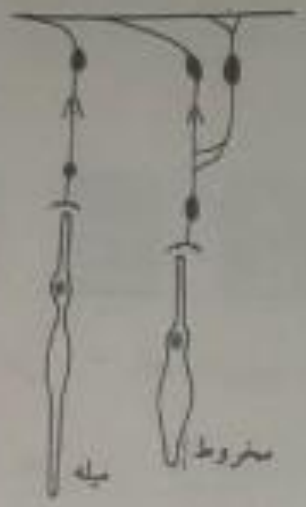
چشم انسان تقریباً کروی و دارای قطر تقریبی ۲/۵ سانتیمتر است. هر چشم دارای ۶ ماهیچه است که دو به دو با هم عمل می‌کنند و چشم را حرکت می‌دهند. دو ماهیچه برای حرکت بالا و پایین، دو ماهیچه برای حرکت چپ و راست و دو ماهیچه برای گردش دادن چشم حول محور آن است. مقطع چشم مطابق شکل ۱ـ۶ است.




شکل ۱ـ۶: مقطع چشم انسان

لایهٔ خارجی چشم انسان پرده پوستی محکمی به ضخامت ۱ میلیمتر است که کار حفاظت چشم را عهده‌دار است و صلبیه یا سفیدی چشم نامیده می‌شود. این پرده در جلو چشم شفاف است و قرنیه نامیده می‌شود. زیر پردهٔ پوستی لایهٔ دومی به‌نام مشیمیه قرار دارد که شامل رگها و مویرگهاست که چشم و اعصاب بینایی را تغذیه می‌کنند و در جلو چشم یعنی زیر قرنیه به عنبیه ختم می‌شود که در وسط آن یک سوراخ کوچک قرار دارد که مردمک نامیده می‌شود و می‌تواند مثل دهانهٔ دوربین تنگ و گشاد شود. مشیمیه به رنگ قهوه‌ای تیره است و انعکاسهای متقابل داخل چشم را جذب می‌کند. فضای بین قرنیه و عنبیه از مایع شفافی پر است و پشت آن عدسی جای دارد. فضای داخل چشم هم از مایع شفاف دیگری پر شده است. عدسی به وسیلهٔ عضله‌ای کنترل

می‌شود. برای رؤیت اجسام نزدیک این عضله به حالت کشیده و برای رؤیت اشیاء دور این عضله به حالت آزاد است. لایهٔ داخلی چشم شبکیه نام دارد که در آن گیرنده‌های بینایی که بر دو نوع میله‌ای و مخروطی هستند قرار دارند. میله‌ها و مخروطها به فیبرهای عصبی متصل هستند که به عصب بینایی متصل می‌شوند. در هر چشم در حدود ۱۲۵ میلیون میله و ۷ میلیون مخروط وجود دارد. در شکل ۱ ـ ۷ یک گیرندهٔ میله‌ای و یک گیرندهٔ مخروطی نشان داده شده‌اند. در محل خروج عصب بینایی گیرنده‌هایی وجود ندارند و به این دلیل این نقطه را نقطهٔ کور می‌نامند.




شکل ۱ ـ ۷: نمایش میله‌ها و مخروطها

گیرنده‌های میله‌ای حساستر هستند، لیکن به رنگ حساس نیستند و تشخیص رنگ به عهدهٔ گیرنده‌های مخروطی است. رؤیت اشیاء به این صورت انجام می‌شود که نور منعکس شده از اشیاء از مردمک عبور می‌کند و تصویر توسط عدسی بر روی شبکیه ظاهر می‌شود. نور تصویر سبب تحریک گیرنده‌های میله‌ای و مخروطی می‌شود و تصویر توسط عصب بینایی به مغز منتقل می‌شود.

۱ـ۷ـ۲ـ عوامل اصلی در رؤیت و ارزیابی کمی آنها

عوامل اصلی در رؤیت عبارت از ۴ عامل هستند. عامل اول اندازهٔ جسمی است که رؤیت می‌شود. هرچه جزئیات جسم کوچکتر و دقیقتر باشد و یا فاصلهٔ آن از چشم بیشتر شود، رؤیت مشکلتر می‌شود. مثلاً در شکل ۱ ـ ۸، دهان باز حرف «C» جزء دقیق است و با کوچکتر شدن آن

**جدول ۵-۳** محاسبه ضریب بهره اتاق از روی شاخص اتاق و ضرایب انعکاس سطوح برای یک نوع چراغ خاص

| منحنی تقریبی توزیع شدت نور و حداکثر فاصله مجاز | سقف (%) | 80 | | | 70 | | | 50 | | | 30 | | 0 | نوع چراغ و ضریب نگهداری |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | دیوارها (%) | 50 | 30 | 10 | 50 | 30 | 10 | 50 | 30 | 10 | 30 | 10 | 0 | |
| | شاخص اتاق | ضرایب بهره به ازای ضریب انعکاس کف 10% (برای ضریب انعکاس 30% به جداول تکمیلی اصلاح ضریب رجوع شود) | | | | | | | | | | | | |
| حداکثر فاصله: 0.8 × MH | 0.6 | 0.26 | 0.23 | 0.20 | 0.26 | 0.22 | 0.20 | 0.25 | 0.22 | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.49 | |
| | 0.8 | 0.32 | 0.29 | 0.26 | 0.32 | 0.29 | 0.26 | 0.31 | 0.29 | 0.26 | 0.28 | 0.26 | 0.29 | |
| | 1.0 | 0.37 | 0.34 | 0.31 | 0.37 | 0.33 | 0.30 | 0.36 | 0.32 | 0.30 | 0.32 | 0.30 | 0.29 | |
| | 1.25 | 0.41 | 0.37 | 0.35 | 0.41 | 0.37 | 0.35 | 0.40 | 0.37 | 0.34 | 0.36 | 0.34 | 0.33 | |
| | 1.5 | 0.44 | 0.40 | 0.37 | 0.43 | 0.40 | 0.37 | 0.42 | 0.40 | 0.37 | 0.39 | 0.37 | 0.36 | قاب دو تایی با لوور |
| | 2.0 | 0.47 | 0.44 | 0.42 | 0.47 | 0.44 | 0.41 | 0.46 | 0.43 | 0.41 | 0.42 | 0.41 | 0.40 | |
| | 2.5 | 0.50 | 0.47 | 0.45 | 0.49 | 0.47 | 0.45 | 0.49 | 0.46 | 0.44 | 0.45 | 0.43 | 0.42 | ضریب نگهداری |
| | 3.0 | 0.51 | 0.59 | 0.47 | 0.51 | 0.49 | 0.46 | 0.50 | 0.47 | 0.46 | 0.47 | 0.45 | 0.44 | تمیز 0.75 |
| | 4.0 | 0.53 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.51 | 0.49 | 0.51 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.47 | 0.46 | متوسط 0.70 |
| | 5.0 | 0.55 | 0.53 | 0.52 | 0.54 | 0.53 | 0.51 | 0.53 | 0.52 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.49 | آلوده 0.65 |