و. فابریکانت

برگردان: پرویز شهریاری

از تاریخ دانش و فن

● شیشه‌ی سبز و معمای رنگ‌ها

لحظه‌هایی را دوست دارم که آتش سبز روی درختان، در حرکت است.

س. یسنین

۱. شیشه‌ی سبز چه رنگی دارد؟

از این پرسش شگفت‌زده نشوید، گره به‌ابرو نیندازید و تلاش نکنید بگویید: خوب، این که معلوم است؛ شیشه‌ی سبز را به‌این دلیل سبز گویند که...

شتاب نکنید، چه بسا توضیح شما نوعی سرهم‌بندی باشد. آزمایشی ساده که شما را گول نمی‌زند، نشان می‌دهد، پاسخ به‌این پرسش که «شیشه‌ی سبز چه رنگ است»، آن قدرها هم که تصور می‌کنید، ساده نیست. تکه‌ای شیشه‌ی سبز بردارید و آن را با احتیاط بشکنید و به‌چند تکه‌ی نه چندان کوچک بخش کنید. بعد، از درون یکی از این تکه‌ها، به‌رشته‌ی لامپ سیم برق نگاه کنید. همان گونه که انتظار دارید، رشته‌ی سیم برق را سبز می‌بینید. اکنون تکه‌ی دیگری از شیشه‌ی سبز را روی اولی بگذارید و از درون هر دوی آن‌ها، به‌رشته نگاه کنید. به‌احتمال زیاد، متوجه اندک تغییری که در رنگ پدید می‌آید، نمی‌شوید و رشته را همچون حالت پیشین، به‌رنگ سبز می‌بینید.

ولی اگر تکه‌ی سوم را روی دو تکه‌ی پیشین قرار دهید و از پشت هر سه شیشه، به‌رشته‌ی سیم لامپ برق نگاه کنید، دیگر آن را سبز نمی‌بینید: رشته بی‌رنگ و مایل به‌سفید دیده می‌شود.

از پشت چهار تکه، رشته را به‌رنگی مایل به‌قرمز و از پشت پنج تکه مایل به‌یاقوتی ـ سرخ می‌بینید، درست شبیه زمانی که از پشت شیشه‌ی قرمز به‌رشته نگاه کنید.

نتیجه‌ی آزمایش قابل پیش‌بینی نبود و به‌همین جهت، آموزنده است. معلوم می‌شود رنگ شیشه، بستگی به‌ضخامت آن دارد و هرگاه کلفتی شیشه را به‌اندازه‌ی کافی زیاد کنیم، رنگ سبز نخستین (که برای شیشه‌ی نازک وجود داشت)، به‌رنگ قرمز تبدیل می‌شود. البته هر شیشه‌ی سبزی این ویژگی را ندارد، ولی رایج‌ترین نوع شیشه‌ی سبز، که در ضمن ارزان‌ترین آن‌هاست، دارای این ویژگی است.

جالب است که محلول مهم‌ترین ماده‌ی رنگی موجود در سیاره‌ی زمین، یعنی سبزینه (کلروفیل) هم، همین ویژگی را دارد.

می‌دانیم، سبزینه موجب سبزی رنگ برگ گیاهان است. با قرار دادن برگ‌ها در الکل، می‌توان محلول سبزینه را به‌دست آورد.

لیوانی را روی صفحه‌ی کاغذ سفیدی می‌گذاریم و به‌آرامی محلول سبزینه را در آن می‌ریزیم. در آغاز ته لیوان به‌رنگ سبز در می‌آید و سپس، وقتی ارتفاع محلول زیاد شود، محلول به‌رنگ قرمز تیره‌ای درمی‌آید. اکنون دیگر خواننده قانع می‌شود که این پدیده، تصور ساده‌ای را که از رنگ چیزها داشتیم، به‌کلی به‌هم می‌زند.

به‌شیشه‌ی سبز برگردیم. اگر می‌خواهید، پرسش مربوط به‌رنگ شیشه پیچیده‌تر شود، به‌جای رشته‌های لامپ برق، از پشت تکه‌های شیشه، به‌انتهای سرخ سیخ

بخاری که با آتش داغ شده است، نگاه کنید. انتهای سیخ بخاری، از پشت سه تکه‌ی شیشه، به‌رنگ یاقوتی قرمز دیده می‌شود. و این هم نتیجه‌ای نامنتظر است: رنگ ظاهری شیشه، به‌جز ضخامت خود شیشه، به‌جسم درخشانی که از پشت شیشه به آن نگاه می‌کنیم، بستگی دارد. وقتی شیشه شامل سه لایه باشد، رشته‌ی روشن لامپ برق، بی‌رنگ و انتهای سیخ بخاری، قرمز رنگ دیده می‌شود.

با سیخ بخاری آزمایش دیگری هم می‌توان انجام داد، که ما را به‌نتیجه‌ی مهم دیگری می‌رساند. سیخ را وقتی از کوره یا بخاری بیرون بیاوریم، به‌سرعت سرد می‌شود. مشاهده‌ی انتهای سیخ را، از پشت شیشه، تا زمان سرد شدن سیخ ادامه می‌دهیم. همان گونه که گفتیم، وقتی تازه از درون آتش درآمده است، از پشت شیشه‌ی سه لایه، به‌رنگ قرمز دیده می‌شود. وقتی انتهای سیخ اندکی سرد شود، از پشت شیشه‌ی دولایه هم، قرمز رنگ به‌نظر می‌رسد و اگر باز هم اندکی صبر کنیم، حتا با یک تکه شیشه‌ی سبز رنگ هم، می‌توان انتهای سیخ را قرمز رنگ دید.

ایزاک نیوتن (۱۶۴۳ ـ ۱۷۲۷ م)، اخترشناسی، فیزیک‌دان، ریاضی‌دان و فیلسوف انگلیسی که توانست نور خورشید را به یاری منشور به‌رنگ‌های طیف تجزیه کند.

از این آزمایش‌ها نتیجه می‌گیریم که هرچه درجه‌ی حرارت جسم ملتهب بیش‌تر باشد، باید قطر شیشه را بیش‌تر گرفت تا تغییر رنگ انجام شود. از روی قطر شیشه‌ای که برای تغییر رنگ لازم است، می‌توان درباره‌ی درجه‌ی حرارت جسم ملتهب داوری کرد. در آزمایش‌هایی که با سیخ بخاری انجام دادیم، ضخامت شیشه با جهش‌های بزرگی تغییر می‌کرد، و بنابراین، تنها می‌توانستیم به‌تغییرهای بزرگ درجه‌ی حرارت توجه کنیم.

با استفاده از همین آزمایش‌های مربوط به‌سیخ بخاری، وسیله‌ی دقیق و ساده‌ای ساخته‌اند که برای تعیین درجه‌ی حرارت جسم ملتهب به‌کار می‌رود و به آن «کُوه‌ی آذرسنج» گویند.

کُوه‌ی آذرسنج عبارت است از باریکه‌ای از شیشه‌ی سبز که ضخامت آن از یک طرف به‌طرف دیگر، زیادتر می‌شود. کُوه روی یک محور فلزی حرکت می‌کند که سوراخی برای مشاهده‌ی جسم ملتهب دارد. در کناره‌ی کُوه، درجه‌ی حرارت مشخص شده است. در ضمن، درجه حرارت، از انتهای نازک به‌طرف انتهای ضخیم، افزایش می‌یابد. سوراخ محور را روی جسم ملتهب قرار می‌دهند و کُوه را روی محور آن قدر جابه‌جا می‌کنند که تغییر رنگ جسم ظاهر شود. آن‌گاه درجه‌ی حرارت جسم را روی کناره‌ای که به‌محور متصل است، می‌خوانند.

کُوه‌ی آذرسنج به‌ویژه برای تعیین درجه‌ی حرارت فلزگداخته، مانند کوره‌ی زیمنس ـ مارتن به‌کار می‌رود. کُوه آذرسنج، با همه‌ی سادگی خود، وسیله‌ی بسیار دقیقی برای آزمایش‌گر به‌شمار می‌رود.

با شیوه‌ی عملِ وسیله‌ی بسیار جالبی که براساس ویژگی شیشه‌ی سبز ساخته شده است، آشنا شدیم، ولی معمای خود شیشه‌ی سبز همچنان باقی است.

۲. آزمایش نیوتُن و نقاشی دورنما

هر دانش‌آموز سال‌های بالای دبیرستان، با آزمایش مشهور نیوتُن آشنا است که توانست نور خورشید را به‌یاری منشور شیشه‌ای، به‌صورت طیفی با رنگ‌های مختلف تجزیه کند. نیوتُن نشان داد که نور خورشید ترکیبی از رنگ‌های مختلف است: قرمز، نارنجی، زرد، سبز، آبی، نیلی و بنفش. چرا در مسیر پرتوهای خورشید، شیشه‌ی رنگی یا ظرفی پر از مایع رنگی قرار نداد؟ چرا نیوتُن، برای پیچیده‌تر کردن آزمایش خود، هیچ تلاشی نکرد؟ در سراسر کتاب «اُپتیک»، نیوتن، به‌چنین تلاشی برنمی‌خوریم.

آزمایش با شیشه‌ی قرمز، چیز جالبی به‌ما نمی‌دهد. به‌جای نوارهای رنگی طیف، تنها لکه‌هایی دیده می‌شود و تنها نوار قرمز به‌جای خود باقی می‌ماند. این نتیجه، از پیش هم پیش‌بینی می‌شد: شیشه‌ی قرمز به‌این دلیل قرمز است که تنها نور قرمز را از خود عبور می‌دهد و نورهای دیگر را به‌خود جذب می‌کند.

جالب‌ترین نتیجه را می‌توان با شیشه‌ی سبز، یا ظرفی که پر از محلول سبزینه است، به‌دست آورد. در این حالت، به‌جای یک نوار، دو نوار طیف باقی می‌ماند: سبز و قرمز تیره. و این، به‌معنای آن است که شیشه‌ی سبز و محلول سبزینه، نه تنها نور سبز بلکه نور قرمز را هم از خود می‌گذراند.

ک. آ. تی می ریازوف، گیاه‌شناس معروف روسی، درباره‌ی سبزینه به‌نکته‌ی بسیار جالبی اشاره می‌کند:

«خیلی ساده می‌توان فهمید که سبزینه، نور قرمز را از خود عبور می‌دهد: زیر نور درخشان آفتاب بایستید و از پشت شیشه‌ی آبی، چشم‌انداز خود را تماشا کنید. شیشه‌ی آبی، نور قرمز و آبی را عبور می‌دهد و نور سبز را نگه می‌دارد. در برابر چشمان شگفت‌زده‌ی شما تمامی طبیعت دگرگون می‌شود: زیر آسمان آبی معمولی، گیاهان قرمز خونی رنگ را می‌بینید. آیا دشواری‌هایی که درباره‌ی نقاشی‌های دورنمایی وجود دارد، مربوط به‌همین ویژگی رنگ سبزینه نیست؟ به‌ظاهر در زمینه‌ی کار نقاشی نقاشان، چنان زمینه‌های سبزی که معرف کامل سبز روشن باشد، وجود ندارد. آیا به‌همین مناسبت نیست که نه استادان قدیمی که از «تیت سیان» پدر نقاشی منظره آغاز می‌شود، نه سالواتور روزی، نه کلودلوران، نه ریسدان و نه استادان جدیدتر، روسو، شیشکین و دیگران، برای حل این مساله ـ که به‌ظاهر حل ناشدنی است ـ یعنی تصویر سبزی روشن رستنی‌ها، تلاشی نکرده‌اند. تنها در هر نمایش گاهی که از نقاشان جوان و کم تجربه تشکیل می‌شود، به‌صورت غیرطبیعی و مصنوعی، به‌رنگ سبز مرمری برای چمن یا جنگل، برمی‌خوریم».

با همه‌ی این‌ها، اکنون نقاشی را کنار می‌گذاریم و به «کُوه‌ی آذرسنج» برمی‌گردیم. احساس می‌کنیم که سرانجام به‌راهی افتاده‌ایم که ما را به‌سمت کشف معمای رنگ سبز هدایت می‌کند.

تجربه‌ی قبل را کمی بیش‌تر شرح می‌دهیم. به‌جای خورشید به‌عنوان سرچشمه‌ی نور از لامپ برق استفاده می‌کنیم و بین آن و منشور، کُوه‌ی آذرسنج را قرار می‌دهیم. روی دیوار دوباره دو نوار می‌بینیم: سبز و قرمز؛ در ضمن نسبت روشنی این نوارها بسته به‌این که شعاع نور از کجای کُوه می‌گذرد، تغییر می‌کند. اگر شعاع نور از درون بخش نازک کُوه عبور کند، نور سبز خیلی روشن‌تر از نور قرمز است. ضمن عبور نور از درون بخش ضخیم کُوه، روشنی هر دو نوار، به‌شدت کم می‌شود، ولی نوار قرمز روشن‌تر از نوار سبز در می‌آید.

وقتی نوار سبز روشن‌تر از نوار قرمز است، رشته‌ی لامپ برق را سبز می‌بینیم، درحالی که وقتی نسبت روشنی دو نوار برعکس می‌شود، همان رشته را قرمز می‌بینیم. در حالتی که روشنی دو نوار سبز و قرمز برابر باشد، رشته‌ی لامپ برق بی‌رنگ دیده می‌شود.

به‌نظر می‌رسد، معمای شیشه‌ی سبز حل شده است. با وجود این، می‌دانیم خواننده‌ای که «به‌عمق و ریشه‌ی هر پدیده می‌نگرد»، قانع نشده باشد. بسیار خوب، به‌چنین خواننده‌ای حق می‌دهیم. در واقع وقتی «به‌ریشه رسیده‌ایم» که روشن کرده باشیم، چرا وقتی ضخامت شیشه زیاد می‌شود، نسبت روشنی نوارهای قرمز و سبز، به وارون خود تبدیل می‌شود.

خواهیم دید که پاسخ به‌این پرسش چند ده سال پیش و براساس قانون مهمی از نور، که به‌وسیله‌ی یکی از ناخدایان شجاع کشف شده بود، داده شده است.

۳. ناخدای دریاهای دور و تصاعد هندسی

پیر بوهر، ناخدای فرانسوی دریاهای دور که در نیمه‌ی نخست سده‌ی هجدهم زندگی می‌کرد، ملاح ساده‌ای نبود. او رساله‌ی مفصلی درباره‌ی ساختمان کشتی، درباره‌ی دریانوردی و دیگر رشته‌های مربوط به‌کارهای دریایی، نوشته است. در این رساله‌ها، اشاره‌ها و دستورهای عملی، به‌وسیله‌ی جمع‌بندی‌های کلی و پیچیده‌ی مورد تاکید قرار گرفته است. فرهنگستان علوم فرانسه به‌خاطر کارهای دریایی بوهر، سه جایزه به‌او داد و او را به‌عنوان عضو خود پذیرفت. بوهر عشق به‌دانش‌های دریایی را از پدر خود «ژان بوهر» استاد آب‌شناسی به‌ارث برده بود. با وجود این نباید گمان کرد که بوهر یک ملاح «پشت میزنشین» بود. وقتی بین دانشمندان انگلیسی و فرانسوی بر سر پهن یا کشیده‌بودن زمین بحث درگرفته بود، بوهر در راس یک هیات به‌پرو فرستاده شد تا استوای زمین را اندازه بگیرد.

هیات دوم به‌لاپلاند فرستاده شده بود. اندازه‌گیری بوهر درستی نظر انگلیسیان را تایید کرد. زمین، «پهن» از آب درآمد. البته، اعلام این مطلب با میهن‌دوستی بوهر جور نمی‌آمد، ولی درست بود.

پیر بوهر دریانورد فرانسوی (۱۶۹۶ ـ ۱۷۳۸)، عضو فرهنگستان علوم فرانسه، قانون کاهش نور را ضمن جذب گرما ارایه داد.

اگر بوهر، علاقه به‌دریانوردی را به‌ارث برده بود، درباره‌ی «اپتیک» با میل و ابتکار شخصی کار می‌کرد. توجه بوهر در اپتیک، در آغاز به‌سوی مساله‌ی اندازه‌گیری شدت نور و روشنایی جذب شد. او درباره‌ی نخستین وسیله‌هایی که برای اندازه‌گیری شدت نور به‌کار می‌روند، اندیشید و ثابت کرد که شدت نور خورشید سیصد هزار برابر شدت نور ماه است. بوهر چند روز پیش از مرگ خود (که به‌عقیده‌ی شرح‌حال‌نویسان او، با مسافرت به‌پرو تسریع شد)، «رساله‌ی اپتیک» خود را برای ناشر فرستاد. بوهر از ناشر خواهش کرد، اگر نمی‌خواهد چاپ کتاب به‌بعد از مرگ او موکول شود، باید عجله کند. بوهر در این رساله، قانون کاهش نور ضمن جذب گرما را ارایه داده است. این قانون، به‌صورت‌های مختلف خود، در هر جایی که جذب نور پیش آید، ظاهر می‌شود.

برای این که مفهوم قانون بوهر را بفهمیم، از

رشته‌ی ورزش استفاده می‌کنیم که گرچه خیلی نزدیک به‌حقیقت نیست، به‌موضوع مورد نظر ما شباهت زیادی دارد. فرض کنید در یک مسابقه‌ی دو با مانع به‌طول هفت کیلومتر حضور داشته باشیم. شرکت‌کنندگان در مسابقه، آمادگی ندارند و ضعف آن‌ها، خیلی زود نمایان می‌شود: در پایان هر کیلومتر تنها یک سوم از مسابقه‌دهندگان باقی می‌مانند. در آغاز مسابقه ۲۱۷۸ نفر شرکت داشتند، در پایان کیلومتر اول ۷۲۹ نفر باقی ماندند، در پایان کیلومتر دوم ۲۴۳ نفر، در پایان کیلومتر سوم ۸۱ نفر، در پایان کیلومتر چهارم ۲۷ نفر، در پایان کیلومتر پنجم ۹ نفر، در پایان کیلومتر ششم ۳ نفر و سرانجام تنها یک نفر به‌پایان کیلومتر هفتم رسید و برنده‌ی مسابقه شد. حتا نیازی به‌این نشد که زمان تماس نفر اول با نوار پایان مسابقه اندازه‌گرفته شود.

به‌زبان ریاضی می‌توان گفت تعداد دوندگانی که فاصله‌های مختلف را دویده‌اند، یک تصاعد هندسی نزولی تشکیل می‌دهد. چنین تصاعدی عبارت است از دنباله‌ای از عددها که در آن، خارج قسمت هر عدد به‌عدد پیش از خود، مقداری است ثابت و کوچک‌تر از واحد: ۱، ۳، ۹، ۲۷، ۸۱، ۷۲۹، ۲۱۷۸

درواقع، در این جا، هر عدد برابر با یک سوم عددی است که در سمت چپ آن قرار دارد.

از ورزش به‌اپتیک برگردیم. تکه‌ای شیشه‌ی رنگی انتخاب می‌کنیم که بتواند تنها یک سوم نوری را که به‌آن وارد شده است، از خود عبور دهد. تکه‌ی دوم شیشه را اضافه می‌کنیم. این شیشه نوری را که از تکه‌ی اول گذشته است، یعنی یک نهم مقدار نوری که به‌شیشه‌ی اول وارد شده است، از خود می‌گذراند. با گذاشتن یک تکه شیشه‌ی دیگر یک بیست و هفتم نور اصلی را به‌دست می‌آوریم و غیره. روشن است که اگر ضخامت شیشه را دو برابر، سه برابر و... کنیم، باز هم به‌همین نتیجه می‌رسیم. وقتی ضخامت شیشه زیاد می‌شود، مقدار نوری که از آن می‌گذرد، به‌صورت یک تصاعد هندسی نزولی کاهش می‌یابد.

و این، همان قانونی است که بوهر کشف کرد. در نمونه‌ی دونده‌ها دیدیم، چگونه جمله‌های تصاعد هندسی، به‌سرعت کوچک می‌شوند. همین پدیده را با نمونه‌ای از اپتیک هم روشن می‌کنیم. شیشه‌ی دودی به‌ضخامت یک میلی‌متر، یک دهم نور را از خود عبور می‌دهد؛ همین گونه شیشه، وقتی یک سانتی‌متر ضخامت داشته باشد، به‌اندازه‌ی $(\frac{1}{10})^{10}$، یعنی یک ده ملیاردم نوری را که به‌آن وارد می‌شود عبور می‌دهد، یعنی به‌کلی تاریک است.

در ضمن، نویسنده‌ی این مقاله، در سال ۱۹۵۱، قانون بوهر را در محیطی که نور را تقویت می‌کرد، به‌کار برد. در چنین محیط‌هایی شدت نور پایین نمی‌آید، بلکه بنابر قانون تصاعد هندسی افزایش می‌یابد که با افزایش سیل فوتون‌ها همراه است.

اگر از اصطلاح‌های موسیقی استفاده کنیم، می‌توان گفت، قانون بوهر که در جریان دو سده در «مینور» و به‌عنوان تضعیف نور خوانده می‌شد، در «ماژُر» و به‌عنوان تشدید نور عمل می‌کند.

در اثرهای موسیقی، اغلب یک «مایه» در آغاز در گام «مینور»، محزون و غم‌انگیز است و بعدهمان «مایه» در گام «ماژُر» شاد و روشن شنیده می‌شود. نمونه‌ای از این حالت را می‌توان در پیش‌درآمد سنفونی چایکووسکی و سپس همان را در پایان همان سنفونی شنید.

۴. باز هم اندکی ورزش

با مجهز بودن به‌قانون بوهر، امکان حمله به‌معمای شیشه‌ی سبز را به‌دست می‌آوریم. ولی حتا نیرومندترین حمله‌ها هم، همیشه عاقلانه نیست که از روبه‌رو و مستقیم بر جبهه‌ی دشمن وارد شود؛ گاهی بهتر

است مسیر را به‌گونه‌ای انتخاب کنیم که ضربه از پهلو به‌دشمن وارد شود.

به‌همین دلیل، پیش از آن که به‌شیشه‌ی سبز بپردازیم، دوباره نمونه‌ی مربوط به‌ورزش را به‌یاد می‌آوریم. تازه‌کارانی که فاصله‌ی هفت کیلومتری را با چنان عدم موفقیتی پیموده بودند، گروه حرفه‌ای‌های باتجربه را خودخواهانه به‌مسابقه دعوت کردند. حرفه‌ای‌ها دعوت را پذیرفتند و حتا شرط‌های جوان‌مردانه‌ای هم پیشنهاد کردند. در آغاز حرکت همه‌ی ۲۱۸۷ تازه‌کار و تنها ۵۱۲ حرفه‌ای وجود داشت. تیمی برنده به‌حساب می‌آمد که تعداد بیش‌تری از افراد آن به‌پایان هفت کیلومتر برسد. هر دو تیم پیراهن‌های رنگی پوشیده بودند: تازه‌کاران پیراهن سبز و حرفه‌ای‌ها پیراهن قرمز.

بعد از کیلومتر اول، هواداران دونده‌های تازه‌کار قوت قلبی پیدا کردند: از تیم تازه‌کاران ـ مانند دفعه‌ی قبل ـ ۷۲۹ نفر و از تیم حرفه‌ای‌ها ۲۵۶ نفر باقی ماند. برتری عددی با تیم تازه‌کاران بود.

هواداران حرفه‌ای‌ها، از این که یکباره نیمی از تیم، در کیلومتر اول، از مسابقه خارج شده بود، تا اندازه‌ای دچار ناامیدی شدند، ولی یکی از آن‌ها که قلم و کاغذ برداشته و به‌محاسبه پرداخته بود، اطمینان داد که اگر وضع به‌همین منوال پیش برود، حرفه‌ای‌ها برنده خواهند شد.

بعد از کیلومتر دوم ۲۴۳ نفر از «سبزپوش‌ها» و ۱۲۸ نفر از «قرمز پوش‌ها» باقی ماند.

بعد از کیلومتر سوم، از «سبزها» ۸۱ نفر و از «قرمزها» ۶۴ نفر باقی ماند. روحیه‌ی هواداران تیم تازه‌کار به‌سختی دچار تزلزل شده بود.

بعد از کیلومتر چهارم، «سبزها» ۲۷ نفر و «قرمزها» ۳۲ نفر بودند. همه با احترام به‌کسی که پیش‌گویی کرده بود، نگاه کردند.

سه کیلومتر باقی مانده، شکست «سبزها» را شدت داد. بعد از کیلومتر پنجم ۹ نفر از «سبزها» و ۱۶ نفر از «قرمزها» باقی ماند. بعد از کیلومتر ششم به‌ترتیب ۳ نفر و ۸ نفر و سرانجام در پایان کیلومتر هفتم یک «سبز» و چهار «قرمز» باقی ماند. تعداد دونده‌های دو تیم را زیر هم می‌نویسیم.

۱	۳	۹	۲۷	۸۱	۲۴۳	۷۲۹	۲۱۸۷
۴	۸	۱۶	۳۲	۶۴	۱۲۸	۲۵۶	۵۱۲

در سطر دوم، نسبت هر جمله به‌جمله‌ی قبل برابر $\frac{۱}{۲}$، و در سطر اول مانند پیش برابر $\frac{۱}{۳}$ است.

نمی‌توان گفت، حرفه‌ای‌ها بهتر دویده‌اند. تنها نصف کسانی که در آغاز هر کیلومتر بوده‌اند، به‌پایان آن رسیده‌اند. با وجود این $\frac{۱}{۲}$ بزرگ‌تر از $\frac{۱}{۳}$ است. معلوم می‌شود این اختلاف کوچک عددی، نه تنها برای جبران برتری نخستین عدد تیم «سبزها»، کافی نیست، بلکه حتا آن‌ها را دچار شکست هم می‌کند. تنها باید فاصله به‌اندازه‌ی کافی و دست کم ۵ کیلومتر باشد. در فاصله‌های کوچک‌تر موفقیت با «سبز» است.

در رفتار پرتوهای نور سبز و قرمز، با دوندگان «سبز» و «قرمز»، شباهت کاملی وجود دارد.

تمامی مطلب در این جاست که شیشه‌ی «سبز» پرتوهای قرمز تیره را بهتر از پرتوهای سبز از خود عبور می‌دهد. در ضمن، بنابر قانون بوهر، اختلاف در عبور این پرتوها، با افزایش ضخامت قشر شیشه به‌سرعت افزایش می‌یابد («قانون فاصله»).

ولی در این صورت این پرسش تردیدآمیز پیش می‌آید: اگر شیشه‌ی سبز پرتوهای قرمز تیره را بهتر از پرتوهای سبز از خود می‌گذراند، به‌چه مناسبت قشرهای نازک این شیشه، سبز رنگ به‌نظر می‌رسد؟

ولی روشن کردن این موضوع دشوار نیست.

در طیفی که بدون شیشه به‌دست می‌آید، بخش سبز خیلی روشن‌تر از بخش قرمز تیره است (تیم «سبز»

پر عددتر از تیم «قرمز» است). و این، از ویژگی‌های سرچشمه‌ی نوری است که ما با آن‌ها سروکار داریم.

در قشر نازک شیشه («فاصله‌ی کوتاه»)، تفاوتی که در جذب پرتوهای قرمز تیره و سبز وجود دارد، به‌اندازه‌ای نیست که بتواند برتری درخشش نخستین پرتوهای سبز را جبران کند. در طیفی که به‌وسیله‌ی شیشه‌ی نازک به‌وجود می‌آید، نوار سبز روشن‌تر از نوار قرمز تیره است، اگرچه اختلاف بین درخشش آن‌ها تا اندازه‌ای کم شده است. مانند این است که شیشه‌ی سبز بخش قرمز نارنجی را «می‌خورد».

با زیاد شدن ضخامت شیشه، بنابر قانون بوهر، عبور پرتوهای سبز، در مقایسه با پرتوهای قرمز تیره، با سرعت بیش‌تری اُفت می‌کند (تعداد برندگان «سبز» و «قرمز» در فاصله‌های زیاد). وقتی ضخامت شیشه به‌اندازه‌ی کافی زیاد شود، اختلاف در عبور چنان بزرگ می‌شود که برتری نخستین درخشش پرتوهای سبز را جبران می‌کند و در عمل، در تمامی طیف، تنها نور قرمز تیره دیده می‌شود.

اکنون تنها این مطلب می‌ماند که روشن کنیم نقش درجه‌ی حرارت جسم ملتهبی که ما آن را از درون شیشه می‌بینیم، چیست؟

این را هر کسی می‌داند که هرچه یک ماده‌ی فلزی را بیش‌تر داغ کنیم، نور بیش‌تری به آن داده‌ایم. بی‌جهت نیست که می‌گویند: «او را از کوره درآورده‌ام» (یعنی، آن قدر «سرخ» کرده‌ام که «سفید» شده است). وقتی روشنایی رشته‌ی ملتهب لامپ غیرکافی باشد، نور قرمز می‌دهد و در حالتی که روشنایی عادی باشد، نور سفید مطلب با این نکته روشن می‌شود که وقتی درجه‌ی حرارت زیاد می‌شود، درخشش پرتوهای سبز و آبی، خیلی سریع‌تر از پرتوهای قرمز، رشد می‌کنند.

در نتیجه، وقتی درجه‌ی حرارت بالا باشد، اختلاف بین درخشش بخش‌های سبز و قرمز تیره در طیف، بیش‌تر می‌شود و دشوارتر می‌توان این اختلاف را با جذبی که به‌وسیله‌ی شیشه انجام می‌گیرد، جبران کرد. بنابراین در درجه‌ی حرارت‌های بالا، برای این که رنگ تغییر کند، باید شیشه‌ی کلفت‌تری انتخاب کرد.

تصویرهای قدیمی و بررسی‌های لئوناردو داوینچی

در بعضی از تمثال‌های قدیمی، لباس‌های «مقدسان»، به‌رنگی غیرعادی به‌نظر می‌آید. چین و شکن‌ها با رنگ قرمزی نشان داده شده است که با رنگ بخش‌های صاف لباس به‌کلی فرق دارد. برای نمونه، چین‌های قرمز روی شنل سبز و یا چین‌های نارنجی روی لباس آبی. چشم تیزبین نقاش قدیمی متوجه شده بود که برخی پارچه‌ها با دو رنگ دیده می‌شوند و در چین‌ها، رنگ دیگری غیر از رنگ زمینه پیدا می‌کنند. زمانی بود که «مُد سازان پاریس» به‌پارچه‌ی «شازدان» علاقه‌مند بودند که همین ویژگی را داشت. به‌همین مناسبت نام «شازدان» را هم، که به‌معنای «متغیر» است، روی این پارچه گذاشته بودند. علت دو رنگ بودن پارچه هم، همان چیزی است که درباره‌ی گوه‌ی آدرسنج گفتیم.

اگر پرتوهای نوری را که از پارچه‌ی دو رنگ منعکس شده است، از درون منشور عبور دهیم، در طیف، دو نوار رنگی باقی می‌ماند. برای پارچه‌ی سبز دو رنگ، همان وضعی پیش می‌آید که برای شیشه‌ی سبز: نوارهای قرمز و سبز باقی می‌ماند و پرتوهای دیگر جذب می‌شوند.

پارچه‌ی سبز دو رنگ، پرتوهای قرمز را بهتر از پرتوهای سبز منعکس می‌کند، ولی وقتی پارچه صاف باشد، درخشش بیش‌تر پرتوهای سبز در نوری که فرود می‌آید، منعکس می‌شود. به‌همین مناسبت، در نور منعکس شده، پرتوهای سبز برتری پیدا می‌کند.

لئوناردو داوینچی (۱۴۵۲ - ۱۵۱۹)، نقاش، پیکرتراش، مخترع و دانشمند ایتالیایی، در رساله‌ی نقاشی خود چگونگی انعکاس رنگ‌های مختلف را شرح داد.

در چین‌های پارچه، برای پرتوها، دست‌کم دو انعکاس پشت سر هم پیش می‌آید. ضمن انعکاس دوم، دوباره پرتوهای قرمز، قوی‌تر از پرتوهای سبز منعکس می‌شود؛ در نتیجه‌ی دوبار انعکاس، همان وضعی پیش می‌آید که درباره‌ی شیشه‌ی سبز با ضخامت بیش‌تر پیش می‌آمد: درخشش پرتوهای قرمز، بر درخشش پرتوهای سبز، برتری پیدا می‌کند و رنگ پارچه عوض می‌شود. اگر انعکاس چند بار انجام گیرد، این وضع شدت پیدا می‌کند.

بیش‌تر پارچه‌های معمولی ویژگی‌های متناقضی دارند: زمینه‌ی رنگ در چین‌ها خیلی روشن‌تر و برتر از سطح هموار در می‌آید. این موضوع هم دوباره با انعکاس‌های سطحی توضیح داده می‌شود. نوری که از این پارچه‌ها منعکس می‌شود، بعد از تجزیه در منشور، به‌جای دو نواری که درباره‌ی پارچه‌های دو رنگ به‌دست می‌آید، تنها یک نوار در طیف می‌دهد. از جمله نوری که یک بار از پارچه زرد منعکس می‌شود، در طیف، نوار وسیعی می‌دهد که بیش‌ترین درخشش آن در بخش زرد است. به‌جز پرتوهای زرد، بسیاری از پرتوهای سبز و آسمانی هم در طیف باقی می‌ماند. وقتی انعکاس دوبار انجام گیرد، پرتوهای آسمانی در عمل از بین می‌روند و پرتوهای سبز به‌شدت ضعیف می‌شوند. در این باره، همیشه قانون تصاعد هندسی حکومت می‌کند. در نتیجه نور منعکس شده، با بیش‌ترین رنگ زرد و نارنجی دیده می‌شود.

در زبان نمونه‌ی ورزشی ما، این وضع متناظر با موقعیتی است که تعداد افراد گروه حرفه‌ای‌ها، خیلی بیش‌تر از گروه تازه‌کاران باشد. روشن است که این وضع تنها باعث این می‌شود که برتری گروه حرفه‌ای‌ها در پایان فاصله شدت یابد.

لئوناردو داوینچی، نابغه‌ی بزرگی که در زمینه‌های بسیار مختلفی کار کرده است، نه تنها به‌عنوان یک هنرمند به‌ویژگی چین‌های پارچه پی برده است، بلکه همچون یک دانشمند توضیح درستی هم برای این پدیده داده است.

او در «رساله‌ای درباره‌ی نقاشی» می‌نویسد:

زیبایی نورهایی که منعکس می‌شود، خیلی بیش‌تر از رنگ طبیعی آن‌هاست، همان گونه که این وضع را می‌توان با بازتاب‌هایی که از چین‌های پارچه‌های طلایی پدید می‌آید، مشاهده کرد...، وقتی یک سطح در سطح دیگری که مقابل آن است، منعکس می‌شود و دومی در اولی و به‌همین ترتیب، این بازتاب تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد.