



## تجزیه نور و رنگ

کتاب فیزیک مفهومی، جلد سوم، صفحه ۸۷۶ تا ۸۶۶

### رنگ

گل‌های سرخ قرمز رنگ و بنفشه‌ها آبی رنگ‌اند؛ رنگ‌ها هم برای هنرمندان و هم برای فیزیک‌دانان کنج‌کاوی برانگیزند. برای فیزیک‌دانان رنگ اشیا در ذات آنها یا حتی در نوری نیست که گسیل می‌کنند یا باز می‌تابانند. رنگ تجربه‌ای فیزیولوژیکی و در چشم بیننده است. بنابراین، وقتی می‌گوییم نور ناشی از گل سرخ قرمز رنگ است، به بیان دقیق‌تر منظورمان این است که قرمز به نظر می‌رسد. بسیاری از موجودات زنده، از جمله افراد کوررنگ، گل سرخ را اصلاً قرمز نمی‌بینند.

رنگ‌هایی که می‌بینیم تابع بسامد نوری است که مشاهده می‌کنیم. نورهای با بسامدهای متفاوت به صورت رنگ‌های مختلف مشاهده می‌شوند؛ کم‌بسامدترین نوری که می‌توان دید برای اغلب افراد قرمز رنگ، و پر بسامدترین نور به صورت بنفش نمایان می‌شود. بی‌نهایت رنگ مختلف بین این دو حد وجود دارد که طیف رنگی رنگین‌کمان را تشکیل می‌دهند. بنابر قرارداد، این رنگ‌ها را به هفت رنگ قرمز، نارنجی، زرد، سبز، آبی، نیلی، و بنفش طبقه‌بندی می‌کنند. این رنگ‌ها با هم سفید به نظر می‌رسند. نور سفید خورشید ترکیبی از تمام بسامدهای مرئی است.

### بازتاب گزینشی

به استثنای چشمه‌های نوری چون لامپ‌ها، لیزرها، و لوله‌های تخلیه گاز (که در فصل ۳۰ بررسی خواهیم کرد)، بیشتر اجسام اطراف ما به جای گسیل نور آن را باز می‌تابانند. آنها فقط بخشی از نوری را باز می‌تابانند که بر آنها می‌تابد، یعنی بخشی که به آنها رنگ می‌دهد. مثلاً، گل سرخ، نوری گسیل نمی‌کند؛ بلکه آن را باز می‌تاباند (شکل ۲۷-۱). اگر نور خورشید را از منشوری بگذرانیم و سپس گل سرخ قرمز پررنگی را در بخش‌های مختلف طیف بگذاریم، گلبرگ‌های آن در تمام بخش‌های طیف، به استثنای بخش سرخ، قهوه‌ای یا سیاه به نظر می‌رسند. گلبرگ‌ها در

بخش قرمز طیف سرخ به نظر می‌آیند، اما برگ‌ها و ساقه سبز آن سیاه به نظر می‌رسند. این نشان می‌دهد که گلبرگ‌های قرمز فقط می‌توانند رنگ سرخ و نه رنگ‌های دیگر را بازتابانند؛ همین طور، برگ‌های سبز فقط نور سبز و نه رنگ‌های دیگر نور را باز می‌تابانند. وقتی گل سرخ را در نور سفید بگیریم، گلبرگ‌ها قرمز و برگ‌ها سبز به نظر می‌رسند زیرا گلبرگ‌ها بخش قرمز نور سفید و برگ‌ها بخش سبز آن را باز می‌تابانند. برای فهمیدن اینکه چرا هر جسم نور با رنگ خاصی را باز می‌تاباند، باید توجه خود را به اتم معطوف کنیم.



(الف)



(ب)



(ج)

### شکل ۲۷-۳

(الف) توپ قرمز زیر نور سفید مشاهده می‌شود. رنگ قرمز ناشی از آن است که توپ فقط بخش سرخ نوری که آن را روشن می‌کند باز می‌تاباند و بقیه نور در سطح آن جذب می‌شود. (ب) توپ قرمز زیر نور سرخ دیده می‌شود. (ج) توپ قرمز زیر نور سبز دیده می‌شود. توپ از این رو سیاه به نظر می‌رسد که سطح جسم نور سبز را جذب می‌کند — هیچ چشمه نور سرخی وجود ندارد تا سطح آن را بازتابانند.

معمولاً، هر ماده‌ای بعضی بسامدهای نور را جذب می‌کند و بقیه را باز می‌تاباند. اگر ماده‌ای بیشتر نور مرئی فرودی را جذب کند و، مثلاً، قرمز را بازتابانند، قرمز به نظر می‌رسد. به این دلیل گلبرگ‌های گل سرخ قرمز و ساقه آن سبز به نظر می‌آید. اتم‌های گلبرگ‌ها تمام نور مرئی بجز قرمز را جذب می‌کنند و نور قرمز را باز می‌تابانند؛ اتم‌های ساقه تمام نور بجز سبز را جذب می‌کنند، و سبز را باز می‌تابانند. جسمی که تمام بسامدهای نور مرئی را بازتابانند، مانند بخش سفید این صفحه، رنگ همان نوری را دارد که به آن می‌تابد. اگر ماده تمام نوری را که به آن می‌تابد جذب کند، هیچ نوری را باز نمی‌تاباند و سیاه دیده می‌شود.

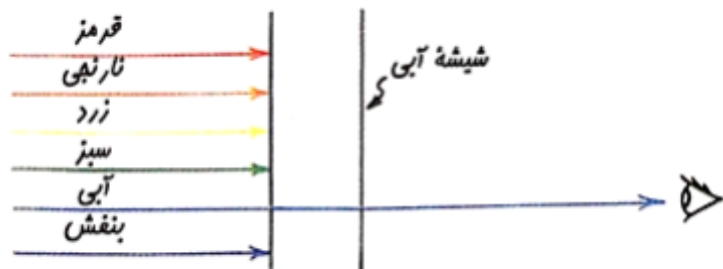


جالب آنکه گلبرگ‌های بیشتر گل‌های زرد، مثل نرگس، علاوه بر نور زرد، قرمز و سبز را هم بازمی‌تابانند. نرگس‌های زرد نوار پهنی از بسامدها را بازمی‌تابانند. رنگ‌هایی که از بیشتر اجسام بازمی‌تابند رنگ‌های خالص تک‌بسامد نیستند بلکه از گستره‌ای از بسامدها تشکیل شده‌اند.

جسم فقط بسامدهایی را بازمی‌تاباند که در نور تابیده بر آن وجود دارد. بنابراین، ظاهر جسم رنگی تابع نوع نوری است که بر آن می‌تابد. مثلاً، لامپ رشته‌ای نورهای کم‌بسامد را بیشتر از نورهای پربسامد گسیل می‌کند، و رنگ‌های قرمزی را تقویت می‌کند که در این نور مشاهده می‌شوند. رنگ قرمز پارچه‌ای که اندکی از این رنگ را دارد زیر نور لامپ رشته‌ای واضح‌تر از لامپ فلورئوسان است. لامپ‌های فلورئوسان بسامدهای بالای بیشتری دارند و در نتیجه رنگ آبی در نور آنها تقویت می‌شود. معمولاً رنگ «واقعی» جسم را همان رنگی در نظر می‌گیریم که زیر نور آفتاب دارد. بنابراین، هنگام خرید لباس توجه کنید رنگی که زیر نور مصنوعی می‌بینید رنگ واقعی آن نیست.

## تراگسیل گزینشی

رنگ هر جسم شفاف تابع رنگ نوری است که تراگسیل می‌کند. قطعه شیشه قرمز رنگ از این رو سرخ به نظر می‌رسد که تمام اجزای تشکیل‌دهنده نور سفید را جذب و فقط قرمز را تراگسیل می‌کند. همین‌طور، قطعه شیشه آبی رنگ از این رو آبی به نظر می‌رسد که در درجه اول آبی را تراگسیل می‌کند و بقیه نورهای فرودی را جذب می‌کند. شیشه حاوی رنگ‌ها یا رنگدانه‌هایی — ذره‌های ریزی — است که به صورت گزینشی برخی بسامدهای نور را جذب و بقیه را به صورت گزینشی تراگسیل می‌کنند. از دیدگاه اتمی، الکترون‌های اتم رنگدانه‌ها بسامدهای معینی از نور فرودی را به صورت گزینشی جذب می‌کنند. بسامدهای دیگر نور در شیشه از مولکولی به مولکول دیگر بازگسیل می‌شوند. انرژی نور جذب شده، انرژی جنبشی مولکول‌های شیشه را زیاد می‌کند و شیشه گرم می‌شود. شیشه معمولی پنجره بی‌رنگ است زیرا تمام بسامدهای نور مرئی را به خوبی تراگسیل می‌کند.

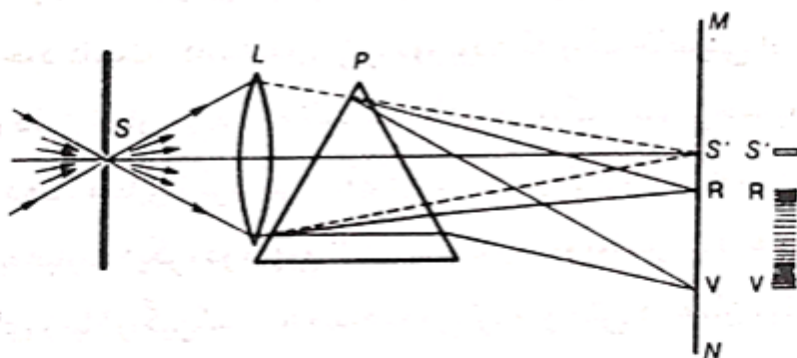


## شکست نور در منشور

### ۱۹-۲ کشف اساسی نیوتون در نورشناسی

نیوتون مطالعه رنگهای مشاهده شده در شکست نور را در ارتباط با کوششهایی آغاز کرد که برای اصلاح تلسکوپها انجام می داد. سعی برای تهیه عدسیهای با کیفیت هرچه بالاتر، نیوتون را به این نتیجه رساند که اشکال اساسی تصویر در رنگی بودن آن است. می دانیم که این وضع سبب تغییر تلسکوپها به تلسکوپهای آینه‌ای (تلسکوپهای بازتابی) شد (رجوع کنید به بخش ۱۲-۱۰). نیوتون، با بررسی رنگهایی که در نتیجه شکست ظاهر می شوند، به بزرگترین کشف خود در نورشناسی نائل آمد.

اساس کشف نیوتون را می توان با آزمایشهای زیر بیان کرد (شکل ۳۰۹). نور چراغ روزنه باریک (شکاف)  $S$  را روشن می کند. عدسی  $L$  برای به دست آوردن تصویر شکاف به صورت مستطیل کوچک و سفید  $S'$  به کار می رود. با قرار دادن منشور  $P$  در مسیر پرتوها، به طوری که یال آن موازی شکاف باشد، مشاهده خواهیم کرد که تصویر شکاف جابه جا شده و به نواری رنگی تبدیل می شود که در آن گذر از رنگ قرمز به رنگ بنفش عیناً همان است که در رنگین کمان مشاهده می شود. این تصویر رنگی شکاف را نیوتون طیف نامید (شکل ۳۱۰).



شکل ۳۰۹. نمودار طرحوار آزمایشهای بنیادی نیوتون درباره پاشندگی نور. فاصله پرتو تا منشور به اندازه کافی بزرگ است تا نوارهای رنگی جدا از هم تشخیص داده شوند.

اگر شکاف را با شیشه رنگی بپوشانیم، یعنی نور رنگی را به جای نور سفید به منشور بتابانیم، تصویر شکاف به مستطیل رنگی تبدیل خواهد شد که در ناحیه متناظر با رنگ خود در طیف قرار می گیرد. به عبارت دیگر، نور از تصویر اولیه خود  $S'$  زاویه های متفاوتی که بستگی به رنگ دارد، منحرف می شود. آزمایش نشان می دهد که پرتوهای رنگهای مختلف از منشور به طور متفاوت شکسته می شوند.

#### ۸-۴ نور خالص و نور مرکب

هرگاه نور سرخ یا سبز را که در طیف نور خورشید موجود است بار دیگر از منشور عبور دهیم، این نورها تجزیه نمی‌شوند. چنین نورهایی را نور خالص یا نور تکفام می‌نامند. سرعت نور خالص در محیطهای شفاف معین همواره یک مقدار ثابت است. نوری که در منشور تجزیه شود، نور مرکب است. سرعت و ضریب شکست برای اجزای یک نور مرکب متفاوت است به همین دلیل زاویه انحراف نور برای اجزای یک نور مرکب که از منشور می‌گذرد متفاوت خواهد بود و نور مرکب پاشیده می‌شود. سه رنگ سبز، سرخ و آبی که با آنها می‌توان نور سفید و هر رنگ دیگر را تهیه کرد رنگهای اصلی می‌نامند. در مثلث شکل ۱۱-۴ می‌توان رنگهای نوری را که با سه نور اصلی به‌وجود می‌آید ملاحظه کرد



زرد  $\rightarrow$  سبز + سرخ  
 کلی  $\rightarrow$  آبی + سرخ  
 فیروزه‌ای  $\rightarrow$  آبی + سبز  
 سفید  $\rightarrow$  آبی + سبز + سرخ

شکل ۱۱-۴

هر دو نوری را که با آمیختن آنها نور سفید به‌وجود آید نورهای مکمل می‌نامند. زرد با آبی، کلی با سبز، فیروزه‌ای با سرخ مکمل‌اند.

#### ۹-۴ رنگ مواد

رنگ هر جسم مربوط به اثر نور تابیده از آن جسم بر چشم است. این نور می‌تواند از خود جسم تابیده شود یا آنکه جسم آن نور را باز بتاباند و به چشم ناظر برساند. چشم انسان نسبت به موجهایی با طول موجهای حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر (۰/۴ تا ۰/۷ میکرون) حساس است و هر بخش از این محدوده را به یکی از رنگهای طبیعی می‌بیند. طول موج ۰/۷ میکرون به رنگ سرخ و طول موج ۰/۴ میکرون به رنگ بنفش دیده می‌شود.



نوری که به چشم می‌رسد روی شبکه متمرکز می‌شود. شبکه از دو نوع سلول حساس به نور استوانه‌ای و مخروطی پوشیده شده است. سلولهای استوانه‌ای نسبت به شدت نور بسیار حساس‌اند. سلولهای مخروطی شامل رنگدانه‌هایی هستند که نسبت به طول موج و بسامد نور حساس‌اند. سه نوع رنگدانه وجود دارد. هر سلول مخروطی دارای یکی از این رنگدانه‌هاست. سلولهای مخروطی می‌توانند نور سرخ، نور سبز و نور آبی را تشخیص دهند. اگر به هر سه دسته سلول مخروطی با هم این نورها بتابد نور سفید دیده می‌شود.

رنگ یک خاصیت روانشناختی نور است. رابطه نور و رنگ به خواص فیزیکی نور و ویژگیهای روانی فرد بستگی دارد.

رنگ هر جسم به چهار عامل بستگی دارد:

۱. نوری که به جسم می‌تابد.

۲. ماده شیمیایی که سطح خارجی جسم را می‌پوشاند.

۳. محیط میان جسم و چشم ناظر.

۴. چشم ناظر.

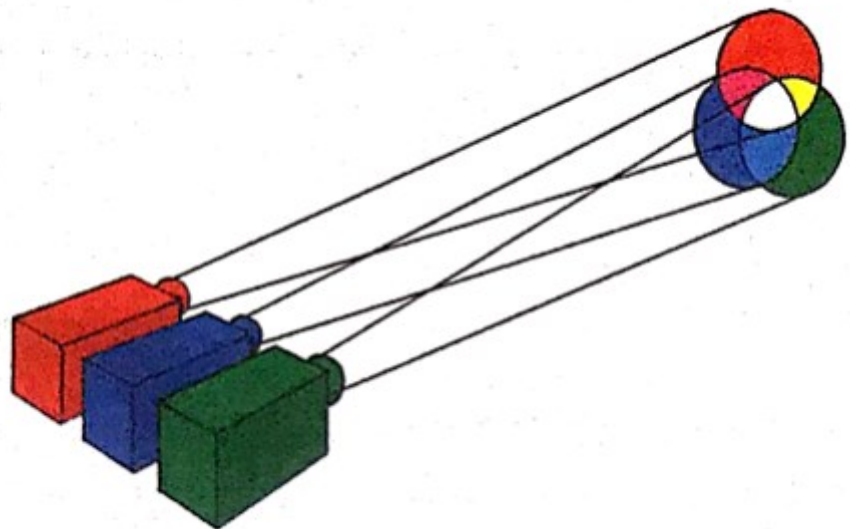
محیط میان جسم و چشم ناظر از نظر رنگ نیز اهمیت دارد. بعضی محیطها به‌طور یکسان بخشی از همه نورها را جذب می‌کنند. در این صورت از پشت چنین محیطی همه اجسام به یک اندازه کم‌رنگ می‌شوند. ولی ممکن است محیط بعضی از نورها را جذب کند و بعضی دیگر را عبور دهد، در این صورت جسم به رنگی که از محیط شفاف می‌گذرد و به جسم می‌رسد دیده می‌شود. مثلاً اگر شیشه عینک سبز باشد هر جسمی که مقابل چشم قرار گیرد سبز یا تیره دیده می‌شود.

نورهای قرمز، سبز، و آبی را روی پرده‌ای بیندازید. جایی که این رنگ‌ها برهم‌نهاده شوند، سفید تولید می‌شود. وقتی دو تا از این سه رنگ روی هم بیفتند، رنگ دیگری تولید می‌شود (شکل ۲۷-۹). فیزیک‌دانان می‌گویند نورهای رنگی برهم‌نهاده شده با یکدیگر جمع شده‌اند. بنابراین، می‌گوییم نور قرمز، سبز، و آبی با هم جمع می‌شوند تا نور سفید تولید کنند، و از جمع شدن دو رنگ از این سه نور رنگی، رنگ دیگری به دست می‌آید. مقادیر مختلف قرمز، سبز، و آبی، یعنی رنگ‌هایی که سه نوع از مخروط‌های ما به آنها حساس‌اند، تمام رنگ‌های طیف را تولید می‌کند. بدین سبب، قرمز، سبز، و آبی را رنگ‌های اصلی جمع‌پذیر می‌نامند. بررسی دقیق این موضوع در بیشتر لامپ‌های تلویزیون رنگی نشان می‌دهد که تصویر تلویزیون مجموعه‌ای از خال‌های ریز هر یک به عرض کمتر از یک میلی‌متر است. وقتی صفحه روشن می‌شود، برخی از این خال‌ها قرمز، برخی سبز، و بعضی دیگر آبی‌اند؛ مخلوط این رنگ‌های اصلی در فاصله‌ای از صفحه گستره کامل رنگ‌ها، به اضافه سفید، را به وجود می‌آورد.



جالب است توجه کنید رنگ «سیاهی» که در تاریک‌ترین صحنه‌ها در لامپ تلویزیون می‌بینید صرفاً رنگ سطح خود لامپ است، که بیشتر خاکستری روشن است تا سیاه. چون چشمان ما به تضاد بخش‌های تیره و روشن صفحه حساس است، این خاکستری را سیاه می‌بینیم.

چرخه‌ها



دو رنگی را که با جمع شدن با هم رنگ سفید تولید کنند رنگ‌های مکمل می‌نامند. هر رنگ دارای رنگ مکملی است که وقتی به آن اضافه شود سفید به دست می‌آید.

این واقعیت را که ترکیب هر رنگ با رنگ مکملش نور سفید تولید می‌کند به خوبی برای روشن کردن صحنه‌های نمایش به کار می‌برند. مثلاً، با تاباندن نورهای آبی و زرد روی بازیگر اثر نور سفید به وجود می‌آید — بجز در مواردی مثل سایه‌ها که یکی از دو رنگ وجود ندارد. مثلاً سایه لامپ آبی، با نور لامپ زرد روشن می‌شود و زرد به نظر می‌رسد. همین‌طور سایه لامپ زرد آبی به نظر می‌آید. این اثری بسیار جالب است.

این اثر را در شکل ۲۷-۱۰ مشاهده می‌کنیم که در آن، نورهای قرمز، سبز، و آبی بر توپ گلفی تابیده‌اند. به سایه‌های ناشی از این توپ توجه کنید. سایه میانی را نورافکن سبز تولید کرده و تیره نیست زیرا نورهای قرمز و آبی آن را روشن کرده و رنگ سرخابی را به وجود می‌آورد. سایه نور آبی زرد به نظر می‌رسد، زیرا نور قرمز و سبز آن را روشن کرده‌اند. آیا می‌دانید چرا سایه نور قرمز فیروزه‌ای به نظر می‌رسد؟



شکل ۲۷-۱۰

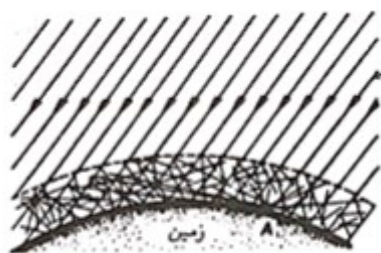
تصویر تعاملی

توپ سفید گلف وقتی با نورهای قرمز، سبز، و آبی با شدت مساوی روشن شود سفید به نظر می‌رسد. چرا سایه‌های آن سرخابی، فیروزه‌ای، و زردند؟

## ۱۹-۱۳ رنگ آسمان و سپیده دم

نوری که از ناحیه دور از خورشید و بدون ابر آسمان به شخص می رسد با درجه رنگ آبی سیر و حتی نیلی مشخص می شود. بدون شک این نور خورشید است که در جو زمین پراکنده می شود و به همین دلیل نوری که از جهات دیگر به ناظر می رسد با نوری که از جهت خورشید می رسد فرق دارد. شکل ۳۱۸ منشاء نور پراکنده شده در آسمان را بیان می کند.

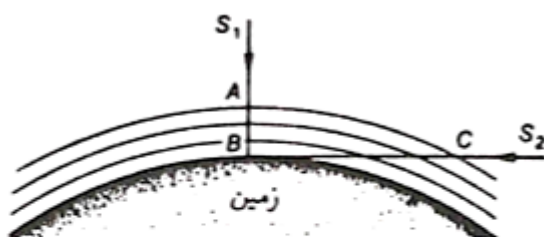
بررسیهای نظری و آزمایشگاهی نشان می دهند که این پراکندگی به علت ساختار مولکولی هواست. حتی وقتی که هوا کاملاً عاری از گرد و خاک است، باز هم هوا تابش خورشیدی را می پراکند. طیف نور پراکنده شده توسط جو زمین به مقدار زیادی با طیف تابش خورشیدی مستقیم فرق دارد. در تابش خورشیدی، ماکزیم انرژی با ناحیه طیفی زرد - سبز متناظر است، در حالی که در نور پراکنده شده در آسمان، این ماکزیم به ناحیه آبی جابه جا می شود. علت آن این است که امواج نوری کوتاه



شکل ۳۱۸. برای توضیح رنگ آسمان (نور خورشید توسط جو پراکنده می شود)، نور مستقیم خورشید، مثل نور پراکنده از جو، به سطح زمین می رسد (مثل نقطه A). رنگ نور پراکنده رنگ آسمان را مشخص می کند.

به مراتب شدیدتر از امواج بلند پراکنده می شوند. مطابق محاسباتی که جان ویلیام استروت (لرد ریلی<sup>۱</sup>) (۱۸۴۲ - ۱۹۱۹) ریاضیدان و فیزیکدان انگلیسی، انجام داد و با اندازه گیریها تأیید شد، شدت نور پراکنده شده در صورتی که ذرات پراکنده در مقایسه با طول موج کوچک باشند با توان چهارم طول موج نسبت عکس دارد. در نتیجه، پرتوهای بنفش نه برابر شدیدتر از پرتوهای قرمز پراکنده می شوند. به همین علت نور مایل به زرد خورشید بر اثر پراکنده شدن در جو به رنگ آبی آسمان تبدیل می شود. این پدیده وقتی اتفاق می افتد که هوای جو تمیز باشد (نظیر کوهها یا روی اقیانوسها). وجود ذرات غبار نسبتاً بزرگ در هوا (در شهرها) نور پراکنده شده در ذرات غبار را به نور آبی پراکنده شده، یعنی به تابش خورشیدی تقریباً دست نخورده اضافه می کند. به علت همین مخلوط شدن رنگ آسمان در این نواحی بیشتر به سفیدی می زند.

پراکندگی بیشتر امواج کوتاه توضیح می‌دهد که چرا تابش خورشیدی که مستقیماً به زمین می‌رسد از نوری که در ارتفاعات بالا مشاهده می‌شود زردتر است. تابش خورشیدی در سر راه خود به زمین قدری پراکنده می‌شود و چون امواج کوتاه به مقدار بیشتری پراکنده می‌شوند، لذا نوری که به زمین می‌رسد قسمت موج-بلند طیف را بیشتر دارد. این پدیده به هنگام طلوع و غروب خورشید (در مورد ماه نیز صحیح است) که پرتوهای مستقیم باید از میان لایه‌های جوّی بسیار ضخیمتری عبور کند (شکل ۳۱۹) محسوستر است. به همین علت خورشید (یا ماه) در موقع طلوع یا غروب دارای رنگ مسی و حتی تا حدی مایل به قرمز است. اگر هوای جو شامل ذرات غبار یا قطره‌های آب (نم) بسیار کوچک (در مقایسه با طول موج) باشد، پراکندگی ناشی از وجود آنها نیز از قانونی شبیه به قانون پراکندگی رابلی تبعیت می‌کند، یعنی امواج کوتاه به مقدار بیشتر پراکنده می‌شوند. در این موارد، خورشید در حال طلوع و غروب ممکن است کاملاً قرمز باشد. ابرهای موجود در آسمان نیز به رنگ قرمز هستند. این مطلب رنگ زیبای قرمز سیر سپیده‌دم و شامگاه را توضیح می‌دهد.



شکل ۳۱۹. برای بیان رنگ قرمز ماه یا خورشید و به هنگام طلوع ماه (سپیده‌دم) و غروب ماه (شامگاه):  $S_1$  - جسم آسمانی در سراسو (سمت الرأس) قرار دارد، که با کوتاهترین طول مسیر (AB) در جو متناظر است و  $S_2$  - جسم آسمانی در افق است، که با بلندترین طول مسیر (CB) در جو متناظر است.

هرگاه نور چراغی را از ظرفی که شامل مایع کدر، یعنی مایعی که شامل ذرات معلق است (برای مثال آب با چند قطره شیر)، عبور دهیم تغییر رنگ بر اثر پراکندگی را می‌توانیم مشاهده کنیم (شکل ۳۲۰). پرتوهایی که به اطراف منتشر می‌شوند (پرتوهای پراکنده شده) نسبت به نور خود چراغ رنگ آبی سیرتری دارند. هرگاه عمق مایع کدر به قدر کافی زیاد باشد، نوری که از ظرف عبور می‌کند قسمت عمده پرتوهای با طول موج کوتاه (آبی و بنفش) را از دست می‌دهد و به رنگ نارنجی و حتی قرمز در می‌آید.

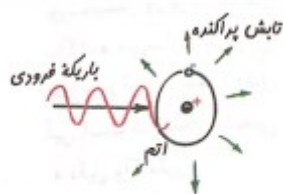
## چرا آسمان آبی است

تمام رنگ‌ها حاصل جمع و تفریق نور نیستند. برخی رنگ‌ها، مثل آبی آسمان، حاصل پراکندگی گزینشی‌اند. مورد مشابه صوت را در نظر بگیرید: اگر باریکه صوتی با بسامد خاص را به طرف دیپازونی با همان بسامد هدایت کنیم، دیپازون به ارتعاش درمی‌آید و باریکه را در جهت‌های مختلف گسیل می‌کند. دیپازون صوت را پراکنده می‌سازد. فرایند مشابهی در پراکندگی نور از اتم‌ها و ذراتی رخ می‌دهد که، مانند ذرات موجود در جو، از هم دورند.<sup>۱</sup> از شکل ۲۷-۲ به یاد می‌آوریم که اتم‌ها مثل دیپازون‌های اپتیکی کوچک‌اند و نوری را که به آنها می‌تابد بازگسیل می‌دارند. مولکول‌ها و مجموعه‌های بزرگ‌تر اتم‌ها هم همین کار را می‌کنند. هر چه ذره ریزتر باشد، مقدار نور پراکنده‌ای که بازگسیل خواهد کرد بیشتر است. این درست مثل به صدا درآمدن زنگ‌هاست که در آن زنگ‌های کوچک با نت‌هایی بالاتر از زنگ‌های بزرگ طنین‌انداز می‌شوند. مولکول‌های نیتروژن و اکسیژن که بخش اعظم جو را تشکیل می‌دهند مثل زنگ‌های کوچکی هستند که وقتی از نور خورشید انرژی بگیرند با بسامدهای بالاتری «طنین‌انداز می‌شوند». نور بازگسیل شده نیز، مثل صدای زنگ‌ها، در تمام جهت‌ها گسیل می‌شود. وقتی نور در تمام جهت‌ها گسیل شود، می‌گوییم پراکنده شده است.

نیتروژن و اکسیژن جو نور بنفش را بیشتر از دیگر بسامدهای مرئی نور خورشید پراکنده می‌سازند، پس از آن به ترتیب آبی، سبز، زرد، نارنجی، و قرمز قرار دارند. قرمز فقط یک‌دهم بنفش پراکنده می‌شود. گرچه نور بنفش بیش از آبی پراکنده می‌شود، اما چشمان ما به نور بنفش چندان حساس نیستند. در نتیجه، نور آبی پراکنده شده برای ما بارزتر است و آسمان را آبی می‌بینیم.

آبی آسمان در مکان‌های گوناگون و در شرایط متفاوت تغییر می‌کند. یک عامل مهم مقدار بخار آب موجود در جو است. در روزهای خشک که هوا صاف باشد، آبی آسمان تیره‌تر از روزهای صاف با رطوبت زیاد است. در مکان‌هایی که جو بالایی فوق‌العاده خشک باشد، مثل ایتالیا و یونان، زیبایی آسمان آبی قرن‌ها الهام‌بخش نقاشان بوده است. جایی که جو حاوی مقدار زیادی ذرات گرد و غبار و ذراتی بزرگ‌تر از مولکول‌های اکسیژن و نیتروژن باشد، بسامدهای کمتر نور هم به شدت پراکنده می‌شوند. این سبب می‌شود که آسمان کمتر آبی باشد و سفید رنگ

۱. این نوع پراکندگی که به پراکندگی ریلی (Rayleigh Scattering) معروف است هنگامی رخ می‌دهد که ذرات پراکنده بسیار کوچک‌تر از طول موج نور فرودی باشند و بسامدهای تشدید بالاتری از نور پراکنده داشته باشند. موضوع پراکندگی بسیار پیچیده‌تر از این برخورد ساده با آن در اینجا است.



شکل ۱۵-۲۷

باریکه نور بر اتمی فرود می‌آید و حرکت ارتعاشی الکترون‌های آن را زیاد می‌کند. الکترون‌های مرتعش نور را در جهت‌های مختلف بازگسیل می‌دارند. نور پراکنده شده است.



شکل ۱۶-۲۷

در هوای پاک، پراکندگی نور پر بسامد آسمان را آبی می‌سازد. وقتی هوا پر از ذراتی بزرگتر از مولکول‌ها باشد، بسامدهای پایین‌تر نور نیز پراکنده می‌شوند، که به این آبی اضافه می‌شود و آسمان را سفید رنگ می‌سازد.

شکل ۱۷-۲۷

پره‌های جی‌جاغ آبی رنگدانه آبی ندارند. بلکه در کُرک‌های پره‌پاش سلول‌های لثوی (alveolar) کوچکی دارد که نور—بیشتر نور پر بسامد—را پراکنده می‌سازد. بنابراین جی‌جاغ آبی به همان دلیل آبی است که آسمان—یعنی به دلیل پراکندگی.

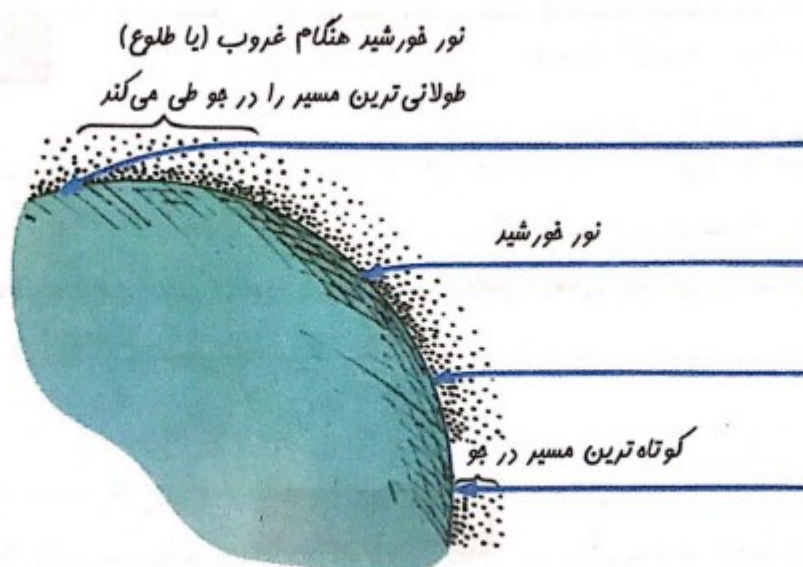


به نظر برسد. پس از رگباری شدید که ذرات را می‌شوید و همراه می‌برد، آبی آسمان تیره‌تر به نظر می‌رسد.

غبار خاکستری آسمان شهرهای بزرگ در نتیجه وجود ذراتی است که از کارخانه‌ها و موتور اتومبیل‌ها و کامیون‌ها خارج می‌شود. موتور اتومبیل، حتی وقتی در جا کار کند، بیش از ۱۰۰ میلیارد ذره در ثانیه گسیل می‌کند. بیشتر این ذرات نامرئی‌اند، ولی به شکل هسته‌هایی عمل می‌کنند که ذرات دیگر به آن می‌چسبند. این ذرات پراکنده‌های اصلی نور کم‌بسامدند. بزرگ‌ترین این ذرات به جای پراکنده ساختن نور آن را جذب می‌کنند، و غباری قهوه‌ای رنگ به وجود می‌آورند. چه بد!

## چرا غروب خورشید سرخ است

نوری که پراکنده نشود نوری است که تراگسیل می‌شود. چون قرمز، نارنجی، و زرد نورهایی هستند که در جو کمترین پراکندگی را دارند، این نورهای کم‌بسامد بهتر از جو عبور می‌کنند. قرمز با کمترین پراکندگی—و در نتیجه بیشترین تراگسیل—بیشتر از هر رنگ دیگری از جو می‌گذرد. بنابراین، هر چه جوی که باریکه نور خورشید از آن می‌گذرد ضخیم‌تر باشد، مؤلفه‌های پر بسامد نور در عبور از آن بیشتر پراکنده می‌شوند. این به معنی عبور بهتر نور قرمز از آن است. همان‌طور که شکل ۱۸-۲۷ نشان می‌دهد، نور خورشید هنگام غروب از جو ضخیم‌تری می‌گذرد و به همین دلیل غروب (و طلوع) آفتاب سرخ است.



شکل ۲۷-۱۸

تصویر تعاملی

باریکه نور خورشید هنگام غروب باید مسافتی بیش از مسافت ظهر را در جو طی کند. در نتیجه، نور آبی پراکنده شده از آن بیشتر از ظهر می‌شود. وقتی باریکه‌ای که در ابتدا سفید است به زمین می‌رسد، فقط نورهای کم‌بسامد برای تولید غروب سرخ در آن باقی می‌مانند.

هنگام ظهر، نور خورشید برای رسیدن به سطح زمین از نازک‌ترین جو عبور می‌کند. فقط مقدار کمی از نور پُر بسامد خورشید پراکنده می‌شود، در نتیجه خورشید زرد رنگ به نظر می‌رسد. در ساعت‌های پایانی روز که خورشید در آسمان پایین می‌رود، مسیر نور خورشید در جو طولانی‌تر می‌شود، و نورهای بنفش و آبی آن بیشتر پراکنده می‌شوند. حذف بنفش و آبی نور تراگسیلیده را سرخ‌تر می‌سازد. خورشید با گذر از زرد به نارنجی و سپس نارنجی به قرمز هنگام غروب به تدریج سرخ‌تر می‌شود. طلوع و غروب‌های خورشید پس از فوران‌های آتشفشانی معمولاً رنگارنگ‌تر می‌شود، زیرا هوا مملو از ذراتی بزرگ‌تر از مولکول‌های جو است.<sup>۱</sup>

رنگ‌های غروب خورشید با قاعده‌های مخلوط شدن رنگ ما سازگارند. وقتی آبی از نور سفید کم شود، رنگ مکمل باقیمانده زرد است. وقتی بنفش با بسامد بالاتر از آن کم شود، رنگ مکمل حاصل نارنجی است. وقتی سبز با بسامد متوسط از آن کم شود، سرخابی باقی می‌ماند. ترکیب رنگ‌های حاصل برحسب اوضاع جوی در روزهای مختلف تغییر می‌کند، و غروب‌های خورشید متفاوتی را در اختیارمان می‌گذارد تا از آنها لذت ببریم.

۱. وقتی هوا مملو از ذراتی بزرگ‌تر از مولکول‌های جو باشد، معمولاً طلوع و غروب‌ها رنگارنگ‌تر می‌شود. این پدیده جهانی سه سال پس از فوران آتشفشان کراکاتوا (Krakatau)، در اندونزی امروزی، در سال ۱۸۸۳، اتفاق افتاد که ذراتی با ابعاد میکرومتری بسیاری بیرون ریختند و در سراسر جو زمین پخش شدند. همین پدیده با شدت کمتر پس از فوران کوه پیناتوبو (Pinatubo) در فیلیپین به وقوع پیوست. بعدی؟

## چرا ابرها سفیدند

ابرها از قطره‌های آب با اندازه‌های مختلف تشکیل شده‌اند. اندازه‌های متفاوت این قطره‌ها سبب پراکندگی بسامدهای گوناگون می‌شود: کوچک‌ترین قطره رنگ آبی را بیش از دیگر رنگ‌ها پراکنده می‌سازند؛ قطره‌های اندکی بزرگ‌تر بسامدهای بالاتر، مانند رنگ سبز را پراکنده می‌کنند؛ و قطره‌های باز هم درشت‌تر بیشتر رنگ قرمز را پراکنده می‌سازند. نتیجه روی هم رفته ابری سفید است. الکترون‌های نزدیک به هم در یک قطره با هم و همگام ارتعاش می‌کنند، که باعث می‌شود شدت نور پراکنده بیشتر از وقتی باشد که الکترون‌ها جداگانه به ارتعاش درمی‌آیند. در نتیجه ابرها روشن‌اند! مجموعه‌های بزرگ‌تر قطره‌ها نور فرودی بیشتری را جذب می‌کنند و در نتیجه شدت نور پراکنده از آنها کمتر است که باعث تیرگی ابرهای متشکل از قطره‌های بزرگ‌تر می‌شود. بزرگ‌تر شدن قطره‌ها باعث می‌شود به شکل قطره‌های باران فروبریزند، و بارندگی خواهیم داشت.

دفعه بعدی که مشغول تحسین آسمان آبی در هوای خشک یا لذت بردن از شکل‌های مختلف ابرهای روشن هستید، یا به منظره غروب خورشید نگاه می‌کنید، به فکر تمام دیاپازون‌های اپتیکی بسیار ریزی باشید که در دوردست‌ها ارتعاش می‌کنند—و از شگفتی‌های روزمره طبیعت بیشتر لذت ببرید!

## چرا آب آبی مایل به سبز است

اغلب وقتی به سطح دریاچه یا اقیانوسی می‌نگریم رنگ آبی تیره‌ی زیبایی را مشاهده می‌کنیم. اما این رنگ آب نیست؛ بلکه بازتاب رنگ آسمان است. رنگ خود آب را می‌توانید با نگاه کردن به تکه ماده سفید زیر آب مشاهده کنید، که آبی کم رنگ مایل به سبز است.

اگر چه آب برای نور در تمام بسامدهای مرئی تقریباً شفاف است، اما امواج فروسرخ را به شدت جذب می‌کند. زیرا مولکول‌های آب در بسامدهای فروسرخ به تشدید درمی‌آیند. انرژی امواج فروسرخ به انرژی داخلی آب تبدیل می‌شود، که دلیل گرم شدن آب بر اثر تابش نور خورشید است. مولکول‌های آب با نور سرخ مرئی نیز تا اندازه‌ای به تشدید درمی‌آیند که باعث می‌شود نور قرمز اندکی بیشتر از نور آبی در آب جذب شود. در عمق ۱۵ متری آب روشنایی نور قرمز به



یک چهارم مقدار اولیه اش می رسد. در نور خورشیدی که به عمق ۳۰ متری آب نفوذ کرده است نور سرخ بسیار کمی وجود دارد. وقتی قرمز از نور سفید حذف شود، چه رنگی باقی می ماند؟ این پرسش را می توان به صورت دیگری نیز مطرح کرد: مکمل رنگ قرمز چیست؟ فیروزه ای مکمل آن است—یعنی آبی مایل به سبز. در آب دریا، هر چیزی در این اعماق فیروزه ای رنگ است. بسیاری از خرچنگ ها و دیگر موجودات دریایی که در آب عمیق سیاه به نظر می رسند در سطح آب قرمزند. رنگ سیاه و قرمز در این اعماق یکسان به نظر می آیند. ظاهراً سازوکار گزینشی تکامل امکان تشخیص سیاه از قرمز در عمق اقیانوس را نداشته است.

در حالی که رنگ آبی مایل به سبز آب ناشی از جذب گزینشی نور است، رنگ آبی فوق العاده درخشان دریاچه های کوه های راکی کانادا ناشی از پراکندگی است.<sup>۱</sup> آب ناشی از ۱. پراکندگی از ذرات کوچک و با فاصله زیاد در عنبر چشم های آبی، و نه رنگدانه ها، رنگ آنها را به وجود می آورد. جذب در رنگدانه ها باعث رنگ قهوه ای چشم ها می شود.



شکل ۲۷-۴۰

آب فیروزه ای است زیرا نور قرمز را جذب می کند. کف امواج سفیدند زیرا، مثل ابرها، از قطره های ریز آب با اندازه های مختلف تشکیل شده اند که پسماندهای مرئی نور را پراکنده می سازند.



شکل ۲۷-۲۱

رنگ آبی شگفت آور دریاچه های کوه های راکی کانادا از پراکندگی نور ذرات معلق بسیار ریز گل ولای یخچال ها به وجود می آید.

ذوب شدن یخچال هایی که وارد این دریاچه ها می شود حاوی ذرات ریز گل ولای، موسوم به آرد سنگ، است که در آب معلق می مانند. نور از این ذرات ریز پراکنده می شود و به آب رنگ درخشان اسرارآمیزی می دهد (شکل ۲۷-۲۱). (به گردشگرانی که از این دریاچه ها عکس می گیرند توصیه می شود به کسانی که عکس ها را ظاهر می کنند بگویند رنگ ها را به رنگ آبی «واقعی» دریاورند!)

جالب آنکه رنگی که می بینیم مربوط به دنیای اطراف ما نیست—بلکه این سرهای ماست. جهان پر از هم آمیزی ارتعاش ها، یعنی امواج الکترومغناطیسی، است که هنگام برهم کنش با شاخک های گیرنده مخروطی شکل شبکیه چشممان ما احساس رنگ را به وجود می آورند. چقدر خوب است که برهم کنش های چشم—مغز رنگ های زیبایی را تولید می کنند که می بینیم.

## رنگین کمان‌ها

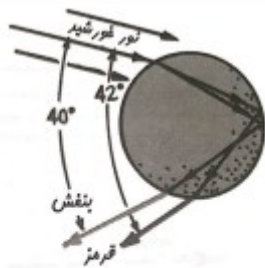
تماشایی‌ترین مورد پاشندگی در رنگین‌کمان به چشم می‌خورد. برای دیدن رنگین‌کمان، خورشید باید در یک بخش از آسمان باشد و قطره‌های آب موجود در ابر یا بارانی که فرومی‌ریزد در بخش مقابل آن قرار داشته باشند. وقتی پشت به خورشید قرار بگیریم، طیف رنگ‌ها را به صورت کمان مشاهده می‌کنیم. در نیمروز منظره این کمان از هواپیما به صورت دایره کامل دیده می‌شود. اگر زمین مانعی بر سر راه نور نبود، تمام رنگین‌کمان‌ها کاملاً گرد بودند.

رنگ‌های زیبای رنگین‌کمان را میلیون‌ها قطره ریزکروی به وجود می‌آورند که در مقابل نور خورشید نقش منشور را بازی می‌کنند. این موضوع را می‌توان با بررسی یک قطره، مطابق شکل ۲۸-۳۰، بهتر فهمید. پرتو نور خورشید را از زمانی دنبال کنید که از سطح بالایی قطره وارد آن می‌شود. در اینجا بخشی از نور (که نشان داده نشده) باز می‌تابد، و بقیه با شکسته شدن وارد آب می‌شوند. در شکست اول، نور به رنگ‌های مختلف طیف تجزیه می‌شود، بنفش بیشتر و قرمز کمتر از همه منحرف می‌شود. با رسیدن به طرف دیگر قطره، بخشی از هر رنگ با شکسته شدن وارد هوا می‌شود (نشان داده نشده) و بخشی دیگر در آب باز می‌تابد. با رسیدن به سطح پایینی قطره، هر رنگ دوباره باز می‌تابد (که نشان داده نشده) و با شکسته شدن وارد هوا می‌شود. شکست دوم مانند شکست در منشور است که در آن شکست در سطح دوم پاشیدگی حاصل از شکست در سطح اول را زیاد می‌کند.

در واقع دو شکست و یک بازتاب باعث می‌شود که زاویه‌ای بین صفر و حدود  $42^\circ$  بین پرتوهای ورودی و خروجی به وجود آید ( $0^\circ$  نظیر تغییر جهت کامل نور در  $180^\circ$  است). با این همه، نور حوالی زاویه بیشینه  $42^\circ$  به شدت متراکم می‌شود. یعنی آنچه در شکل ۲۸-۳۰ نشان داده شده است.

گرچه هر قطره طیف کامل رنگ‌ها را به وجود می‌آورد، ناظر در موقعیتی است که فقط نور متمرکز تک‌رنگی را از هر قطره مشاهده می‌کند (شکل ۲۸-۳۱). اگر نور بنفش از قطره‌ای به چشم ناظری برسد، نور قرمز این قطره جایی در نزدیکی پای او فرود می‌آید. برای دیدن نور قرمز، باید به قطره‌ای نگاه کرد که در آسمان بالاتر است. رنگ قرمز وقتی دیده می‌شود که زاویه بین باریکه نور خورشید و نوری که از قطره گسیل می‌شود  $42^\circ$  باشد. نور بنفش وقتی دیده می‌شود که زاویه پرتوهای آفتاب و نور منحرف‌شده  $40^\circ$  باشد.

چرا نور پراکنده‌شده از قطره‌های باران کمان تشکیل می‌دهند؟ در پاسخ این پرسش اندکی استدلال هندسی دخیل است. اولاً، رنگین‌کمان کمان دوعبدي مسطحی نیست که به نظر می‌رسد، بلکه به همان دلیلی تخت به نظر می‌رسد که فوران کروی وسایل آتش‌بازی در آسمان به شکل

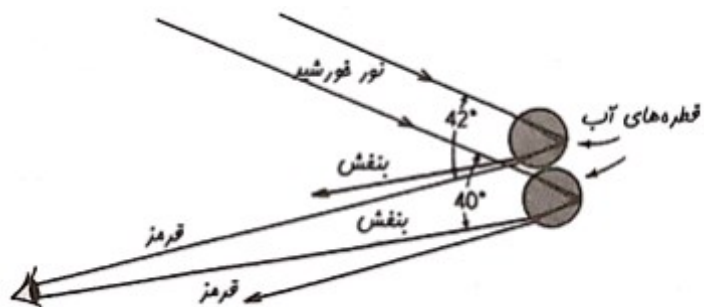


شکل ۲۸-۳۰

پاشیدگی نور خورشید در یک قطره باران.

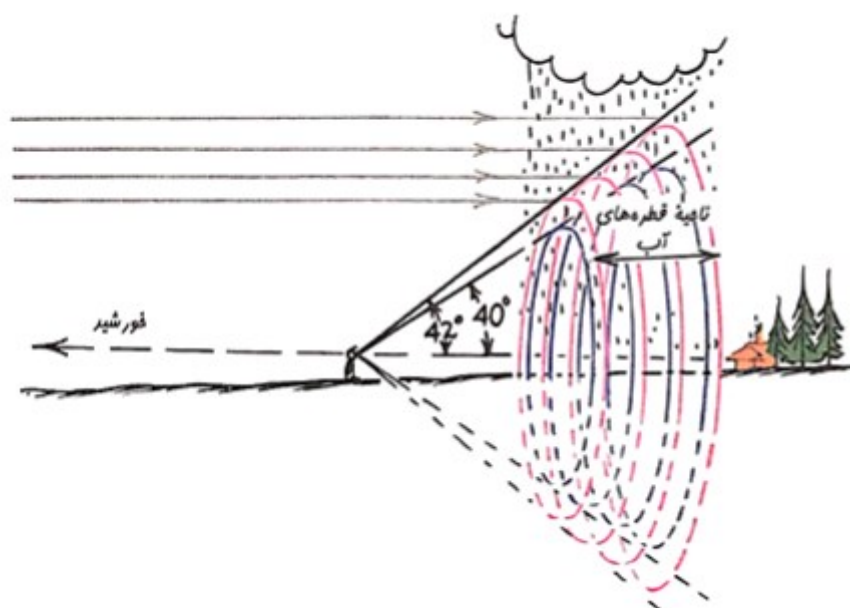
شکل ۲۸-۳۱

نور خورشید که مطابق شکل بر دو نمونه قطره باران فرود آمده است، پس از تجزیه، از آنها خارج می‌شود. ناظر نور قرمز قطره بالایی و نور بنفش قطره پایینی را می‌بیند. میلیون‌ها قطره تمام طیف نور مرئی را تولید می‌کنند.



شکل ۲۸-۳۲

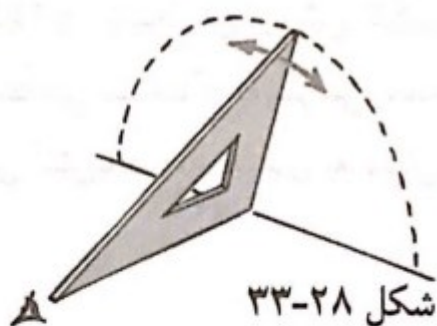
وقتی چشم شما بین خورشید (که در اینجا نشان داده نشده) و ناحیه‌ای حاوی قطره‌های آب باشد، رنگین‌کمانی که می‌بینید لبه مخروطی سه‌بعدی است که در این ناحیه امتداد یافته است. (لایه‌های بی‌شمار قطره‌های آب کمان‌های دوبعدی بی‌شماری تشکیل می‌دهند که چهار کمان در اینجا نشان داده شده است.)



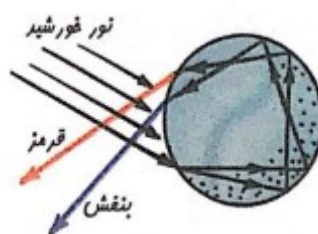
قرص ظاهر می‌شوند—یعنی به واسطه نداشتن سرخ‌هایی در مورد فاصله، رنگین‌کمانی که مشاهده می‌کنید در واقع مخروطی سه‌بعدی است که رأس آن در محل چشم شماست (شکل ۲۸-۳۲). لیوان شیشه‌ای مخروطی شکلی را، به شکل قیف کاغذی [لیوان‌های یک‌بار مصرف] که اغلب در آب‌خوری‌ها می‌بینید، در نظر بگیرید. اگر نوک آن را مقابل چشم خود بگیرید، چه می‌بینید؟ لیوان را به شکل دایره می‌بینید. رنگین‌کمان هم همین‌طور است. همه قطره‌هایی که نور رنگین‌کمان را به طرف شما می‌پراکنند در مخروطی قرار دارند—مخروطی با لایه‌های مختلف که در آن لایه‌های خارجی نور قرمز را به طرف شما می‌پراکنند، نارنجی زیر قرمز، زرد زیر نارنجی، و به همین ترتیب تا آخر، تا به بنفش می‌رسیم که در سطح داخلی مخروط است. هر چه ناحیه حاوی قطره‌های آب ضخیم‌تر باشد، لبه مخروطی که می‌بینید ضخیم‌تر و رنگ‌های رنگین‌کمان درخشان‌ترند.

برای مشاهده دقیق‌تر، فقط انحراف نور قرمز را در نظر بگیرید. وقتی زاویه بین پرتوهای فرودی خورشید و پرتوهای پراکنده  $42^\circ$  باشد قرمز را می‌بینید. البته، باریکه  $42^\circ$  از تمام قطره‌ها در سراسر آسمان و در تمام جهت‌ها پراکنده می‌شوند—به بالا، به پایین، و به اطراف. اما تنها نور قرمزی که شما می‌بینید از قطره‌هایی است که در مخروطی قرار دارند که زاویه بین یال و محور آن  $42^\circ$  است. چشم شما، مطابق شکل ۲۸-۳۳، در رأس این مخروط قرار دارد. برای دیدن بنفش، باید در زاویه  $40^\circ$  از محور مخروط نگاه کنید (طوری که ضخامت مخروط شیشه‌ای

برای مشاهده دقیق‌تر، فقط انحراف نور قرمز را در نظر بگیرید. وقتی زاویه بین پرتوهای فرودی خورشید و پرتوهای پراکنده  $42^\circ$  باشد قرمز را می‌بینید. البته، باریکه  $42^\circ$  از تمام قطره‌ها در سراسر آسمان و در تمام جهت‌ها پراکنده می‌شوند—به بالا، به پایین، و به اطراف. اما تنها نور قرمزی که شما می‌بینید از قطره‌هایی است که در مخروطی قرار دارند که زاویه بین یال و محور آن  $42^\circ$  است. چشم شما، مطابق شکل ۲۸-۳۳، در رأس این مخروط قرار دارد. برای دیدن بنفش، باید در زاویه  $40^\circ$  از محور مخروط نگاه کنید (طوری که ضخامت مخروط شیشه‌ای



فقط قطره‌های باران در امتداد خط‌چین نور قرمز را با زاویه  $42^\circ$  به طرف ناظر می‌پراکنند؛ بنابراین نور کمائی تشکیل می‌دهد.



شکل ۲۸-۳۴

دو شکست و یک بازتاب در قطره‌های ریز آب، نوری را در تمام زاویه‌های تا حدود  $42^\circ$  تولید می‌کند، که شدت آن در محلی متمرکز است بین  $40^\circ$  تا  $42^\circ$  که رنگین‌کمان را می‌بینیم. هیچ نوری با زاویه بیش از  $42^\circ$  از زیر قطره خارج نمی‌شود مگر آنکه دوبار یا بیشتر درون قطره بازتابد. بنابراین آسمان داخل رنگین‌کمان از بیرون آن پر نورتر است. به رنگین‌کمان ثانویه ضعیف سمت راست رنگین‌کمان اول توجه کنید.

شکل ۲۸-۳۵

دوبازتاب در قطره یک کمان ثانویه به وجود می‌آورد.

پاراگراف قبل کمتر شود—نوک آن خیلی نازک و با زیاد شدن فاصله از نوک ضخامت آن بیشتر شود).

محل برخورد مخروط دید شما با ابری از قطره‌ها رنگین‌مانی به وجود می‌آورد که با رنگین‌کمان کسی که در کنار شماست فرق دارد. وقتی دوستان می‌گویند، «به این رنگین‌کمان زیبا نگاه کن» می‌توانید به او بگویید «خیلی خوب، برو کنار تا من هم بتوانم آن را ببینم». هر کسی رنگین‌کمان خاص خودش را می‌بیند.

واقعیتی دیگر در مورد رنگین‌کمان‌ها: به علت نداشتن سرخ‌هایی در مورد فاصله که قبلاً ذکر شد، رنگین‌کمان همواره درست مقابل شما قرار می‌گیرد. وقتی حرکت می‌کنید، رنگین‌کمانتان هم با شما حرکت می‌کند. بنابراین، هرگز نمی‌توان به لبه رنگین‌کمان نزدیک شد، یا انتهای آن را، مثل تصویر اغراق‌آمیز شکل ۲۸-۳۲، دید. نمی‌توان به انتهای آن رسید. بنابراین عبارت «جستجوی جامی از طلا در انتهای رنگین‌کمان» به معنی دنبال کردن چیزی است که هرگز نمی‌توان به آن رسید.

اغلب می‌توان کمان ثانویه بزرگ‌تری را دید (شکل ۲۸-۳۴). که ترتیب رنگ‌هایش وارون شده‌اند و با زاویه بزرگ‌تری دور کمان اولیه قوس زده است. در اینجا به این کمان ثانویه نمی‌پردازیم بجز اینکه بگوییم مانند کمان اولیه تشکیل می‌شود و پیامد بازتاب دوگانه در قطره‌های باران است. به واسطه بازتاب اضافی (و اتلاف ناشی از شکست اضافی)، کمان دوم بسیار کم‌نورتر، و ترتیب رنگ‌هایش برعکس است.