



مروری بر رنگ‌های ساختاری در طبیعت با بررسی نمونه‌هایی از توری پراش

نعیمه انزابی

مری، گروه طراحی صنعتی، دانشکده طراحی اسلامی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران، صندوق پستی: ۵۱۶۴۷۳۶۹۳۱

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۱۷ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۵/۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۱ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۵/۸/۱۵

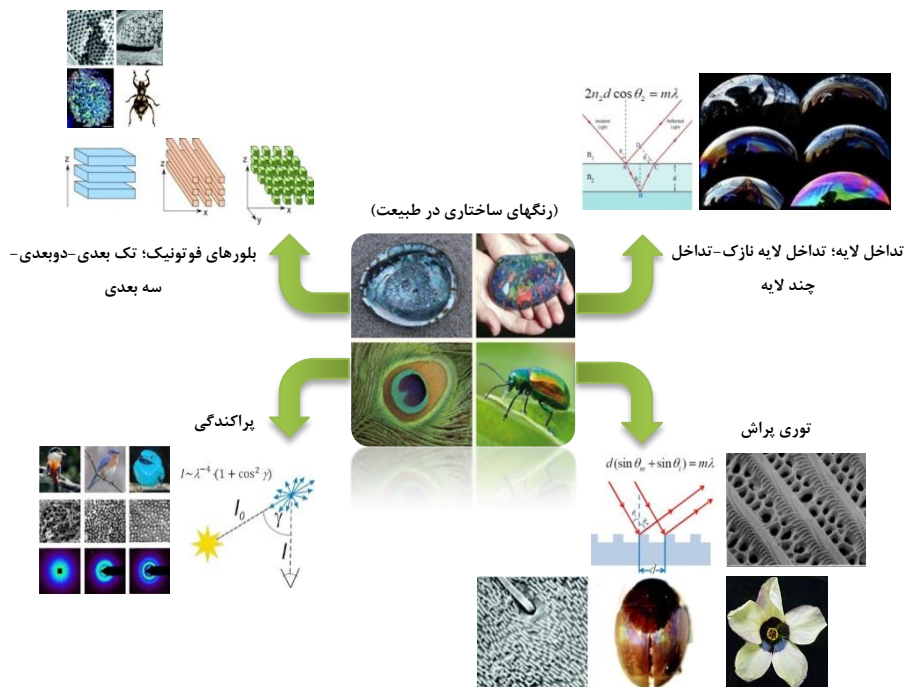
چکیده

دنیایی از رنگ‌های گوناگون در طبیعت پیرامون ما گسترده شده است که شناسایی و فهم چگونگی شکل‌گیری آنها در حوزه‌های مختلف علمی مورد توجه است. در مجموع سه منشأ اصلی برای رنگ‌های موجود در طبیعت شناخته شده است: رنگدانه‌ها، بیولومینانس و رنگ‌های ساختاری. رنگ‌های ساختاری شیوه متفاوتی از تولید رنگ بدون وجود رنگدانه هستند که بسیاری از موجودات در طبیعت همانند انواع سوسک‌ها، پروانه‌ها و پرتاووس رنگ‌های درخشان و خیره‌کننده‌ای با قابلیت‌های منحصربفرد بر اساس این روش از خود به نمایش می‌گذارند. رنگ‌های ساختاری در نتیجه برخورد نور با ساختارهای ویژه‌ای که در مقیاس نانو و میکرو در اعضای مختلف بدن این موجودات وجود دارد، ایجاد می‌شوند. متداول‌ترین سازوکارهایی که علت به وجود آمدن رنگ‌های ساختاری هستند شامل تداخل لایه، پراکندگی، بلورهای فوتونیک و توری پراش می‌باشند که از میان آنها تداخل لایه متداول‌ترین روش مورد استفاده در طبیعت است. این روش‌ها بصورت مستقل و یا ترکیبی در طبیعت مورد استفاده هستند. به غیر از حیوانات که وجود رنگ‌های ساختاری در آنها بیشتر شناخته شده است، گیاهان نیز نمونه‌های فراوانی از کاربرد رنگ‌های ساختاری را در خود دارند. این مقاله به روش توصیفی-تحلیلی به معرفی سازوکارهای تولید رنگ‌های ساختاری با تمرکز بر روش توری پراش می‌پردازد. توری پراش از کمیاب‌ترین روش‌های مورد استفاده در طبیعت است که رنگ‌های رنگین‌کمان ایجاد می‌کند و نمونه‌هایی از آن در سنگ اوپال، برخی از انواع سوسک‌ها و پروانه‌ها و گیاهانی چون گل بامیه و لاله وجود دارد.

واژه‌های کلیدی

رنگ‌های ساختاری، توری پراش، تداخل لایه، پراکندگی، بلورهای فوتونیک، طبیعت.

چکیده تصویری





A Review on Structural Colors in Nature in the focus of Diffraction Grating

Naeimeh Anzabi

Lecturer, Industrial Design Group, Islamic Design Faculty, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran,
P. O. Box: 5164736931

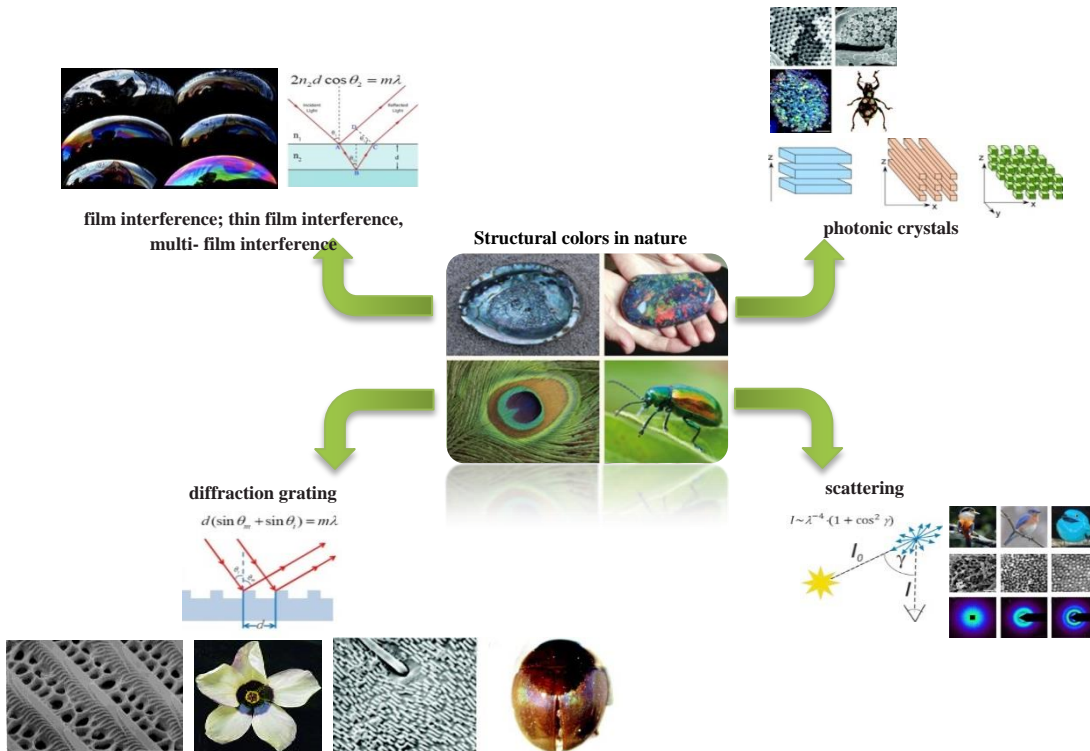
Abstract

We live in a nature full of different colors around us. Different areas of science were interested understanding the means of colors been produced in nature. Three main sources have been identified for nature's colors: pigments, structural colors and bioluminescence. Structural colors are a different way in producing color which is not based on pigments. Many various types of creatures such as beetles, butterflies and peacock feather show bright and attractive colors based on structural colors. Structural color is a special one, which is the color produced from complex interaction between light and sophisticated nano- or micro-structures. The most common mechanisms of structural colors are film interference, diffraction grating, scattering and photonic crystals. Film interference is the mostly used one. The mechanisms mentioned are used independently or combined with each other in nature. Along with animals which are best known for structural colors, there are many examples of plants in case too. This paper presents an overview of various relevant mechanisms in nature and focus on diffraction grating in details. Diffraction grating is rare than other methods and produces iridescent colors. Some examples of it have been recognized in opals, beetles, butterflies and some plants like hibiscus and tulip flowers.

Keywords

Structural color, Diffraction grating, Film interference, Scattering and Photonic crystals, Nature.

Graphical abstract



۱- مقدمه

در طبیعت تعداد بی‌شماری از موجودات مثل برخی از انواع پروانه‌ها، سوسک‌ها، پرندگان، طاووس [۹]، ماهی مرکب، ده‌پا، هشت‌پا و ماهی جنگجوی سیامی [۱۰] رنگ‌های درخشان و خیره‌کننده به نمایش می‌گذارند که علت پیدایش آنها رنگدانه‌ها نیست (تصویر ۱). ظهور رنگ‌های زرد، نارنجی-زرد، قرمز، مشکی و قهوه‌ای در بال پروانه اگرچه به جهت وجود رنگدانه است، ولی هیچ نوع رنگدانه‌ای وجود ندارد که بتواند رنگ‌های آبی، بنفش و سبز قوس قزح ایجاد کند [۲]. رنگ‌های ساختاری در گیاهان نیز وجود دارند که البته مطالعات کمتری بر روی آنها انجام شده و بنابراین بیشتر به عنوان یک ویژگی در حیوانات شناخته می‌شود [۱۱]. برخی حیوانات از قابلیت رنگ‌های ساختاری در جهت کارکردهای مختلفی چون استتار، شکار، ارتباط و جفت‌گیری استفاده می‌کنند. رنگ‌های ساختاری به دو حالت قوس قزح^۷ یا غیر قوس قزح^۸ وجود دارند [۱۲]. سطوحی که رنگ آنها با تغییر زاویه دید بیننده تغییر می‌کند قوس قزح نامیده می‌شوند. در حالی که رنگ‌های غیر قوس قزح بدون در نظر گرفتن زاویه دید بیننده همواره یکسان به نظر می‌رسند [۱۳]. دانش فعلی بیشتر به سمت بررسی رنگ‌های ساختاری قوس قزح معطوف است.



تصویر ۱- نمونه‌ای از رنگ‌های ساختاری در طبیعت. الف) پایه گلبرگ گل بامیه *Trionum* با اثر قوس قزح بر روی رنگدانه قرمز، ب) رنگ آبی در گیاهان گرمسیری از نوع علف خوک، ج) سوسک الماس با پوست سیاه رنگ و دانه‌های سبز-زرد بر روی آن، د) رنگ‌های قوس قزح در دم طاووس، ه) پروانه مورفو، و) حشره پرده بال *Closterocerus coffeellae* با نمایش تغییر رنگ در بال، ز) صدف مروارید، ح) نانو الیاف توخالی موی زنبور نیش‌دار *Aphrodita aculeata* که نور را به رنگ زرد، قرمز و سبز منعکس می‌کند، ط) ماهی جنگجوی سیامی، نمونه‌های مذکور این نوع ماهی رنگ‌های جذاب‌تری از خود نشان می‌دهند [۱].

تاکنون سه منشأ اصلی برای رنگ‌های موجود در طبیعت شناسایی شده است؛ رنگدانه‌ها، رنگ‌های ساختاری^۱ و بیولومینانس^۲ [۱]. به غیر از رنگدانه‌ها (که اساس آنها جذب نور است [۲]) و بیولومینانس (یا نورسرد که از واکنش شیمیایی به وجود می‌آید)، نوع بزرگ دیگری از نمایش رنگ در حیوانات و گیاهان رنگ‌های ساختاری است. رنگ‌های ساختاری جزو حیرت‌انگیزترین و پیچیده‌ترین سازوکارها در طبیعت برای تولید رنگ هستند که اساس آنها نه به علت وجود رنگدانه، بلکه به واسطه وجود ساختارهایی در مقیاس ماکرو و نانو است. رنگ‌های ساختاری نتیجه بازتابش انتخابی نور هستند، در حالی که فام‌های حاصل از رنگدانه‌ها در اثر جذب انتخابی نور توسط الکترون‌ها به وجود می‌آیند [۳، ۴]. البته در برخی موارد رنگ‌های ساختاری می‌توانند فام‌های حاصل از رنگدانه‌ها را تغییر دهند. به عنوان مثال پرهای دم طاووس از لحاظ رنگدانه‌ای قهوه‌ای هستند ولی ساختار آنها باعث می‌شود تا رنگ آنها آبی، فیروزه‌ای و سبز به نظر آید [۵]. رنگ‌های ساختاری و رنگدانه‌ای تفاوت‌های بسیاری با هم دارند. شدت رنگ از جمله این تفاوت‌ها است که در رنگ‌های رنگدانه‌ای در بسیاری مواقع کدر، ولی در رنگ‌های ساختاری به جهت دقت بالا در ساختارهای بازتابنده در پهنای باند منعکس شده، بسیار قوی است. تفاوت دیگر در نمایش الگوهای رنگی است. نور در برخورد به رنگدانه‌ها منتشر شده و بنابراین این رنگ‌ها از هر زاویه‌ای یکسان دیده می‌شوند. در حالی که رنگ‌های ساختاری قادرند تا الگوهای متفاوتی از رنگ را با توجه به تغییر زاویه دید بیننده ایجاد کنند. این ساختارهای بازتابنده قادرند طول موج خاصی از نور را در یک زاویه و طول موج دیگری از نور را در زاویه‌ای متفاوت منعکس کنند. در نتیجه رنگ شی با حرکت کردن و جابجایی موقعیت بیننده دچار تغییر می‌شود [۴]. از ویژگی‌های دیگر رنگ‌های ساختاری علاوه بر تغییر بر اساس زاویه دید بیننده، مقاومت بالا در مقابل مواد اسیدی، قلیایی، نور و تغییرات دمایی است. البته این رنگ‌ها بر خلاف رنگدانه‌ها در محیط‌هایی با ضریب شکست متفاوت با هوا مثل آب یا روغن ناپدید می‌شوند [۶].

مطالعه پیرامون رنگ‌های ساختاری اگرچه از زمان افرادی چون نیوتن (۱۷۰۴) و هوک (۱۶۶۵)^۳ آغاز شد [۷]، لیکن مطالعات تخصصی در این زمینه با اختراع میکروسکوپ الکترومگنتی در سال ۱۸۷۳ توسط ماکسول^۴ و پس از او در سال ۱۸۸۴ توسط هرتز^۵ ادامه پیدا کرد [۸]. فهم کامل‌تری از ساختار این رنگ‌ها پس از ورود میکروسکوپ‌های الکترونی به حوزه زیستی و در دهه ۴۰ قرن بیستم میلادی توسط محققانی چون اندرسون و ریچاردز^۶ به دست آمد [۱]. این موضوع در سال‌های اخیر نیز از سوی محققان بسیاری مورد توجه بوده است [۲، ۸].

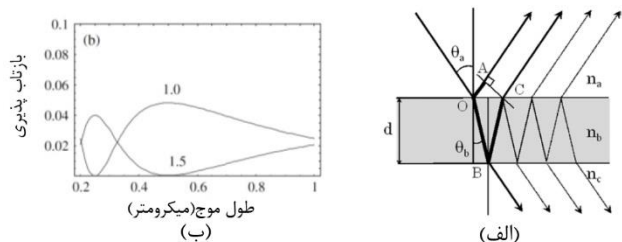
⁷ Iridescent
⁸ Non-iridescent

¹ Structural colors
² Bioluminescence
³ Hook and Newton
⁴ Maxwell
⁵ Hertz
⁶ Anderson and Richards

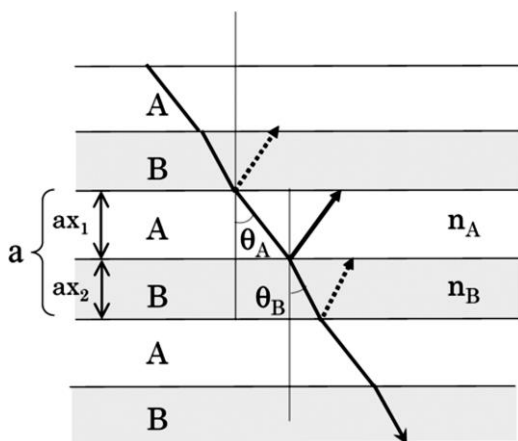
اختلاف دو دامنه باشد، تداخل مخرب است. امواجی که تداخل مخرب را ایجاد می‌کنند، در فاز مخالف هم قرار دارند. به عنوان مثال در حساب صابون شرایط برای تداخل سازنده بر اساس رابطه ۱ است [۱۶].

$$2n_b d \cos\theta_b = (m - 1/2)\lambda \quad (1)$$

که λ طول موجی است که بیشترین انعکاس را دارد و m یک عدد صحیح مثبت است.



شکل ۱. (الف) تصویر شمایی از تداخل لایه نازک. (ب) ویژگی‌های انعکاس در تداخل لایه نازک. ضریب شکست و ضخامت لایه ۱/۲۵ و ۰/۱ میکرومتر است. چنین فرض شده است که لایه در تماس با هوا ($n=1$) و یا ماده‌ای دیگر ($n=1/5$) است [۱۶].



شکل ۲- تصویر شمایی از تداخل چند لایه [۱۶].

تداخل چند لایه عموماً زمانی که چندین لایه نازک در فواصل معین کنار هم قرار گرفته باشند، اتفاق می‌افتد. چندین لایه منظم از این ساختار آینه براگ (آینه چندلایه) نامیده می‌شود که نمونه‌ای از آن نیز در بلورهای فوتونیک یک بعدی وجود دارد [۱]. دو لایه به نام A و B با ضخامت d_A و d_B و ضریب شکست n_A و n_B مشابه شکل ۲ وجود دارد. برای $n_A > n_B$ تداخل سازنده با رابطه ۲ اتفاق می‌افتد [۱۶].

$$2(n_A d_A \cos\theta_A + n_B d_B \cos\theta_B) = m\lambda \quad (2)$$

تداخل چند لایه متداول‌ترین شیوه در طبیعت و حیوانات برای ایجاد رنگ‌های ساختاری است که نمونه‌های آن بسیار پیچیده می‌باشند

ساختارها و سازوکارهای متعددی در ایجاد رنگ‌های ساختاری در طبیعت وجود دارد که متداول‌ترین سازوکارهای شناخته شده تداخل لایه^۱، پراکندگی^۲، توری پراش^۳ و بلورهای فوتونیک^۴ هستند [۱۴، ۸، ۲]. این سازوکارها به صورت جداگانه و یا در مواقعی به صورت ترکیبی عامل شکل‌گیری رنگ‌های ساختاری در حیوانات و گیاهان هستند. از دیدگاه اصول فیزیکی، تداخل لایه و پراش قادر به ایجاد رنگ‌های قوس قزح و پراکندگی نیز غالباً به جهت وجود بی‌نظمی در ساختار خود انواع رنگ‌های غیر قوس قزح را ایجاد می‌کند [۱]. در این مقاله پس از معرفی اجمالی سازوکارهای مختلف در رنگ‌های ساختاری به بررسی نمونه‌هایی بر پایه توری پراش در طبیعت پرداخته شده است.

۲- اصول فیزیکی رنگ‌های ساختاری

۱-۲- تداخل لایه

تداخل لایه متداول‌ترین سازوکار در ایجاد رنگ‌های ساختاری در طبیعت است که به دو شکل تداخل لایه نازک^۵ و تداخل چند لایه^۶ وجود دارد. نمونه معروف این سازوکار رنگ‌های ایجاد شده بر روی لایه نازک حساب صابون است. در چنین شرایطی نوری که به این لایه می‌تابد به دلیل نازک بودن آن لایه از سطح رو و سطح زیرین بازتاب می‌کند و بر اساس طول موج نور با هم تداخل می‌کنند. این تداخل برای رنگ‌های مختلف شرایط متفاوتی ایجاد می‌کند و باعث می‌شود که نوارهای رنگی را روی لایه نازک مشاهده کنیم [۱۵]. بازتابش نور از لایه‌ای نازک و غیرجاذب به ضخامت d و ضریب شکست n_b و زاویه تابش و شکست θ_a و θ_b به لحاظ تئوری با جمع دامنه همه پرتوهای نوری که در انعکاس از لایه جدا می‌شوند تعیین می‌شود. نور منعکس شده از دو لایه با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند [۱] (شکل ۱) که شرایط تداخل با توجه به اینکه لایه نازک وابسته به ماده‌ای با ضریب شکست بزرگتر باشد یا نه، متفاوت است. دلیل تفاوت این است که بازتاب در یک سطح، زمانی که نور به ماده‌ای با ضریب شکست بزرگتر نسبت به ماده قبلی برخورد می‌کند، فاز آن را 180° درجه تغییر می‌دهد. در صورتی که این اتفاق در حالت عکس آن پدیدار نمی‌شود. طبق اصل برهم‌نهی^۷، دو نوع تداخل مختلف بین امواج اتفاق می‌افتد. امواج نور بر اساس فازشان می‌توانند تداخل سازنده^۸ یا مخرب^۹ داشته باشند. اگر امواجی که در یک نقطه به هم می‌رسند، همدیگر را تقویت کنند و دامنه برآیند آنها برابر مجموع دامنه موج‌های اولیه باشد، تداخل سازنده است. در این نوع تداخل، امواج بر هم نهاده هم‌فاز هستند. در مقابل اگر امواج در نقطه‌ای که به هم می‌رسند، همدیگر را تضعیف کنند و دامنه برآیند برابر

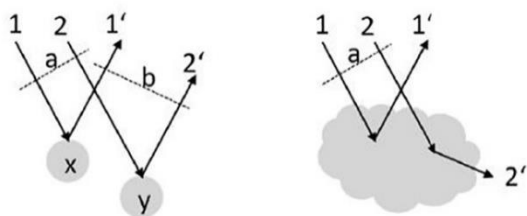
1 Film interference
2 Scattering
3 Diffraction grating
4 Photonic crystals
5 Thin-film interference
6 Multi-film interference
7 Superposition principle
8 Constructive interference
9 Destructive interference

$$I_S = \frac{K^2 I_i V^2}{\lambda^4 r^2} \quad (3)$$

که K عدد ثابتی است که به ضریب شکست ذرات وابسته است، I_i شدت نور تابشی و λ طول موج نور در خلا یا فضای آزاد است که ذره نیز به شکل کروی فرض شده است.



تصویر ۲- پراکندگی رایلی در شیشه شیری رنگ. نور پراکنده شده از زاویه جانبی آبی است ولی به رنگ نارنجی می‌درخشد [۲].



شکل ۳- پراکندگی همدوس و ناهمدوس [۲۱].

پراکندگی تیندال به نوعی پراکندگی ناهمدوس با ذرات کوچک نزدیک به ابعاد طول موج قابل رویت در مقیاس میکروسکوپی اشاره دارد. در حالی که در پراکندگی ناهمدوس رایلی همه ذرات کوچک‌تر از ابعاد طول موج نور تابشی هستند [۲۲]. پراکندگی رایلی بیشتر در گازها و سوسپانسیون ذرات کوچک الکتریکی دیده می‌شود [۲]. پراکنش رایلی امواج نور خورشید به واسطه مولکول‌های موجود در اتمسفر، علت رنگ آبی آسمان است. از آنجایی که تاثیر پراکندگی رایلی در طول موج‌های کوتاه‌تر بیشتر است (انتهای آبی طیف مرئی)، از این‌رو نور پراکنده شده به زمین در زاویه بزرگ و با توجه به جهت نور خورشید، عمدتاً در انتهای آبی طیف مرئی قرار می‌گیرد [۲۱]. بسیاری از رنگ‌های آبی غیر قوس‌قزح در حیوانات نیز نتیجه پراکنش رایلی است. برخی از رنگ‌های سبز در پر طوطی نیز در نتیجه ترکیب رنگدانه زرد در پرها و رنگ آبی حاصل از پراکنش رایلی به وجود می‌آید [۲]. هنگامی که ابعاد ذرات پراکنده کننده بزرگ‌تر و یا مساوی طول موج نور تابیده شده باشد، نور پراکنش شده از قسمت‌های مختلف دچار تداخل و پراکندگی همدوس پیچیده‌تری می‌شود که با عنوان پراکندگی مای شناخته شده است [۲۳].

[۸، ۱۷]. نمونه‌ای از آن در سوسک طلایی^۱ وجود دارد که بیشتر از ۱۲۰ لایه به هم متصل هستند تا رنگ طلایی متالیک و درخشان پدید آید [۱۸]. همچنین ساختارهای سنگی و زیستی مثل لابرادوریت^۲ [۱۹]، [۱۹]، (که رنگ آن در نتیجه ساختارهای صفحه‌ای منظم و کنار هم چیده شده و لایه‌هایی با ضخامت ۳۰۰ nm ایجاد می‌شود)، مروارید و پوست صدف [۲]، (که شامل لایه‌های متناوب از مواد آلی و غیرآلی هستند و درخشش آنها از تداخل واحدهای سلولی ساختار چند لایه متناوب کنارهم ایجاد می‌شود) و انواع پروانه‌ها و بیدها [۲۰]، (که هر فلس بال آنها از ۴ یا ۵ لایه کوتیکول تشکیل شده که در حدود ۴۰ nm ضخامت دارد که به وسیله میله‌های کوتیکولی بسیار کوچک از هم جدا شده‌اند)، نمونه‌هایی از ساختار تداخل چند لایه در طبیعت هستند [۲۰].

۲-۲- پراکندگی

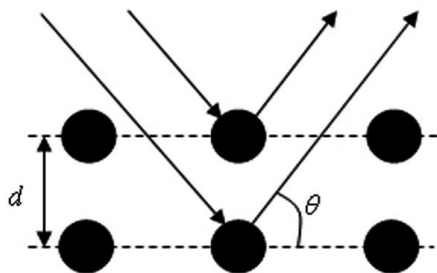
در حالت کلی پراکندگی که در طبیعت نیز بیشتر برای تولید طیف رنگ آبی دیده می‌شود [۱]، به معنی تداخل سازنده و یا مخرب نورهایی با طول موج‌های متفاوت است که از اجسام منعکس شده‌اند. در ساده‌ترین دسته‌بندی این سازوکار، دو نوع پراکندگی همدوس^۳ (تداخل^۴، تقویت^۵، تقویت^۶، انعکاس لایه نازک^۷ و پراش^۸) و ناهمدوس^۹ (پراکندگی رایلی^۹، رایلی^{۱۰}، تیندال^{۱۱} و مای^{۱۱}) وجود دارد [۲۱]. (تصویر ۲ و شکل ۳) در پراکندگی همدوس بین امواج تابشی و پراکنده شده رابطه فازی مشخصی وجود دارد. در حالی که در پراکنش ناهمدوس چنین رابطه‌ای برقرار نیست [۱]. پراکندگی بر اساس مبادله انرژی به دو نوع الاستیک^{۱۲} یا کشسان و غیرالاستیک^{۱۳} یا غیرکشسان تقسیم می‌شود. در پراکندگی الاستیک ذرات کوچک‌تر از ابعاد طول موج تابش، می‌توانند تابش را بدون تغییر در انرژی یا بسامد آن پراکنده کنند. ولی در پراکندگی غیرالاستیک بسامد تابش پراکنده شده با بسامد تابش فرودی برابر نیست. پراکندگی تیندال، رایلی و مای از نوع پراکندگی الاستیک هستند. در پراکندگی الاستیک، ذرات نور مستقل از یکدیگر پراکنده می‌شوند. اتم‌ها و مولکول‌های خنثی در هوا مثل نوسانگرهای هماهنگ و یا دوقطبی قدیمی عمل می‌کنند. چون تابش پراکنده شده با فاز تصادفی ترکیب می‌شود (پراکندگی ناهمدوس)، بنابراین بین شدت و تعداد ذرات پراکنده شده نسبتی وجود دارد. مجموع تابش پراکنده شده (I_s) هر ذره با حجم (V) بر اساس رابطه ۳ تعریف می‌شود [۲۳].

- 1 Chrysinia resplendens
- 2 Labradorite
- 3 Coherent
- 4 Interference
- 5 Reinforcement
- 6 Thin-film reflection
- 7 Diffraction
- 8 Incoherent
- 9 Rayleigh
- 10 Tyndall
- 11 Mie
- 12 Elastic scattering
- 13 Non-elastic scattering

جمله ساده‌ترین و مطرح‌ترین نمونه‌های پدیده براگ است. بنابراین توضیح کوتاهی پیرامون پدید براگ بیان می‌شود. پدیده براگ در سال ۱۹۱۲ در پی مشاهدات پراکنش بر روی اجسام بلوری به‌وسیله پرتو ایکس ظهور کرد. در پدیده براگ اگر نور سفید به طور مایل به ساختار منظم بلوری برخورد کند (این ساختار را می‌توان با دسته‌ای از صفحات موازی مجزا و واحد که فاصله هر یک با دیگری d می‌باشد، نشان داد) و موج تابشی با زاویه θ نسبت به این صفحه‌ها وارد شود، در این صورت طول موج نور از رابطه ۴ به دست می‌آید [۲] (شکل ۴).

$$\lambda = (2d \sin\theta) / m \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

که در آن نور منعکس شده از صفحات مجاور تداخل سازنده‌ای دارد. انتخاب زاویه‌ای پدیده براگ (که اغلب پراکنش نامیده می‌شود) دلیل اصلی در رنگ‌های ساختاری است. به طوری که ساختارهای چند لایه متناوب گاهی اوقات فیلتر براگ نامیده می‌شوند.



شکل ۴- پدیده براگ [۲].

همانطور که ذکر شد توری پراش از جمله ساده‌ترین و مطرح‌ترین نمونه‌های پدیده براگ است. توری پراش در واقع یک صفحه فلزی مشبک با ضخامتی بیش از ضخامت پوست است. وقتی نور تحت زاویه θ به توری برخورد می‌کند، نور بازتابی در بیش از یک جهت منتشر می‌شود. جهت‌های انتشار نور تحت زوایایی دچار چرخش می‌شوند که بر اساس رابطه ۵ به دست می‌آید که در آن d تناوب توری پراش است [۲۸].

$$\theta_m = \cos^{-1}(\cos \theta + m \lambda / d), \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (5)$$

شکل ۵ رابطه بین فواصل توری و زوایای پرتوهای تابشی و انکساری را نشان می‌دهد. رنگ در جهتی خاص (زاویه دید) بر اساس تداخل اجزای بازتابی از هر شکاف توری ایجاد می‌شود [۱۶، ۱۵]. این شکل دو پرتو موازی تابشی به توری به نام ۱ و ۲ با فاصله یک شیار به نام d را نشان می‌دهد که با یکدیگر در جبهه امواج رادیویی A در یک فاز هستند. بر اساس اصول تداخل سازنده، اگر تفاوت بین طول مسیر پرتوها یعنی، $d \sin \theta_0 + d \sin \theta_3$ ، عدد انتگرالی از طول موج باشد، این پرتوها در جبهه

این نوع پراکنندگی، توسط ذرات بزرگ با ضریب شکست نسبتاً زیاد انجام می‌شود. پراکنندگی مای از لحاظ ریاضی توصیف درست‌تری از پراکنندگی نور است و به طور دقیق‌تری اندازه ذرات کوچک پراکنش را توضیح می‌دهد [۱]. اگرچه بیشتر رنگ‌های ساختاری در حیوانات با پراکنش همدوس ایجاد می‌شوند، ولی رنگ آبی در بسیاری از دوزیستان نیز به جهت پراکنش ناهمدوس پدید آمده است [۴].

۲-۳- بلورهای فوتونیک

بلورهای فوتونیک ساختارهای تناوبی در اندازه نانو هستند که ضریب شکست آنها به طور متناوب تغییر می‌کند. این ساختارها به صورت یک‌بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی منظم شده‌اند که بسته به طول موج، فوتون‌ها می‌توانند به واسطه بلورها منتقل شده و یا منتقل نشوند [۲۴]. بلورهای فوتونیک یک‌بعدی مشابه تداخل لایه نازکی هستند که در بخش قبلی بیان شد. جهت تاثیر در دامنه مرئی، تناوب بلورهای فوتونی باید بین ۲۰۰ و ۳۵۰ nm باشد [۲۱]. مفهوم اصلی بلورهای فوتونیک، ساختار نوری تناوبی درجه‌بندی شده‌ای است که می‌تواند به عنوان هر واسطه غیرجاذبی که در تغییرات شبکه بلوری ثابت است، تعریف شود. بلورهای فوتونیک می‌توانند نوع خاصی از کامپوزیت نیز باشند که از دو ماده با ضریب شکست n_1 و n_2 که ویژگی آنها ضریب شکست ثابت تحت تغییرات فضایی شبکه بلوری است، ساخته شده است [۲۵]. نمونه‌ای از رنگ‌های ساختاری با سازوکار بلورهای فوتونیک در برخی سوسک‌های سرگین غلطان، سوسک لمپروسپیوس اگوستوس^۱، پروانه دم‌چلچله‌ای طاووس زمردین^۲ [۲۶] و پروانه پیداس سی‌ساستریس^۳ [۲۱] و برخی از گیاهان مانند گل‌های گل سپیدگوهر آلپ^۴ وجود دارد.

۲-۴- توری پراش

توری پراش که در سال ۱۸۸۸ کشف شد و تا سال ۱۹۹۵ از وجود آن در طبیعت اطلاعی در دست نبود، سطحی راه‌راه در جهت‌های مشخص و با فواصل معین است. هنگامی که نور به توری پراش برخورد می‌کند، پراشیده شده و پس از عبور از توری می‌توان طرح تداخلی موج نور را روی پرده مشاهده کرد. این طرح تداخلی چندگانه که حاصل از تداخل نور در شکاف‌های بسیار زیاد توری است، باعث به وجود آمدن قله‌های شدتی روی پرده می‌شود که مکان این قله‌ها در نمودار شدت بر حسب فاصله از نوار مرکزی قابل مشاهده است. این نمونه برای اجرای رنگ‌هایی همانند آنچه در هولوگرام‌ها و یا کارت‌های بانکی وجود دارد، مناسب است [۲۷]. در مجموع سازوکار برخورد شی و نور در رنگ‌های ساختاری به دو دسته قابل تقسیم است: ۱- پراکنندگی از ذرات کوچک و ۲- پدیده براگ، که در ساختارهایی با شکل متناوب وجود دارد [۲]. توری پراش از

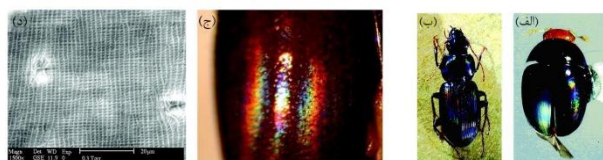
¹ Lamprocyphus augustus

² Papilio palinurus

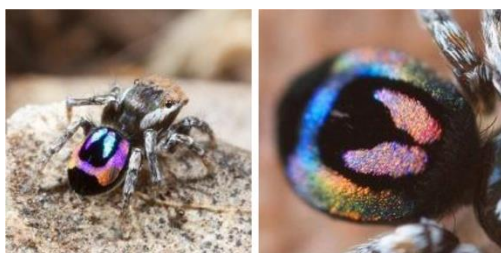
³ Parides sesostris

⁴ Leontopodium alpinum

مشخص شده است که توری پراش با تغییر زاویه دید، اثرات قوس قزحی در راستای طیف مرئی مشابه آنچه بر روی سطح سی‌دی وجود دارد، تولید می‌کند [۱۸]. اندک بودن اثرات قوس قزح در طبیعت و موجودات زنده نشان می‌دهد که استفاده از توری پراش به صورت گسترده‌ای متداول نیست، اگرچه نمونه‌هایی در فسیل جانوران نیز یافت شده [۳۰] که حکایت از وجود این سازوکار در سالیان طولانی در طبیعت دارد. نمونه‌ای از این ساختارهای سطحی به شکل پراش توری در سنگواره‌های گونه برگس شیل^۱ که در ۵۱۵ میلیون سال پیش زندگی می‌کردند، پیدا شده است [۲]. برخی از موجودات چون میگوی دریایی^۲، حلزون صدف‌دار^۳ و نمونه‌هایی از سوسک‌ها نیز (تصویر ۳) واجد این ویژگی هستند. اثر قوس قزح در پر برخی پرندگان مانند کبوتر بال برنزی^۴ نیز متداول است که البته این ویژگی به واسطه تداخل لایه و فاصله شیب مناسب بین لایه‌های ملانوزوم^۵ ایجاد می‌شود [۳۲]. با تغییر زاویه دید، هر قلاب در یکی از پره‌های این پرنده طیف نازکی از رنگ قوس قزح را ایجاد می‌کند. نمونه‌های دیگری از اثر قوس قزح در برخی عنکبوت‌ها به ویژه عنکبوت‌های جهنده^۶ وجود دارد. (تصویر ۴)



تصویر ۳- نمونه‌ای از سوسک‌های رنگی. الف) *Phalacridae* جن (ب) *Loxandrus rectus* که هر دو به واسطه توری پراش تولید رنگ می‌کنند. ج) پوست سوسک نیتیدالیدا (*Nitidulidae*) د) اسکن الکترونی از پوست سوسک [۳۳].



تصویر ۴- اثر قوس قزح بر روی عنکبوت جهنده [۳۰].

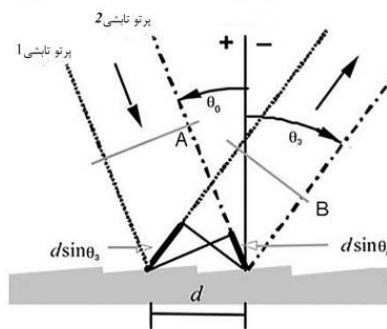
بر خلاف پرنده بال برنزی که اثر رنگین‌کمان در طول قلاب‌های متصل به پر گسترده است، تنها یک فلس کوچک با اثر قوس قزح در قسمت پشتی تنه این نوع عنکبوت می‌تواند رنگ‌هایی را در کل طیف مرئی به نمایش بگذارد [۳۰]. بنابراین این احتمال وجود دارد که این ویژگی به واسطه

امواج B پراش شده هم فاز خواهند بود. بر اساس پدیده براگ، رابطه توری پراش به صورت زیر خواهد بود [۱].

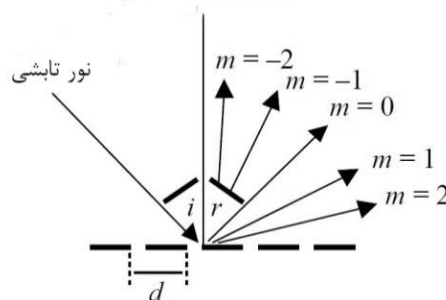
$$m\lambda = d (\sin\theta_0 + \sin\theta_3) \quad (6)$$

که θ_0 و θ_3 زوایای تابش و پراش هستند، در صورتی که طول موج λ از شکاف توری با فاصله d ، پراکنده شده است. m مرتبه پراش (بازتاب) است که یک عدد صحیح می‌باشد (تعداد صفحه‌های بلوری). زمانی که $m=0$ باشد (پراش مرتبه صفر)، توری مثل یک آینه عمل کرده و طول موج‌ها جدا نمی‌شوند. این شرایط منجر به قانون بازتاب در حالت $\theta_3 = \theta_0$ می‌شود و به شکل رابطه ۷ تغییر می‌کند [۲۹] (شکل ۶).

$$m\lambda = 2d \sin\theta_0 \quad (7)$$



شکل ۵- رابطه بین فواصل توری و زوایای پرتوهای تابشی و انکساری [۱].



شکل ۶- توری پراش که یک پرتو تابشی را نشان می‌دهد که در اطراف پراش مرتبه صفر پراشیده شده است [۲۹].

۳- بررسی نمونه‌های توری پراش در طبیعت

توری پراش به ندرت به عنوان راهکار اصلی در ایجاد رنگ در طبیعت وجود دارد [۳۰] و اغلب به صورت ترکیبی با سازوکارهای دیگر همچون تداخل لایه به منظور تولید اثرات نوری پیچیده استفاده شده است [۳۱]. شاید علت این باشد که ساختار توری پراش یک رنگ مشخص را ایجاد نکرده بلکه تنوعی از رنگ‌های مختلف را (رنگ‌های قوس قزح) ایجاد می‌کند که احتمالاً با توجه به اهداف مورد نظر در حیوانات و طبیعت گزینه مناسبی نمی‌باشد [۸]. امروزه بر پایه مطالعات مهندسی و نوری

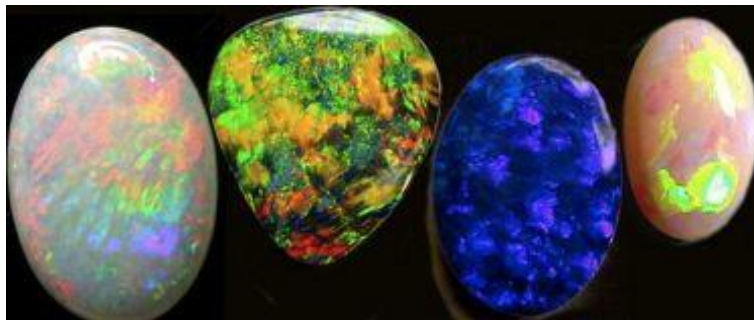
¹ Genuses *Canadia* and *Wiwaxia*
² *Azygocypridina lowryi*
³ Nacres of Mollusks
⁴ *Phaps chalconera*
⁵ Melanosome
⁶ *Maratus robinsoni*

که m عدد مثبت صحیح است. برای یک اوپال هگزاگونال با $D=160\text{ nm}$ که در آن $d=130/6\text{ nm}$ می‌باشد، و $n_{\text{eff}} \approx 1/54$ که مقدار معمول ضریب شکست موثر سیلیکا است، مشاهده می‌شود که رنگ آبی در طول موج حدود 402 nm ، به شکل غالب از طیف مرئی متفرق شود. افزایش مقدار D به 275 nm باعث می‌شود که رنگ قرمز با طول موج 692 nm ، بیشتر از طیف مرئی متفرق شود. با بزرگتر شدن کره‌های سیلیکایی در اوپال، $(D > 350\text{ nm})$ بازی رنگ‌ها به جهت بازگشت امواج با طول موج‌های محدوده فرورسرخ، دیده نخواهند شد. با این حال با چرخاندن اوپال برای کاهش زاویه θ و ایجاد پدیده براگ در طول موج‌های کوتاه‌تر، بازی رنگ‌ها مجدداً به وجود آمده و بخصوص رنگ قرمز ظاهر می‌شود [۲]. برخلاف اوپال‌های قیمتی که در طبیعت نادر هستند، نمونه‌های معمولی آن به میزان فراوانی وجود دارند. اوپال‌های معمولی ساختار منظم اوپال‌های قیمتی را ندارند و از این رو نور مرئی را متفرق نمی‌کنند. یک نمونه از اوپال‌های معمولی، اوپال آتشین است که یک سنگ نازنجی شفاف است که رگه‌های رنگی آن به خاطر وجود مقادیر محدود اکسید آهن می‌باشد. در مراتب اولیه ساختاری، اوپال‌های معمولی از تجمع تصادفی نانودانه‌های سیلیکا با قطرهای موثر متفاوت که به طور میانگین 25 nm است، ساخته شده‌اند [۳۶]. بنابراین دلیل اولیه در ضعف بازی رنگ‌ها در سنگ‌های اوپال معمولی، کروی نبودن شکل و تنوع چندگانه در اندازه نانودانه‌های درون آن است.

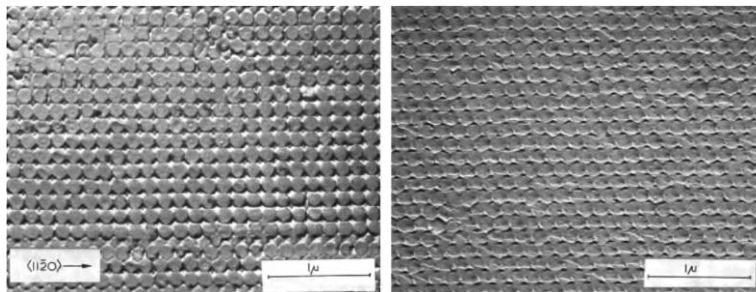
وجود توری پراش در این عنکبوت باشد. اگرچه آزمایشات بیشتری برای اثبات آن نیاز است. سنگ اوپال^۱ گرانبها، (تصویر ۵) شاید بهترین نمونه در رنگ‌های ساختاری طبیعت است که در آن از توری پراش استفاده شده است. این سنگ با تغییر زاویه دید رنگ‌های درخشانی را به نمایش می‌گذارد که تحت نام بازی رنگ^۲ معروف است. اسکن میکروسکوپ‌های الکترونی نشان داد که اوپال از لایه‌هایی از ذرات کروی فشرده شده بر روی هم از جنس سیلیکای بی‌شکل^۳ تشکیل شده که قطر آنها بین $150-300\text{ nm}$ متغیر است. لایه‌ها به نحوی روی هم انباشته شده‌اند تا یک شبکه هگزاگونال (شش وجهی) یا فشرده مکعبی را ایجاد کنند. (تصویر ۶) درخشش و بازی رنگ‌ها در سنگ اوپال به خاطر پدیده براگ (رابطه ۴) است [۲]. بر اساس رابطه ۴ و با شرایطی که $d=D$ برای شبکه فشرده مکعبی و $d=(2/3)^{1/2}D$ برای شبکه هگزاگونال که در آن D قطر کره‌های سیلیکایی است، باشد و با فرض تابش نورمال نور با $\sin \theta=1$ و جاگذاری λ با λ/n_{eff} که n_{eff} ضریب شکست موثر است، رابطه ۸ به دست می‌آید [۳۵].

$$\lambda = 2 n_{\text{eff}} d / m \quad (8)$$

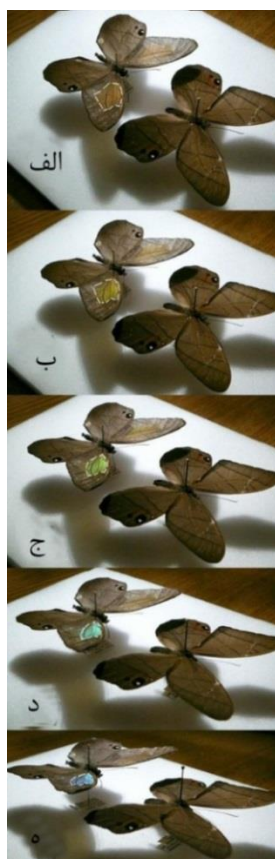
- ¹ Opal Stone
² Play of colors
³ Amorphous silica



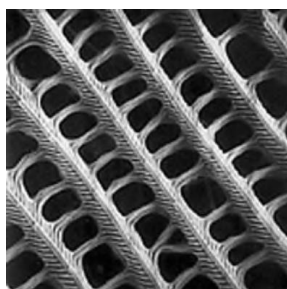
تصویر ۵- نمونه سنگ‌های اوپال [۳۴].



تصویر ۶- اسکن میکروسکوپ الکترونی ($\times 30000$) از سطح شکاف سنگ اوپال که ذرات کروی سیلیکا را (الف) در ساختار شش ضلعی و (ب) در ساختار مکعبی نشان می‌دهد [۲].



تصویر ۷- نمونه مذکر و مونث پروانه لونا در زوایای مختلف. نمونه مذکر پشت سر مونث قرار دارد [۳۸].



تصویر ۸- اسکن میکروسکوپ الکترونی از بال پروانه نیتیدا [۲].



شکل ۹- چپ) تصویر شمایی از ساختار توری پراش معمولی و راست) تصویر شمایی از بال خمیده پروانه با حالت عمودی عناصر پراش در حالت انتقال نور [۳۷].

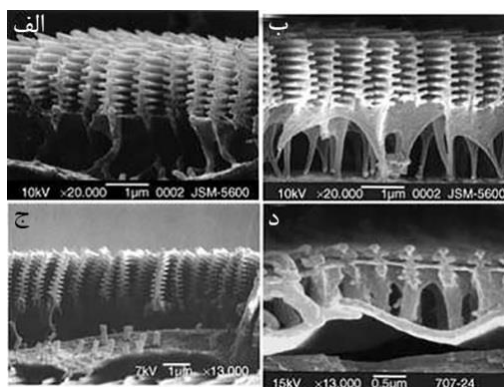
نمونه‌های دیگری از توری پراش در طبیعت در گونه‌های از پروانه‌ها یافت می‌شود [۲]. گونه‌های مذکر دو نوع پروانه لامپرولین نیتیدا^۱ [۳۷, ۳۸] از گینه نو و لونا^۲ [۳۷] (تصویر ۷) از آمریکای مرکزی، رنگین کمان جذابی را به واسطه پراش به نمایش می‌گذارند. زمانی که نور از سمت بالا تابیده شود بال‌های رویی به رنگ قهوه‌ای مات نمایان می‌شوند. ولی چنانچه نور در راستای محور بدن تا نوک بال تابیده شود رنگ‌های قوس قزح به نمایش درمی‌آیند. با تغییر شدت بازتاب و زاویه دید، تغییرات چشمگیری به وجود می‌آید. گونه مذکر پروانه نیتیدا رنگ‌های سبز و قرمز را در تابش از سمت جلو و رنگ‌های آبی تا بنفش را در تابش از عقب نشان می‌دهد. علت نمایش چند رنگ، وجود دوساختار بلوری متفاوت در هر فلس از بال‌های جلویی است. بنابراین هر یک از آنها می‌تواند علائم رنگی متفاوتی را در جهت‌های مختلف ایجاد نماید [۳۹]. بال جلویی این پروانه، نور سفید را همانطور که یک توری پراش قادر به انجام آن است، تجزیه می‌کند. رگه‌های داخلی شیار فلس‌ها (تصویر ۸) نیز به عنوان یک پراش توری، با گام حدود ۵۸۰ nm که تقریباً مسطح است و در طول بال قرار دارد، عمل می‌کند [۲]. پرتو سفید در زاویه تابش نرمال پراشیده می‌شود. پرتوهای قرمز پراش شده در زاویه تماس نمایان شده ولی پرتوهای نارنجی، زرد و سبز پراش شده، در زوایای کوچک‌تر از دید که بسیار نزدیک به جهت عمودی هستند، دیده می‌شوند. ترتیب رنگ‌ها در لونا برعکس نیتیدا است. رنگ بنفش در زوایای دید تماس و نزدیک به سطح بال رویی دیده می‌شود. رنگ‌های دیگر از آبی به قرمز در زوایایی که رفته رفته به جهت عمود بر بال‌ها نزدیک است، دیده می‌شوند. این اثر به خاطر تغییرات میکروسکوپی در کل فلس است که به منظور شکل‌گیری توری عمود بر سطح فلس خمیده می‌شود تا عملکرد خود را تنها در حالت انعکاس نور و نه انتقال آن داشته باشد با کم شدن زاویه دید در نور محیطی ثابت پدیده رنگین‌کمانی در بال ظاهر می‌شود و به ترتیب رنگ‌های قرمز، زرد، سبز، سایان و آبی درک می‌شود. نمونه مونث فاقد این قابلیت است [۳۸]. نمونه جالبی از توری پراش در بال پروانه لونا که توسط ویگنوران و همکارانش^۳ کشف شد، نشان می‌دهد که نور برخوردی به برخی قسمت‌های بال، در توالی رنگی معکوسی نسبت به یک توری پراش معمولی پراکنده می‌شود. در توری پراش معمولی نور سفید با برخورد به توری تجزیه شده و طول موج‌های کوتاه‌تر کمتر از طول موج بلندتر پراشیده می‌شوند. طول موج‌های آبی در زاویه‌ای نزدیک‌تر به خط عمود قرار دارند و سپس سبز و زرد و قرمز هستند. این توالی رنگ زمانی که نور در مسیر خود در ارتباط با عوامل پراش‌کننده دیگری چون فلس‌های کوتیکولی مخصوص قرار بگیرد برعکس می‌شود. علت این اتفاق فرم خمیده هر فلس است (شکل ۷) که باعث می‌شود تناوب توری عمود بر سطح بال باشد. چنین توری عمودی در حالت انتقال نور بر عکس حالت انکسار یک توری پراش معمولی، با صفحات موازی به سطح، عمل می‌کند [۳۷].

رنگ درخشان آبی پروانه معروف مورفو نیز که شاید شناخته‌شده‌ترین نمونه در رنگ‌های ساختاری باشد، در نتیجه ترکیبی از رنگدانه‌ها، تداخل و پراش ایجاد می‌شود [۴۰]. تحقیقات نشان می‌دهد که در این پروانه‌ها تغییر از رنگ

¹ Lamprolenis nitida
² Pierella luna
³ Vigneron et al

شبهه آنچه روی دیسک فشرده است، دارد. این شیارها در طول جفت‌گیری جانور تصاویری را نمایش می‌دهند. برخی کرم‌های پرتاران^۴ نیز از طریق توری‌های پریش رنگ‌های قوس قزح تولید می‌کنند [۱۵]. اثر قوس قزحی همچنین در تارچه یا موی سخت‌پوستان^۵ نیز متداول است که مثالی از آن در نمونه خاصی از شاخک صدقیان^۶ وجود دارد [۴۳]. نمونه‌ای از گونه صدقیان^۷ نیز یک توری پریش اضافی بر روی تاج خود دارند که به منظور ایجاد لبه‌های متناوب به صورت راه‌راه است. صدف مروارید نیز رنگین‌کمان بسیار قوی از رنگ را نشان می‌دهد که با پریش تولید می‌شود. در ابتدا محققانی چون تن و همکارانش^۸ تصور می‌کردند که رنگ‌های قوس قزح در صدف گوش دریا در نتیجه پریش و تداخل است. علت این تصور این بود که آنها پشته‌ای از لایه‌های ناکروس^۹ بلوری نازک را در کنار یک ساختار توری مشاهده کرده بودند. بنابراین تصور می‌شد که لایه‌های ناکروس باعث بروز پدیده تداخل هستند. نهایتاً سوسک قهوه‌ای *Serica sericea* که دارای توری پریش با تناوب ۸۰۰ nm بر روی بالپوش خود است که رنگین‌کمان درخشانی در زیر نور خورشید تولید می‌کند [۱]. توری پریش در گیاهان نیز وجود داشته و یک ویژگی متحیرکننده به شمار می‌آید. تحقیقات اخیر نشان داده که این ویژگی برای زنبورها به عنوان راهنما در شناسایی گل‌های گرده‌دار عمل می‌کند. رنگ درخشان گل‌ها در میان پوشش گیاهی باعث جذب حشرات گرده افشان می‌شود. پوشش‌های گیاهی پیرامون گل‌ها به جهت انعکاس ضعیف نور در طیف بینایی حشره مورد توجه قرار نمی‌گیرند ولی گل‌ها به علت اینکه به صورت انتخابی طول موج‌های نوری خاصی را منعکس می‌کنند درخشان به نظر می‌آیند که این طول موج‌ها از دید حشرات قابل درک هستند [۴۴]. تعدادی از گیاهان با قابلیت توری پریش در جدول ۱ معرفی شده است. نمونه‌هایی از تولید اثر قوس قزح در گیاهان نیز با تلفیقی از توری پریش و سایر سازوکارها چون تداخل لایه وجود دارد.

آبی به بنفش زمانی قابل مشاهده است که زاویه دید نزدیک به سطح بال باشد. در واقع رنگ آبی در محدوده زوایای بزرگتر دیده می‌شود. بال این نوع پروانه‌ها دارای دو لایه فلس بیرونی (پوششی) و داخلی است. در بسیاری از انواع پروانه‌های مورفو لایه داخلی مسئول رنگ ساختاری است [۴۱]. به جز در برخی نمونه‌ها چون آدونیس^۱ که فلس‌های بیرونی معمولاً اندازه مشخصی داشته و از گونه‌ای به گونه دیگر متفاوت هستند. هر دو لایه فلس از تعداد زیادی لبه با فاصله مشخص در راستای طولی خود تشکیل شده‌اند (شبهه درخت کریسمس) که هر کدام رنگ آبی درخشانی را تحت بزرگنمایی از خود نشان می‌دهند. (تصویر ۹) فاصله نرمال بین لبه‌ها حدود ۱ میکرومتر است [۸، ۴۱]. این لبه‌های منظم و مرتب شده به صورت توری پریش عمل می‌کند. البته براساس نتایج تحقیقات ووکوسیک و همکارانش^۲، نقاط پریش تنها در جهت انتقال و نه بازتاب قابل رویت هستند. این نتایج نشان می‌دهد که فاصله بین لبه‌ها مانند توری پریش عمل می‌کند که این توضیح در درک ویژگی رنگ ساختاری در این نوع پروانه بسیار مهم است [۴۲].



تصویر ۹- اسکن میکروسکوپ الکترونی از برش مقطعی فلس داخلی انواع پروانه‌های مورفو، الف) *M. didius* (ب) *M. sulkowskyi* (ج) *M. rhetenor* (د) و *M. Adonis* [۸].

نمونه‌های دیگر از کاربرد توری پریش در نور درخشان سبز رنگ گونه‌ای از صدقیان^۳، وجود دارد. سطح بازتابنده این جانور شیارهای موازی کوچکی

⁴ Polychaete worms

⁵ Crustacea

⁶ Myodocopina ostracods, Crustacea

⁷ Euphilomedes carcharodonta

⁸ Tan et al

⁹ Nacreous layers

¹ M. Adonis

² Vukusic et al

³ Seed shrimps

جدول ۱- نمونه‌هایی از گل‌ها که اثر قوس قزح در آنها به واسطه توری پریش ایجاد می‌شود [۱۷].

گل	تیره
گل بامیه (<i>Hibiscus trionum</i>)	پنیرکیان (Malvaceae)
گل لاله (<i>Tulipa sp</i>)	سوسنیان (Liliaceae)
اولکس یوروپئوس (<i>Ulex europaeus</i>)	بقولات (Fabiaceae)
آدونیس تابستانه (چشم خروس) (<i>Adonis aestivalis</i>)	آلالگان (Ranunculaceae)
<i>Ixia viridiflora</i>	زنبقیان (Iridaceae)
پامچال شب (<i>Oenothera biennis</i>)	گل مغربیان (Onagraceae)
نولانا پارادوکسا (<i>Nolana paradoxa</i>)	سولاناسه (Solanaceae)
گل صدتومانی علفی (<i>Paeonia lactiflora</i>)	صدتومانیان (Paeoniaceae)

رنگین کمان ایجاد شده عمدتاً در طول موج فرابنفش است و اگرچه قابل مشاهده با چشم انسانی نیست، ولی به راحتی توسط حشرات گرده افشان چون زنبور و پرندگان دیده می‌شود. نوارهای کوتیکولی بر روی سطوح اپیدرمی گیاهان بسیار متداول هستند و خاصیت توری پراش آنها به شدت وابسته به میزان منظم چیده شدن آنها دارد. تحقیقات تاکنون نوارهای کوتیکول را در ۱۰ خانواده از گیاهان شناسایی کرده است [۱۱].

۴- نتیجه‌گیری

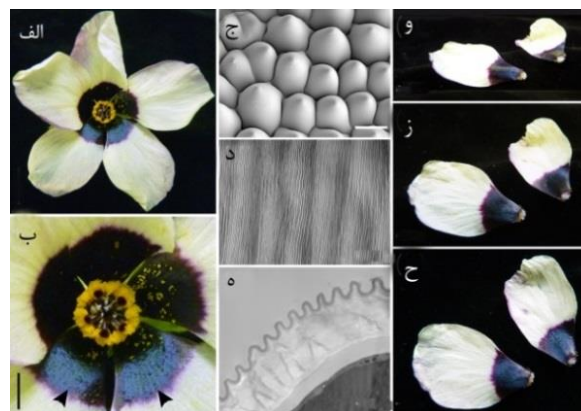
رنگ‌های ساختاری یکی از انواع ساختارهای پدیدآورنده رنگ در طبیعت هستند. رنگ‌های ساختاری در موجودات مختلفی چون حشرات، پرندگان، گیاهان و حتی سنگ‌ها وجود دارند. تفاوت‌های اساسی بین رنگ‌های ساختاری و رنگدانه‌ای در شدت رنگ، ویژگی قوس قزح، مقاومت در برابر مواد مختلف و شرایط محیطی متفاوت است. ویژگی قوس قزحی در رنگ‌های ساختاری یک ویژگی بسیار مهم است و باعث می‌شود تا رنگ‌ها بر اساس تغییر زاویه دید بیننده متفاوت به نظر آیند. در این مقاله رنگ‌های ساختاری به عنوان یکی از انواع رنگ‌های موجود در طبیعت معرفی شده و سازوکارهای مختلف در ایجاد این رنگ‌ها که شامل تداخل لایه، توری پراش، پراکندگی و بلورهای فوتونیک است، مورد بررسی قرار گرفته است. تداخل لایه به دو شکل تداخل لایه نازک و تداخل چند لایه اتفاق می‌افتد و متداول‌ترین روش در طبیعت در ایجاد رنگ‌های ساختاری است. تداخل لایه به ضخامت لایه و ضریب شکست آن وابسته است. پراکندگی در دو نوع هم‌دوس و ناهم‌دوس اتفاق می‌افتد که نمونه شاخص این سازوکار، رنگ آبی آسمان است که در نتیجه پراکنش رابلی از مولکول‌های هوا پدید می‌آید. پرتوهای پراکنده شده می‌توانند تداخل سازنده و یا مخرب با یکدیگر داشته باشند. بلورهای فوتونیک ساختارهای تناوبی در مقیاس نانو هستند که به سه شکل تک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی وجود دارند. توری پراش که قبل از کشف در طبیعت نمونه ساخته شده آن توسط بشر نیز وجود داشت، سطوح راه‌راه توری ماندنی است که نور با برخورد به آن پراشیده می‌شود. توری پراش قادر به تولید رنگ‌های قوس قزح است و نمونه‌های آن در طبیعت نسبت به سایر سازوکارها کمتر یافت می‌شود. توری پراش همچنین به صورت ترکیبی با سایر سازوکارها، به ویژه تداخل لایه وجود دارد. اساس توری پراش بر پدیده براگ استوار است. علاوه بر حشرات نمونه‌های قابل توجهی از این سازوکار در گیاهان نیز وجود دارد که عمدتاً توسط حشرات قابل رؤیت بوده و از دید انسانی پنهان است. از معروف‌ترین نمونه‌های توری پراش در طبیعت سنگ اوپال است که از ذرات کروی شکل به جنس سیلیکای آمورف تشکیل شده و به واسطه قانون براگ پدیده بازی رنگ‌ها در آن ایجاد می‌شود. گونه‌ای از پروانه‌ها با نام لونا و نیتیدا از دیگر نمونه‌های طبیعی هستند که توری پراش به واسطه ساختار میکروسکوپی در فلس‌های بال این پروانه‌ها ایجاد می‌شود. نهایتاً برخی از گیاهان که معروف‌ترین آنها گل لاله و بامیه هستند، به واسطه وجود لایه‌های کوتیکولی به قابلیت خلق رنگ‌های قوس قزحی دست یافته‌اند.

توری پراش در گیاهان بر روی گلبرگ گونه‌ای از لاله (تصویر ۱۰) و گل بامیه^۱ (تصویر ۱۱) وجود دارد که در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. ویتنی و همکارانش^۲ گل لاله را مطالعه کرده و اثر قوس قزح را در آن شناسایی کردند [۱۱].

در این نمونه‌ها سلول‌های اپیدرمی در محل نمایش قوس قزح وجود دارد که با نوارهای دراز و باریک کوتیکول پوشیده شده‌اند که به عنوان توری پراش عمل کرده [۱۷، ۴۵] و نور بازتابانده شده از سطح را به طول موج‌های سازنده خود تقسیم می‌کند. نوارهای کوتیکولی همان بسامد و دامنه توری پراش موجود در سی‌دی را دارند و به همان شیوه تداخل با نور بازتابانده شده مشابه سی‌دی باعث ایجاد رنگ‌های قوس قزحی می‌شوند [۱۱].



تصویر ۱۰- گل لاله شب که رنگ‌های رنگین‌کمانی آن به واسطه وجود نوارهایی در مقیاس میکروسکوپی است که باعث پراش نور می‌شوند [۴۶].



تصویر ۱۱- گل بامیه *Hibiscus trionum* الف و ب) قسمت صورتی رنگ گل ویژگی قوس قزح دارد و رنگ درخشان آبی-سبز-طلایی در این قسمت گلبرگ دیده می‌شود، ج) سلول‌های اپیدرمی در بخش سفید به شکل مخروطی هستند و با کوتیکول پوشیده شده که اثر قوس قزح ندارند، د) سلول‌های اپیدرمی در بخش صورتی رنگ به شکل صاف هستند و با کوتیکول شیاردار پوشیده شده‌اند. ه) بررسی لایه کوتیکول که نشان می‌دهد شیارها مثل توری پراش عمل کرده و اثر قوس قزح ایجاد می‌کنند و ز-ح) گلبرگ گل از زوایای مختلف (۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه) که رنگ‌های متفاوتی را نشان می‌دهد [۴۷].

¹ Hibiscus trionum and Mentzelia lindleyi

² Whitney and et al

۵- مراجع

1. J. Sun, B. Hushan, J. Tong, "Structural coloration in nature", RSC Adv., 3, 14862-14889, **2013**.
2. N. Dushkina, A. Lakhtakiab, "Structural Colors", Engineered Biomimicry edited by Akhlesh Lakhtakia and Raúl J. Martín-Palma, USA, Elsevier, 267-302, **2013**.
3. K. L. Yu, T. X. Fan, S. Lou, D. Zhang, "Biomimetic optical materials: Integration of nature's design for manipulation of light", Prog. Mater. Sci., 58, 825-873, **2013**.
4. B. J. Glover, H. M. Whitney, "Structural colour and iridescence in plants: the poorly studied relations of pigment colour", Annals of Botany, 105, 505-511, **2010**.
5. J. Zi, X. Yu, Y. Li, X. Hu, C. Xu, X. Wang, X. Liu, R. Fu, "Coloration strategies in peacock feathers", PNAS, 22, 100, 12576-12578, **2003**.
6. C. W. Mason, "Structural colors in insects", Phys Chem, 30, 383-395, **1926**.
7. X. Y. Liu, "Bioinspiration: from nano to micro scales", New York, NY, Springer, 276-278, **2012**.
8. S. Kinoshita, S. Yoshioka, "Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure", Phys Chem, 6, 1442-1459, **2005**.
9. Y. Ding, S. Xu, Z. L. Wang, "Structural colors from Morpho peleides butterfly wing scales", J. Appl. Phys., 106 (7), 074702-074706, **2009**.
10. M. H. Amiri, H. M. Shaheen, "Chromatophores and color revelation in the blue variant of the Siamese fighting fish (Betta splendens)", Micron, 43, 159-169, **2012**.
11. C. A. Brebbia, C. Greated, M. W. Collins, "Colour in art, design & nature", Southampton, Boston, WIT Press, **2011**.
12. M. D. Shawkey, N. I. Morehouse, P. Vukusic, "A protean palette: color materials and mixing in birds and butterflies", J. R. Soc. Interface, 6, 221-231, **2009**.
13. S. M. Doucet, M. G. Meadows, "Iridescence: a functional perspective", J. R. Soc. Interface, 6, 115-132, **2009**.
14. S. Kinoshita, "Structural colors in the realm of nature", Singapore, World Scientific, **2008**.
15. A. R. Parker, "515 million years of structural colour", J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2, 15-28, **2000**.
16. S. Kinoshita, S. Yoshioka, J. Miyazaki, "Physics of structural colors", Reports Prog. Phys., 71, 076401-076431, **2008**.
17. M. Kolle, "Photonic structures inspired by nature", Verlag Berlin Heidelberg, Springer Science & Business Media, **2011**.
18. A. E. Seago, P. Brady, J. P. Vigneron, T. D. Schultz, "Gold bugs and beyond: a review of iridescence and structural colour mechanisms in beetles", J. R. Soc. Interface, 6 (Suppl 2), 165-184, **2009**.
19. H. C. Bolton, L. A. Bursill, A. C. McLaren, R. G. Turner, "On the origin of the colour of labradorite", phys stat sol (b), 18, 221-230, **1966**.
20. H. D. Wolpert, "Optical filters in nature", February **2009**, OSA Opt Photon News 20 (2), 22-27, viewed 20 May **2016**, <http://www.osa-opn.org>.
21. S. Zobl, T. R. Matin, B. Y. Majlis, T. Schwerte, M. Schreiner, I. C. Gebeshuber, "Structural colours in the focus of nano engineering and the arts: a survey on state-of-the art developments", Proceedings of the Third European Conference on Tribology and Fourth Vienna International Conference on Nanotechnology, 815-821, Vienna, Austria, **2011**.
22. A. T. Young, "Rayleigh scattering", Phys. Today, 35, 42-48, **1982**.
23. C. F. Bohren, D. R. Huffman, "Absorption and scattering of light by small particles", New York, USA, Wiley, **1983**.
24. R. H. Lipson, C. Lu, "Photonic crystals: a unique partnership between light and matter", Europ. J. Phys., 30, 33-48, **2009**.
25. J. P. Vigneron, P. Simonis, "Structural Colors", Adv. Insect Physiol., 38, 181-218, **2010**.
26. P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence, "Structural colour: Colour mixing in wing scales of a butterfly", Nature, 404, 457, **2000**.
27. A. R. Parker, "A vision for natural photonics", Philos. Trans. R. Soc. London, A 362, 2709-2720, **2004**.
28. C. Palmer, E. Loewen, "Diffraction grating handbook", sixth edition, New York, USA, Newport, **2005**.
29. A. L. Ingram, A. R. Parker, "A review of the diversity and evolution of photonic structures in butterflies", Phil. Trans. R. Soc. B 363, 2465-2480, **2008**.
30. B. K. Hsiung, T. A. Blackledge, M. D. Shawkey, "Structural color and its interaction with other color-producing elements: perspectives from spiders", Proc. of SPIE, The Nature of Light: Light in Nature V, 9187, 91870B, **2014**.
31. S. M. Doucet, M. G. Meadows, "Iridescence: a functional perspective", J. R. Soc. Interface, 6, (Suppl 2), 115-132, **2009**.
32. M. Xiao, A. Dhinojwala, M. D. Shawkey, "Nanostructural basis of rainbow-like iridescence in common bronzing Phaps chalcoptera feathers", Opt. Express, 22 (12), 14625-14636, **2014**.
33. Interference and Colour, Part I – Diffraction Gratings, **November 2011**, Published on C21 Physics Teaching for the 21st Century, viewed **21 May 2016**, <http://c21.phas.ubc.ca/article/interference-and-colour-part-i-diffraction-gratings>
34. 34. Why are CDs, DVDs and opals colored? (diffraction), viewed **28 May 2016**, <http://www.webexhibits.org/causesofcolor/15F.html>
35. C. D. Dushkin, K. Nagayama, T. Miwa, P. A. Kralchevsky, "Colored multilayers from transparent submicrometer Spheres", Langmuir, 9 (12), 3695-3701, **1993**.
36. E. Gaillou, E. Fritsch, B. Aguilar-Reyes, B. Rondeau, J. Post, A. Barreau, M. Ostroumov, "Common gem opal: an investigation of micro-to-nano-structure", Am Miner, 93, 1865-1873, **2008**.
37. M. H. Bartl, "Butterfly-inspired photonics reverse diffraction color sequence", Pans, 44, 111, 15602-15603, **2014**.
38. J. P. Vigneron, P. Simonis, A. Aiello, A. Bay, D. M. Windsor, J. F. Colomer, M. Rassart, "Reverse color sequence in the diffraction of white light by the wing of the male butterfly Pierella luna (Nymphalidae: Satyrinae)", Phys. Rev., E 82, 021903, **2010**.
39. A. L. Ingram, V. Lousse, A. R. Parker, J. P. Vigneron, "Dual gratings interspersed on a single butterfly scale", J. R. Soc Interf, 5, 1387-1390, **2008**.
40. S. Kinoshita, S. Yoshioka, Y. Fujii, N. Okamoto, "Photophysics of structural color in the Morpho butterflies", Forma, 17, 103-121, **2002**.
41. P. Vukusic, J. R. Sambles, C. R. Lawrence, R. J. Wootton, "Quantified interference and diffraction in single Morpho butterfly scales", Proc. R. Soc. Lond., B 266, 1403-1411, **1999**.
42. L. P. Biro, J. P. Vigneron, "Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration", Laser Photonics Rev., 5, 27-51, **2010**.
43. A. R. Parker, "Discovery of functional iridescence and its coevolution with eyes in the phylogeny of Ostracoda (Crustacea)", Proc. R. Soc. London, Ser. B, 262, 349-355, **1995**.

44. P. G. Kevan, M. Giurfa, L. Chittka, "Why are there so many and so few white flowers?", Trends in Plant Sci., 1, 280-284, **1996**.
45. H. M. Whitney, M. Kolle, P. Andrew, L. Chittka, U. Steiner, B. J.Glover, "Floral iridescence, produced by diffractive optics, acts as a cue for animal pollinators", Sci., 323, 130-133, **2009**.
46. C. Meyers, September **2015**, "Understanding Nature's Most Striking Colors", viewed 2 Jun **2016**, [https:// publishing.aip. org /publishing/ journal-highlights /understanding-natures-most-striking-colors](https://publishing.aip.org/journal-highlights/understanding-natures-most-striking-colors).
47. Structural Colours, Cambridge University, Department of Chemistry, viewed 2 Jun **2016**, [http:// www.ch.cam.ac.uk/ group/vignolini/research/structural-colours](http://www.ch.cam.ac.uk/group/vignolini/research/structural-colours).