

الهام زیستی از بلورهای فوتونی و تغییر رنگ در موجودات

فائزه محمدی^۱، فرشته رحیمی^{۱*}، مصطفی نوروزی^۲

چکیده

طبیعت طی تکامل با چالش‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است و بهترین راه‌حل‌ها با کمک انتخاب طبیعی در طول زمان بهبود یافته‌اند و راه‌حلهایی ماندگار با حداکثر کارایی به وجود آورده‌اند. یکی از این چالش‌ها تغییر رنگ در موجودات می‌باشد. مکانیسم‌های متفاوتی برای ایجاد رنگ وجود دارد که یکی از مهمترین آن‌ها استفاده از ساختارهای بلور فوتونی یک تا سه بعدی می‌باشد که منجر به ایجاد رنگ‌های درخشان و رنگین‌مانی می‌شوند. این ساختارها در موجودات مختلفی از جمله حشرات (سوسک‌ها و پروانه‌ها)، پرندگان (پرتاووس)، گیاهان (گل‌های ادلویس)، حیوانات دریایی (ماهی‌ها و کرم دریایی) و ... ایجاد شده است که برای برقراری ارتباط جنسی، رفتار رمزی، سازگاری با محیط اطراف، هشدار و یا فریب شکارچیان استفاده می‌شود. در این مقاله به بررسی تغییر رنگ با استفاده از ساختارهای بلور فوتونی در ماهی‌ها، سوسک‌ها و پروانه‌ها پرداخته می‌شود. در انتها به الگوبرداری از این ساختارها در صنایع مختلفی از جمله رنگ‌های مصنوعی، حسگرها، سلول‌های خورشیدی، نانولیتوگرافی، صفحه‌های نمایشگر و جعل اسکناس اشاره خواهد شد.

واژگان کلیدی: زیست‌الگو، زیست‌الهام، بلور فوتونی، تغییر رنگ، رنگ ساختار

* عهده دار مکاتبات: دانشیار، تلفن: ۸۶۰۹۳۱۵۴ (۹۸۲۱)، پست الکترونیکی: rahimi.f@ut.ac.ir

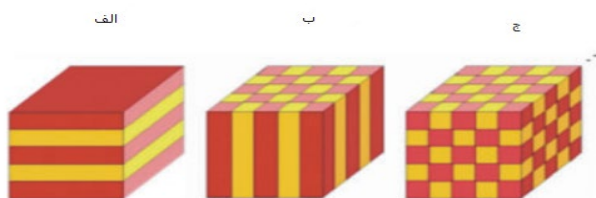
^۱ گروه نانوزیست‌فناوری و زیست‌تقلید، دانشکده مهندسی علوم زیستی، دانشکده‌های علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران

^۲ گروه بیوتکنولوژی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهراء، تهران

زیست الگو و زیست‌الهام

ساختارهای هندسی متکی به کنترل انتقال نور بر روی پوست موجودات ایجاد می‌شود و منجر به ایجاد یک رنگ خاص یا ترکیبی از رنگ‌ها می‌گردد. عوامل اصلی در تولید رنگ ساختاری در طبیعت شامل ضریب شکست، ساختار متناوب نانویی و زاویه نور می‌باشد [۶].

یکی از ساختارهای ایجادکننده رنگ، بلورهای فوتونی می‌باشند. بلورهای فوتونی، مواد فوتونی یک تا سه بعدی در ابعاد نانو با شبکه‌های منظم فضایی می‌باشند که از دو ماده با ضریب شکست‌های متفاوت ساخته شده [۷] و انتشار نور را به روش‌های مختلف کنترل می‌کنند [۷و۸]. در طبیعت، مواد تشکیل‌دهنده این نانو ساختارها به عوامل زیادی از جمله فیزیولوژی ذاتی موجودات، اکولوژی و غیره بستگی دارند (شکل ۱) [۸-۱۱].



شکل ۱: الف) بلور فوتونی یک‌بعدی (چندلایه) ب) بلور فوتونی دوبعدی ج) بلور فوتونی سه‌بعدی [۹]

بلور فوتونی میلیون‌ها سال است که طی تکامل، در دنیای زنده وجود دارند اما حدود چهل سال پیش توسط یابلونوویچ^۶ و جان^۷ به جامعه فیزیک و علوم مواد معرفی گردید [۱۰ و ۱۲ و ۱۳]. هوک^۸، نیوتن^۹ و ریلی^{۱۱} اولین بار مطالعه روی دستگاه‌های نوری با دید زیست‌شناسی را آغاز کردند [۱۴-۱۶]. در سال ۲۰۰۱ اولین فیبر بلور فوتونیک در یک موش دریایی شناسایی شد [۷ و ۹ و ۱۰ و ۱۶ و ۱۷]. نانو ساختارهای فوتونی یک‌بعدی در بعضی از حشرات (پروانه‌ها و سوسک‌ها) [۹]، پرندگان، ماهی‌ها، برگ گیاهان، توت‌ها و جلبک‌ها [۶]، مواد فوتونیک دوبعدی بیشتر در حیوانات دریایی (کرم دریایی^{۱۱}، عروس دریایی خاردار^{۱۲}، ستاره برجسته^{۱۳}، اسفنج شیشه‌ای^{۱۴}، پرندگان طاووس، مرغ سرخابی^{۱۵} و کلاغ) و مواد فوتونیک سه‌بعدی در

اولین بار اشمیت^۱ در سال ۱۹۶۹ واژه‌ی زیست‌الگو^۲ را به کار برد [۱] هرچند که الگوبرداری از طبیعت بسیار قدیمی است [۲ و ۳]. این واژه با نام‌های بیونیک^۳، زیست‌الهام^۴ و بیومیمیکری^۵ نیز شناخته می‌شود [۲]. در سال‌های اخیر اصطلاح «زیست‌الهام» بیش از دو واژه دیگر مطرح و پذیرفته شده است [۴]. طبیعت طی چهار و نیم میلیارد سال تکامل و با کمک انتخاب طبیعی، بسیاری از چالش‌ها را با استفاده از حداقل منابع به راه‌حلی ماندگار با حداکثر کارایی تبدیل نموده، بنابراین اقتباس از روش‌ها، سیستم‌ها و مواد یافت شده در طبیعت مطلوب است [۵].

برای انتقال موفقیت‌آمیز مسائل از طبیعت به مواد مهندسی در ابتدا باید یک مدل طبیعی با عملکرد مناسب انتخاب، سپس رابطه بین ویژگی‌های مواد طبیعی و خصوصیات آنها شناسایی و درک، در نهایت اصول و ایده‌های پدیده‌های طبیعی و سیستم‌های مدل توسط مواد مصنوعی مناسب برای ساختارهای زیست‌الگو پیاده‌سازی شود. مواد زیست تقلید با توجه به خاصیت مواد تشکیل‌دهنده‌شان به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) مواد زیست تقلید ساختاری (۲) مواد زیست تقلید عملکردی و (۳) فرآیندهای مواد زیست تقلیدی [۶]. بیشترین تقلیدها در دو دسته تقلیدی ساختاری و عملکردی جای دارد. از جمله مهمترین خصوصیات مواد زیست تقلید عملکردی، میتوان به ایجاد رنگ‌های متنوع در موجودات توسط ساختارهای بلور فوتونی‌شان اشاره نمود.

مکانیسم ایجاد رنگ در موجودات زنده

زمانی که نور به سطح تابیده می‌شود یک بخشی از آن جذب و بخشی دیگری بازتاب می‌شود که ما به صورت رنگ مشاهده می‌کنیم. مکانیسم‌های زیادی برای تولید رنگ وجود دارد اما بیشتر رنگ موجودات توسط رنگ پیگمنت و رنگ ساختاری ایجاد می‌شود. رنگ ساختاری در مصرف انرژی و استفاده از نور بسیار کارآمدتر است و درخشان‌ترین رنگ در طبیعت می‌باشد که توسط

¹ Schmitt

² Biomimetic

³ Bionic

⁴ Bioinspiration

⁵ Biomimicry

⁶ Yablonoivitch

⁷ John

⁸ Hooke

⁹ Newton

¹⁰ Rayleigh

¹¹ Marine worm

¹² jellyfish

¹³ Brittlestar

¹⁴ Glassspunge

¹⁵ Magpie

یک کامپوزیت چند لایه با ساختاری پیچیده متشکل از نانوفیبرهای کیتین^۳ کریستاله در ماتریس آلی می‌باشد [۳۳]. این ساختار حاوی فضاهایی از هوا می‌باشد (شکل ۳) [۹].



شکل ۳: ساختار کوتیکول در حشرات [۹]

رایج‌ترین ساختار تولید رنگ رنگین‌کمانی در سوسک‌ها، بازتابنده‌های چندلایه‌ای شامل لایه‌های موازی متناوب با ضرایب شکست متفاوت می‌باشد. اگر فاصله این لایه‌ها به یک‌چهارم طول موج نور مرئی نزدیک شود، توسط تداخل سازنده، یک یا چند رنگ تولید می‌شود. لایه‌های موازی نازک از کیتین با مواد مختلفی که در ضریب شکست متفاوت هستند، تشکیل چندلایه‌ای می‌دهند که توسط اپیدرم^۴ ترشح شده و طی اسکروتیزه^۵ سخت می‌شوند (شکل ۴) [۳۴].

سوسک لاک‌پشت^۶ و هرکول^۷ با تغییر مقدار آب در کوتیکول و تغییر ضخامت، رنگ‌های ساختاری خود را ایجاد می‌کنند [۸ و ۶]. *Charidotella egregia*^۸ در مدت زمان ۱/۵ دقیقه رنگ خود را از زرد به قرمز ابتدا در حاشیه بال‌ها و در قسمت‌های بیرونی مرکزی تغییر می‌دهد. این سوسک می‌تواند مایع بدن را به داخل و خارج لایه‌های متخلخل پمپ کند. زمانی که لایه‌ها پر از مایع شوند، لایه‌های متخلخل، محیطی شفاف به وجود می‌آورند که ضریب شکستشان متفاوت از لایه جامد است اما در حالت پایه هنگامی که پمپاژ متوقف می‌شود، لایه‌های متخلخل مایع را از دست می‌دهند و اپی کوتیکول طلائی و درخشان می‌شود (شکل ۵) [۹ و ۳۵].

حشرات (سوسک‌ها و پروانه‌ها) و گیاهان (گل‌های ادا لویس^۱) وجود دارد [۷]. بسیاری از موجودات زنده از تغییر رنگ برای برقراری ارتباط جنسی [۱۷-۲۰]، رفتار رمزی [۲۱-۲۶]، سازگاری با محیط اطراف، هشدار و یا فریب شکارچیان با تقلید و یا استتار [۲۴] استفاده می‌کنند [۷]. در ادامه به مکانیسم تغییر رنگ در ماهی‌ها، سوسک‌ها و پروانه‌ها خواهیم پرداخت.

۱. مکانیسم تغییر رنگ در ماهی‌ها

ساختارهای چندلایه بلور گوانین (ضریب شکست گوانین ۱.۸) مؤلفه اصلی بازتاب نور در بسیاری از ماهی‌ها می‌باشد [۲۷]. ماهی گرمسیری آمریکای جنوبی با نام عمومی *Neon tetra* و نام علمی *Paracheirodon innesi* به‌طور معمول رنگ فیروزه‌ای دارد. تحت شرایط استرس‌زا همچو فرار از شکارچیان، در اثر ورود آب به سلول‌های پوستی و افزایش فاصله بین صفحات مجاور شامل ریزساختار فوتونیک یک‌بعدی چندلایه‌ای، رنگ آبی به سرعت به زرد تغییر می‌کند. یک ایریدوفور^۲ در ترا نئون باعث ایجاد پدیده‌های تداخل نوری چندلایه می‌شود. هر واحد سلولی شامل دو ردیف از صفحات موازی بلور گوانین با ضریب شکست بالا و سیتوپلاسم با ضریب شکست پایین است که باعث تداخل سازنده می‌گردد (شکل ۲) [۸ و ۲۸-۳۰].



شکل ۲: تغییر رنگ ساختاری در *Paracheirodon innesi* [۸]

۲. مکانیسم تغییر رنگ در سوسک‌ها

ساختارهای فیزیکی مسئول رنگ در سوسک‌ها در کوتیکول (معمولاً در اپی کوتیکل) یا در فلس قرار دارند [۳۱ و ۳۲]. کوتیکول

¹Edelweissflowers

²Iridophore

³Chitin

⁴Epidermis

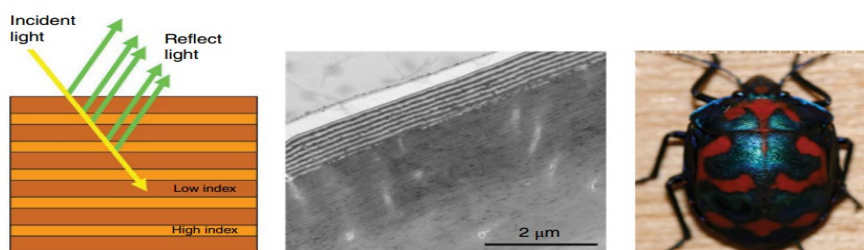
⁵Sclerotization

⁶Tortoise beetle

⁷Hercules beetle

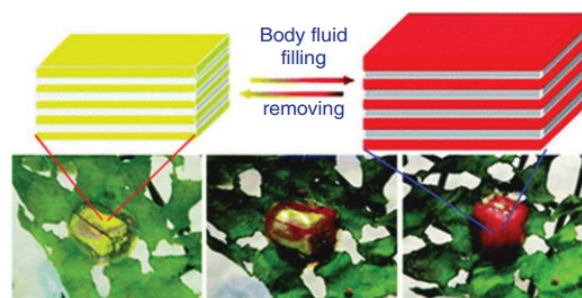
⁸ Panamanian tortoise beetle

الهام زیستی از بلورهای فوتونی و تغییر رنگ در موجودات



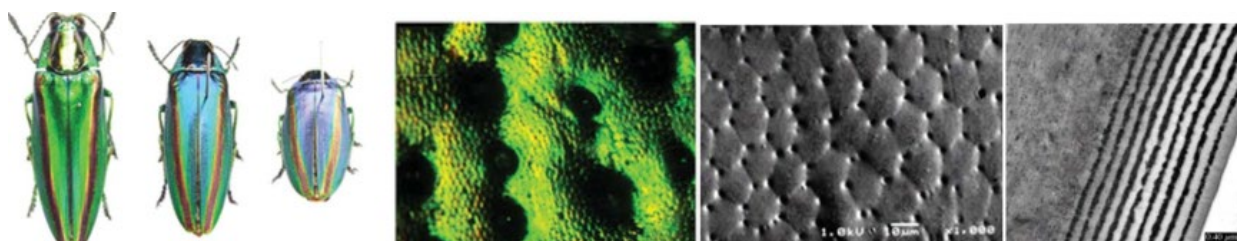
شکل ۴: (الف) بازتابنده‌های چندلایه ساده در کوتیکول، (ب) تصویر TEM از پوسته درونی^۱ و پوسته بیرونی^۲، (ج) رنگ چندلایه ساده در *T. diopthalmus* [۳۴]

سوسک *Hoplia coerulea* رنگ رنگین کمان آبی-بنفش خود را به سبز زمردی تغییر می‌دهد. بال آن از ساختار چندلایه که دارای شبکه سه‌بعدی با نظم کم با مناطق متخلخل پر از هوا تشکیل شده است. صفحات کیتین به صورت میله‌های موازی کنار یکدیگر به فاصله ۱۷۵ نانومتر قرار گرفته‌اند. زمانی که رطوبت به فضای بین این صفحات نفوذ کند، ضریب شکست بین کیتین و حفرات متشکل از هوا به طور چشمگیری کاهش می‌یابد، در نتیجه جذب نور بیشتری ایجاد می‌شود و بال حشره تغییر رنگ می‌دهد (شکل ۷) [۳۶-۳۹].

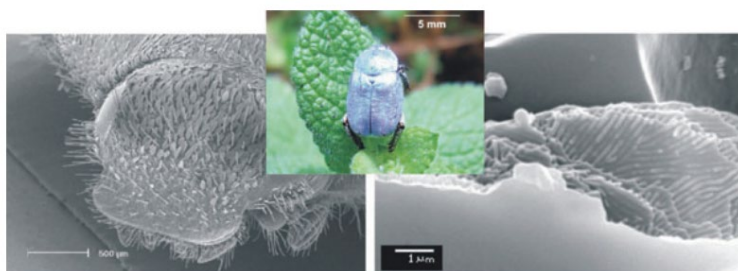


شکل ۵: تغییر رنگ در *Charidotella egregia* [۳۵].

در سوسک جواهر^۳ و سوسک برگ^۴ ناحیه اپی کوتیکول از بازتابنده چندلایه‌ای تشکیل شده است و اپی کوتیکول خارجی عمدتاً به انعکاس کمک می‌کند (شکل ۶) [۲۹].



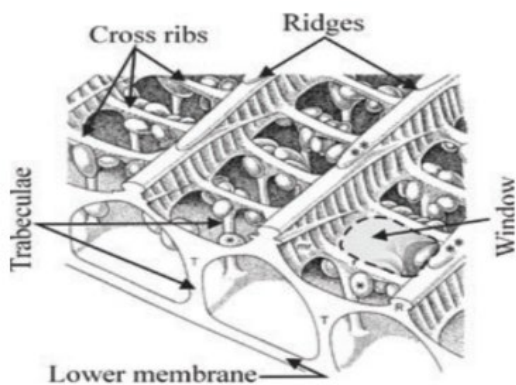
شکل ۶: تصویر پشتی و شکمی سوسک جواهر *Chrysochroa fulgidissima* از زوایای مختلف و میکروساختار از مقطع عرضی و سطح سوسک توسط میکروسکوپ SEM و TEM [۲۹].



شکل ۷: سوسک *Hoplia coerulea* (الف) تصویر SEM از سر سوسک ماده پوشیده شده با فلس، (ب) تصویر SEM از بخش داخلی سر شکافته شده [۳۶-۳۹]

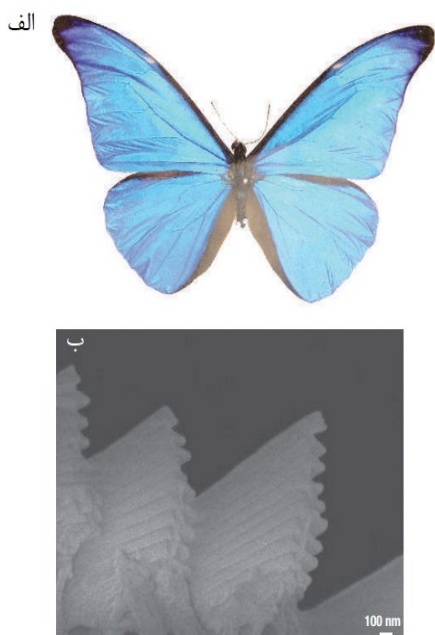
¹Epicuticle
²Exocuticle
³jewel beetle
⁴leaf beetle

و تبدیل آن به انرژی حرارتی توسط کیتین منجر به انبساط ساختار بال و چندین تداخل سازنده می‌گردد [۴۳].



شکل ۸: ساختار شماتیک بال پروانه [۹]

بال‌های پروانه *Morpho didius* دارای ساختار متناوب از ده الی دوازده لایه متناوب کوتیکول و هوا می‌باشد (شکل ۹) [۹].



شکل ۹: بال‌های رنگین‌کمانی یک پروانه مورفو (الف) رنگ آبی در بال و (ب) میکروگراف‌های الکترونی روبشی از ساختارهای پولک بال [۹]

در کوتیکول خارجی^۱ بسیاری از سوسک‌های سرگین خوار^۲، لایه‌هایی از الیاف کیتین به همراه پروتئین یک ساختار مارپیچی ایجاد میکنند که فقط منعکس‌کننده امواج دایره‌ای است [۷]. در سوسک طلا^۳ با نام علمی *Anoplognathus parvulus* تغییر رنگ در بازتابنده کوتیکول داخلی^۴، رخ می‌دهد [۴۰].

۳. مکانیسم تغییر رنگ در پروانه‌ها

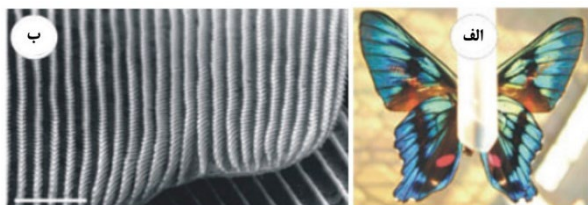
پروانه‌های مورفو گروهی از پروانه‌ها هستند که معمولاً رنگ آبی دارند [۱۷]. رنگ‌هایی که در بال پروانه به وجود می‌آید درخشان و رنگین‌کمانی می‌باشند [۴۱]. اولین بار در سال ۱۹۹۹ مقاله‌ای با موضوع ساختار بلور فوتونی در پروانه مورفو ارائه شد [۴۲]. بال پروانه صفحه‌ای دوتایی از کوتیکول شامل دو نوع پولک می‌باشد که پولک‌های پوششی مسئول رنگ بال هستند. لایه‌های مختلف بال توسط هوا جدا شده است. هر بخش منفرد در بال یک نانوساختار متناوب را نشان می‌دهد که از شاخه‌های عمودی و افقی، شبیه شکل یک درخت تشکیل شده است. ترکیبات اولیه پولک‌ها از جنس کیتین می‌باشد و شکلی از یک ساک^۵ کشیده و صاف دارند. نانوساختارهای فوتونی ممکن است فضای این ساک را اشغال کنند و یا به‌عنوان بخشی از عناصر ساختاری مختلف وجود داشته باشند. ساختارهای موجود در بال پروانه شامل میکروریب با دنده‌های نانوئی^۶، حفره‌های چند لایه‌ای مقعر^۷، شبکه‌های درخشان^۸ و نانولایه‌های تصادفی^۹ می‌باشد [۱۷]. در پولک‌های پروانه مورفو، غشای فوقانی حاوی نانوساختار پیچیده برای ایجاد رنگ ساختاری می‌باشد. برجستگی‌هایی^{۱۰} که به موازات محور پولک کشیده شده‌اند توسط ریب‌ها^{۱۱} به یکدیگر متصل شده و پنجره‌ها^{۱۲} را به وجود می‌آورند که از طریق آنها می‌توان فضای داخلی را مشاهده کرد. نانو ساختارهای مسئول ایجاد رنگ می‌توانند در برجستگی‌ها، ریب‌ها و حفره‌ها قرار گیرند (شکل ۸) [۹].

رنگ رنگین‌کمانی بال مورفو با تداخل نور در بخش‌های افقی و با پراش نور در قسمت‌های عمودی تولید می‌شود. پولک‌ها به تغییرات انرژی گرمایی نیز پاسخ نوری می‌دهند. جذب مادون‌قرمز

¹ exocuticular reflector
² Scarabs beetles
³ gold beetle
⁴ endocuticular reflector
⁵ Sack
⁶ micro-ribs with nanoridges

⁷ concave multilayered pits
⁸ blazed gratings
⁹ randomly punctuated nanolayers
¹⁰ ridges
¹¹ ribs
¹² Window

بال‌های رنگی پروانه *Ancylurismeliboeus* توسط ساختار بلور فوتونی دوبعدی ایجاد می‌گردد. قسمت شکمی بال دارای رنگ بسیار روشن است که از رنگ‌های مختلف آبی، سبز و زرد تشکیل شده است و با حداقل حرکت بال رنگ بسیار چشمگیری را ایجاد می‌کند (شکل ۱۲) [۴۸].



شکل ۱۲: (الف) پروانه *Ancylurismeliboeus*

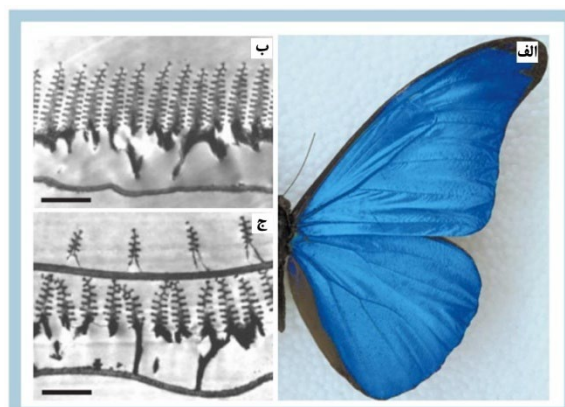
(ب) تصویر SEM از بال [۴۸]

الگوبرداری از ساختارهای بلور فوتونی

مواد فوتونیک دارای پتانسیل‌هایی برای کاربردهای صنعتی، تجاری، نظامی و... هستند. محققان با الهام از این نانو ساختارهای فوتونیک زیستی، مواد فوتونی مصنوعی ایجاد کرده و عملکرد بسیاری از دستگاه‌های نوری را بهبود بخشیده‌اند [۴۹-۵۳]. این کاربردها شامل استفاده مستقیم از نانو معماری‌های تکامل یافته بیولوژیکی [۵۴ و ۵۵] به عنوان الگوهای تولید نانو ساختارهای فوتونیک مصنوعی [۵۶-۵۸] یا ترکیب سیستم‌های مصنوعی-طبیعی [۵۷-۵۹] و یا استخراج اصول پایه‌ای برای طراحی و ساخت انواع محصولات جدید با الهام از نمونه‌های زیستی است [۵۹-۶۹]. در ادامه به بررسی الگوبرداری از کوتیکول سوسک و بال پروانه می‌پردازیم.

۱. الگوبرداری از کوتیکول سوسک در تولید رنگ

با الهام از کوتیکول سوسک *Manuka*، با استفاده از یک لایه نازک متناوب از اکسید تیتانیوم کایرال، بازتابنده‌های براگ برای نور پلاریزه بیضوی ساخته شد. این ساختار در زوایای متفاوت،



شکل ۱۰: (الف) رنگ بال پروانه *Morpho rhetenor*، (ب) تصویر TEM از سطح مقطع عرضی پولک بال و (ج) تصویر TEM از سطح مقطع عرضی از گونه‌های مرتبط *M. didius* [۴۴]

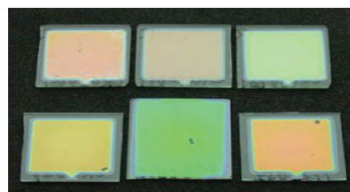
رنگین کمان در پروانه‌های *Morpho rhetenor* مربوط به ساختارهای فوتونیک چندلایه‌ای کوتیکول و هوا می‌باشد (شکل ۱۰) [۴۴].

پروانه *Cyanophrys remus* برای برقراری ارتباطات جنسی در شرایط کم نور جنگل، بازتابنده مبتنی بر بلور فوتونیک دوبعدی (آبی، رنگ فلزی) در پولک‌های پشتی دارد (شکل ۱۱-الف) [۲۲] در حالی که پروانه *Albulina metallica*، برای برقراری ارتباطات جنسی در هیمالیا در شرایط نوری زیاد، با اثرات «آینه‌ای»، دارای رنگ پشتی مات مایل به آبی و رنگ شکمی طلای سبز براق می‌باشد (شکل ۱۱-ب) [۴۵]. یکی از مزایای بزرگ تکامل بیولوژیکی این است که رنگ‌های مشابه با ساختارهای بسیار متفاوت به دست آمده است [۴۶ و ۴۷].



شکل ۱۱: (الف) پروانه *Cyanophrys remus* [۲۲]، (ب)

پروانه *Albulina metallica* [۴۵]



شکل ۱۳: در سمت چپ سوسک *Manuka* و در سمت راست مدل‌های زیست‌الگو (هرکدام در حدود ۲ سانتی‌متر مربع) ساخته شده از تیتانیا که رنگ‌های مختلفی دارند، مشاهده می‌شود [۱۷].

در سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ^۱ یا سلول‌های گراتزل^۲ استفاده شد [۶۴].

ج) نانو لیتوگرافی: از بال پروانه به‌عنوان الگویی برای تولید ZnO استفاده شده است [۶۶].

د) صفحه‌های نمایشگر: با الهام از اصول استفاده شده در ایجاد رنگ در بال پروانه، نمایشگرهای رنگی ساخته شده است. تغییر در فواصل فضایی منجر به تغییر سریع رنگ می‌گردد. این صفحات تخت حتی در شرایط کم‌نور نیز رنگ‌های واضحی را نشان می‌دهند و نسبت به سایر روش‌های نمایش الکترونیکی به انرژی کمتری نیاز دارند (شکل ۱۴) [۴۴].

ه) تولید رنگ‌های مصنوعی: تولید رنگ‌های مصنوعی با الهام از نانو ساختارهای موجود در بال پروانه در نساجی و خودروسازی استفاده شده است. هنگام استفاده از رنگ، فیلم‌های نازک داخل ماتریس روی سطح شناور می‌باشند و همه آنها طول موج یکسانی را در یک جهت منعکس می‌کنند. در نتیجه، با تغییر جهت مشاهده، رنگ‌های متفاوتی مشاهده می‌شود [۱۱].

و) جعل اسکناس: با الهام از پولک‌های صاف پروانه *Cyanophrys remus* و پولک‌های دارای انحنا زیاد *S. Coronate*، فناوری پیچیده‌ای برای جلوگیری از جعل اسکناس ایجاد شده است. انحنا پولک باعث ایجاد اثرات قطبی خاصی می‌شود [۶۳].

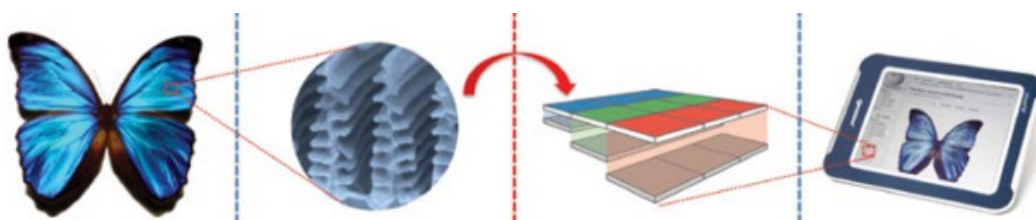
رنگ‌های مختلفی به خود می‌گیرد که دقیقاً به همان رنگ کوتیکول می‌باشد. از این ساختار می‌توان در نمایشگرها و فناوری‌های لیزری استفاده نمود (شکل ۱۳) [۶۱ و ۱۷].

۲. الگوبرداری از بال پروانه

از بال پروانه در ساخت حسگر، سلول‌های خورشیدی، نانو لیتوگرافی، صفحه‌های نمایشگر و تولید رنگ‌های مصنوعی الگوبرداری شده است. **الف) ساخت حسگر:** بال‌های پروانه مورفو برای سنجش شیمیایی انتخابی بر اساس تغییرات کوچک اما قابل اندازه‌گیری ضریب شکست هوا در حضور گازها و بخارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از بال‌های *Morpho sulkowskyi* و تجزیه و تحلیل داده‌ها، میزان حساسیت شیمیایی انتخابی در بازتاب اندازه‌گیری شده از بال نشان داده شد [۵۴].

بال *Chrysidia rypheus* سیگنال‌های متمایزی برای هفت بخار مختلف از حلال آلی در چند ثانیه ارائه می‌دهد [۵۵]. از جمله مزیت‌های استفاده از بال‌های پروانه به‌عنوان حسگر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: امکان خواندن سیگنال نوری بدون سیم‌کشی (در محیط‌های خطر انفجار)، ارزان بودن هزینه تولید و سازگار با محیط زیست [۹]. ساخت حسگرهای حرارتی بر اساس ساختار بال‌های مورفو در حال انجام است تا اندازه پیکسل را کاهش دهند [۶۵].

ب) سلول‌های خورشیدی: از بال پروانه برای افزایش به دام اندازی نور



شکل ۱۴: نمایشگرهای رنگی با الهام از بال مورفو [۴۴].

¹Dye sensitized solar cells

²Gratzel

نتیجه‌گیری

از جمله چالش‌های طبیعت در طول دوره تکامل، تغییر رنگ در موجودات می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها برای تغییر رنگ، استفاده از ساختارهای بلور فوتونی یک تا سه بعدی می‌باشد که با کنترل نور به روش‌های مختلف منجر به ایجاد رنگ‌های درخشان و رنگین‌کمانی می‌گردد. موجودات از تغییر رنگ برای برقراری ارتباط جنسی، رفتار رمزی، سازگاری با محیط اطراف، هشدار و یا فریب شکارچیان استفاده می‌کنند. مهندسان با الگوبرداری از این ساختارها و مکانیسم‌ها، تحولات شگرفی در صنایع مختلف ایجاد کرده‌اند.

* به استحضار می‌رساند این مقاله کل یا بخشی از آن در جایی به چاپ نرسیده است.

منابع و ماخذ

- [11]. Parker, A. R. (2004). A vision for natural photonics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 362(1825), 2709-2720.
- [12]. Yablonovitch, E. (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Physical review letters*, 58(20), 2059.
- [13]. John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Physical review letters*, 58(23), 2486.
- [14]. Hooke, R. (2003). *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses, with observations and inquiries thereupon*. Courier Corporation.
- [15]. Newton, I. (1952). *Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light*. Courier Corporation.
- [16]. Rayleigh, L. (1919). VII. On the optical character of some brilliant animal colours. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 37(217), 98-111.
- [17]. He, X., Ma, Y., Xie, H., Rao, G., Yang, Z., Zhang, J., & Feng, Z. (2021). Biomimetic nanostructure platform for cancer diagnosis based on tumor biomarkers. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 687664.
- [18]. Kemp, D. J. (2007). Female butterflies prefer males bearing bright iridescent ornamentation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1613), 1043-1047.
- [19]. Kemp, D. J. (2008). Female mating biases for bright ultraviolet iridescence in the butterfly *Eurema hecabe* (Pieridae). *Behavioral Ecology*, 19(1), 1-8.
- [20]. Loyau, A., Gomez, D., Moureau, B., Théry, M., Hart, N. S., Jalme, M. S., ... & Sorci, G. (2007). Iridescent structurally based coloration of eyespots correlates with mating success in the peacock. *Behavioral Ecology*, 18(6), 1123-1131.
- [21]. Merilaita, S., Tuomi, J., & Jormalainen, V. (1999). Optimization of cryptic coloration in heterogeneous habitats. *Biological Journal of the Linnean Society*, 67(2), 151-161.
- [22]. Kertész, K., Bálint, Z., Vértesy, Z., Márk, G. I., Lousse, V., Vigneron, J. P., ... & Biró, L. P. (2006). Gleaming and dull surface textures from photonic-crystal-type nanostructures in the butterfly *Cyanophrys remus*. *Physical Review E*, 74(2), 021922.
- [23]. Bond, A. B., & Kamil, A. C. (2002). Visual predators select for crypticity and polymorphism in virtual prey. *Nature*, 415(6872), 609-613.
- [24]. GD, R. (2004). Sherratt, TN, Speed, M: *Avoiding Attack: The Evolutionary Ecology of Crypsis, Warning Signals and Mimicry*.
- [25]. Arikath, J., & Campbell, K. P. (2003). Auxiliary subunits: essential components of the voltage-gated calcium channel complex. *Current opinion in neurobiology*, 13(3), 298-307.
- [1]. Schmitt, O. H. (1969, August). Some interesting and useful biomimetic transforms. In *Third Int. Biophysics Congress* (Vol. 1069, p. 197).
- [2]. Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics—using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration & biomimetics*, 1(1), P1.
- [3]. زینب موسوی موحدی، "فناوری های جدید بر مبنای دانش زیست الگو و الهام زیستی " فصلنامه نشاء علم، مجلد ۷، شماره ۱ سال ۱۳۹۵، صفحات ۵۳-۶۱
- [4]. Zan, G., & Wu, Q. (2016). Biomimetic and bioinspired synthesis of nanomaterials/nanostructures. *Advanced Materials*, 28(11), 2099-2147.
- [5]. علی اکبر موسوی موحدی "زیست الگو: همگرایی در علم و حکمت" فصلنامه نشاء علم، مجلد ۴، شماره ۱، ۱۳۹۲، صفحات ۹-۶
- [6]. Xia, Z. (2016). *Biomimetic principles and design of advanced engineering materials*. John Wiley & Sons.
- [7]. Sun, J., B. Bhushan, and J.J.R.A. Tong, *Structural coloration in nature*. 2013. 3(35): p. 14862-14889.
- [8]. Zhao, Y., Xie, Z., Gu, H., Zhu, C., & Gu, Z. (2012). Bio-inspired variable structural color materials. *Chemical Society Reviews*, 41(8), 3297-3317.
- [9]. Biro, L. P., & Vigneron, J. P. (2011). Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration. *Laser & Photonics Reviews*, 5(1), 27-51.
- [10]. Parker, A.R.J.M.t., *Natural photonic engineers*. 2002. 5(9): p. 26-31.

- Hoplia coerulea* (Coleoptera). In *Biomimetics and Bioinspiration* (Vol. 7401, pp. 118-125). SPIE.
- [39]. Rassart, M., Colomer, J. F., Tabarrant, T., & Vigneron, J. P. (2008). Diffractive hydrochromic effect in the cuticle of the hercules beetle *Dynastes hercules*. *New Journal of Physics*, 10(3), 033014.
- [40]. Parker, A. R., McKenzie, D. R., & Large, M. C. (1998). Multilayer reflectors in animals using green and gold beetles as contrasting examples. *Journal of experimental biology*, 201(9), 1307-1313.
- [41]. Saranathan, V., Osuji, C. O., Mochrie, S. G., Noh, H., Narayanan, S., Sandy, A., ... & Prum, R. O. (2010). Structure, function, and self-assembly of single network gyroid (I 4132) photonic crystals in butterfly wing scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11676-11681.
- [42]. Vukusic, P., Sambles, J. R., Lawrence, C. R., & Wootton, R. J. (1999). Quantified interference and diffraction in single *Morpho* butterfly scales. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 266(1427), 1403-1411.
- [43]. Ragaei, M., A.-K.H. Sabry, and A.J.B.R. Abdel-Rahman, *Insect's photonic crystals and their applications*. 2016. 13(1): p. 15-20.
- [44]. Vukusic, P. and J.R.J.N. Sambles, *Photonic structures in biology*. 2003. 424(6950): p. 852-855.
- [45]. Biró, L. P., Kertész, K., Vértesy, Z., Márk, G. I., Bálint, Z., Lousse, V., & Vigneron, J. P. (2007). Living photonic crystals: butterfly scales—nanostructure and optical properties. *Materials Science and Engineering: C*, 27(5-8), 941-946.
- [46]. Preble, S., Lipson, M., & Lipson, H. (2005). Two-dimensional photonic crystals designed by evolutionary algorithms. *Applied Physics Letters*, 86(6).
- [47]. Gondarenko, A., Preble, S., Robinson, J., Chen, L., Lipson, H., & Lipson, M. (2006). Spontaneous emergence of periodic patterns in a biologically inspired simulation of photonic structures. *Physical review letters*, 96(14), 143904.
- [48]. Vukusic, P. S. J. R., Sambles, J. R., Lawrence, C. R., & Wootton, R. J. (2002). Limited-view iridescence in the butterfly *Ancyluris meliboeus*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 269(1486), 7-14.
- [49]. Finlin, B. S., Crump, S. M., Satin, J., & Andres, D. A. (2003). Regulation of voltage-gated calcium channel activity by the Rem and Rad GTPases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(24), 14469-14474.
- [50]. McGee, A. W., Dakoji, S. R., Olsen, O., Bredt, D. S., Lim, W. A., & Prehoda, K. E. (2001). Structure of the SH3-guanylate kinase module from PSD-95 suggests a mechanism for regulated assembly of MAGUK scaffolding proteins. *Molecular cell*, 8(6), 1291-1301.
- [26]. Dolphin, A. C. (2003). β subunits of voltage-gated calcium channels. *Journal of bioenergetics and biomembranes*, 35, 599-620.
- [27]. Catterall, W. A. (2000). Structure and regulation of voltage-gated Ca^{2+} channels. *Annual review of cell and developmental biology*, 16(1), 521-555.
- [28]. Welch, V., Vigneron, J. P., Lousse, V., & Parker, A. (2006). Optical properties of the iridescent organ of the comb-jellyfish *Beroë cucumis* (Ctenophora). *Physical Review E*, 73(4), 041916.
- [29]. Kinoshita, S., & Yoshioka, S. (2005). Structural colors in nature: the role of regularity and irregularity in the structure. *ChemPhysChem*, 6(8), 1442-1459.
- [30]. Yoshioka, S., Matsuhana, B., Tanaka, S., Inouye, Y., Oshima, N., & Kinoshita, S. (2011). Mechanism of variable structural colour in the neon tetra: quantitative evaluation of the Venetian blind model. *Journal of the Royal Society Interface*, 8(54), 56-66.
- [31]. Seago, A. E., Brady, P., Vigneron, J. P., & Schultz, T. D. (2009). Gold bugs and beyond: a review of iridescence and structural colour mechanisms in beetles (Coleoptera). *Journal of the Royal Society Interface*, 6(suppl_2), S165-S184.
- [32]. Welch, V., Lousse, V., Deparis, O., Parker, A., & Vigneron, J. P. (2007). Orange reflection from a three-dimensional photonic crystal in the scales of the weevil *Pachyrrhynchus congestus pavonius* (Curculionidae). *Physical Review E*, 75(4), 041919.
- [33]. Lenau, T., & Barfoed, M. (2008). Colours and metallic sheen in beetle shells—a biomimetic search for material structuring principles causing light interference. *Advanced Engineering Materials*, 10(4), 299-314.
- [34]. Fabricant, S. A., Kemp, D. J., Krajčiček, J., Bosakova, Z., & Herberstein, M. E. (2013). Mechanisms of color production in a highly variable shield-back stinkbug, *Tectocoris diopthalmus* (Heteroptera: Scutelleridae), and why it matters. *PLoS One*, 8(5), e64082.
- [35]. Vigneron, J. P., Pasteels, J. M., Windsor, D. M., Vértesy, Z., Rassart, M., Seldrum, T., ... & Welch, V. (2007). Switchable reflector in the Panamanian tortoise beetle *Charidotella egregia* (Chrysomelidae: Cassidinae). *Physical Review E*, 76(3), 031907.
- [36]. Vigneron, J. P., Colomer, J. F., Vigneron, N., & Lousse, V. (2005). Natural layer-by-layer photonic structure in the squamae of *Hoplia coerulea* (Coleoptera). *Physical Review E*, 72(6), 061904.
- [37]. Rassart, M., Simonis, P., Bay, A., Deparis, O., & Vigneron, J. P. (2009). Scale coloration change following water absorption in the beetle *Hoplia coerulea* (Coleoptera). *Physical Review E*, 80(3), 031910.
- [38]. Vigneron, J. P., Rassart, M., Simonis, P., Colomer, J. F., & Bay, A. (2009, August). Possible uses of the layered structure found in the scales of

- possible source of "blueprints". *Materials Science and Engineering: B*, 149(3), 259-265.
- [61]. Vigneron, J. P., Rassart, M., Vandembem, C., Lousse, V., Deparis, O., Biró, L. P., ... & DeFrance, P. (2006). Spectral filtering of visible light by the cuticle of metallic woodboring beetles and microfabrication of a matching bioinspired material. *Physical Review E*, 73(4), 041905.
- [62]. Wang, J., Liang, J., Wu, H., Yuan, W., Wen, Y., Song, Y., & Jiang, L. (2008). A facile method of shielding from UV damage by polymer photonic crystals. *Polymer international*, 57(3), 509-514.
- [63]. Berthier, S., Boulenguez, J., & Bálint, Z. (2007). Multiscaled polarization effects in *Suneve coronata* (Lepidoptera) and other insects: application to anti-counterfeiting of banknotes. *Applied Physics A*, 86, 123-130.
- [64]. Zhang, W., Zhang, D., Fan, T., Gu, J., Ding, J., Wang, H., ... & Ogawa, H. (2009). Novel photoanode structure templated from butterfly wing scales. *Chemistry of Materials*, 21(1), 33-40.
- [65]. Pris, A. D., Utturkar, Y., Surman, C., Morris, W. G., Vert, A., Zalyubovskiy, S., ... & Potyrailo, R. A. (2012). Towards high-speed imaging of infrared photons with bio-inspired nanoarchitectures. *Nature Photonics*, 6(3), 195-200.
- [66]. Zhang, W., Zhang, D., Fan, T., Ding, J., Gu, J., Guo, Q., & Ogawa, H. (2006). Biomimetic zinc oxide replica with structural color using butterfly (*Ideopsis similis*) wings as templates. *Bioinspiration & Biomimetics*, 1(3), 89.
- [67]. Gale, M. (1989). Diffraction, beauty and commerce. *Physics World*, 2(10), 24.
- [68]. Sun, C. H., Jiang, P., & Jiang, B. (2008). Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon. *Applied Physics Letters*, 92(6)/061112.
- [69]. Zada, I., Zhang, W., Li, Y., Sun, P., Cai, N., Gu, J., ... & Zhang, D. (2016). Angle dependent antireflection property of TiO₂ inspired by cicada wings. *Applied Physics Letters*, 109(15)/153701.
- [51]. Takemura, S. Y., Stavenga, D. G., & Arikawa, K. (2007). Absence of eye shine and tapetum in the heterogeneous eye of *Anthocharis* butterflies (Pieridae). *Journal of Experimental Biology*, 210(17), 3075-3081.
- [52]. Zhao, N., Wang, Z., Cai, C., Shen, H., Liang, F., Wang, D., ... & Xu, J. (2014). Bioinspired materials: from low to high dimensional structure. *Advanced Materials*, 26(41), 6994-7017.
- [53]. Takeoka, Y. (2015). Fusion materials for biomimetic structurally colored materials. *Polymer Journal*, 47(2), 106-113.
- [54]. Potyrailo, R. A., Ghiradella, H., Vertiatchikh, A., Dovidenko, K., Cournoyer, J. R., & Olson, E. (2007). Morpho butterfly wing scales demonstrate highly selective vapour response. *Nature Photonics*, 1(2), 123-128.
- [55]. Biró, L. P., Kertész, K., Vértesy, Z., & Bálint, Z. (2008, August). Photonic nanoarchitectures occurring in butterfly scales as selective gas/vapor sensors. In *The Nature of Light: Light in Nature II* (Vol. 7057, pp. 44-51). SPIE.
- [56]. Zhang, G., Zhang, J., Xie, G., Liu, Z., & Shao, H. (2006). Cicada wings: a stamp from nature for nanoimprint lithography. *Small*, 2(12), 1440-1443.
- [57]. Huang, J., Wang, X., & Wang, Z. L. (2006). Controlled replication of butterfly wings for achieving tunable photonic properties. *Nano letters*, 6(10), 2325-2331.
- [58]. Silver, J., Withnall, R., Ireland, T. G., Fern, G. R., & Zhang, S. (2008). Light-emitting nanocasts formed from bio-templates: FESEM and cathodoluminescent imaging studies of butterfly scale replicas. *Nanotechnology*, 19(9), 095302.
- [59]. Zhu, S., Zhang, D., Li, Z., Furukawa, H., & Chen, Z. (2008). Precision replication of hierarchical biological structures by metal oxides using a sonochemical method. *Langmuir*, 24(12), 6292-6299.
- [60]. Kertész, K., Molnár, G., Vértesy, Z., Koós, A. A., Horváth, Z. E., Márk, G. I., ... & Biró, L. P. (2008). Photonic band gap materials in butterfly scales: A

Bioinspiration of Photonic Crystals and Color Change in Organisms

Faeze Mohammadi¹, Freshteh Rahimi^{*1}, Mostafa Noroozi²

During the process of evolution, nature has encountered a multitude of challenges, which have been met with the development of optimal solutions through the mechanism of natural selection. These solutions have undergone refinement over time, resulting in the creation of highly efficient and enduring strategies. One particular challenge that nature has faced is the phenomenon of color change in organisms. A significant mechanism for generating color involves the utilization of one- to three-dimensional photonic crystal structures, which give rise to bright and rainbow colors. These structures have been observed in a variety of organisms, including insects (such as cockroaches and butterflies), birds (such as peacock feathers), plants (such as Edelweiss flowers), and marine animals (such as fishes and sea worms). The phenomenon of color change facilitated by these structures serves a range of purposes, such as sexual communication, cryptic behavior, adaptation to the environment, and the deterrence or deception of predators. In this review, we address the photonic crystal structure-mediated color change in fish, beetles, and butterflies. Finally, we explore various industries bioinspired of these structures, including artificial colors, sensors, solar cells, nanolithography, display screens, and banknote counterfeiting.

Keywords: Biomimetic, Bioinspiration, Photonic Crystal, Color Change, Structural Color

* Corresponding Author. Associate Professor, Tel/Fax: (9821)86093154, Email: rahimi.f@ut.ac.ir

¹ Department of Nanobiotechnology and Biomimetics, School of Life Science Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

² Faculty of Biological Sciences, Department of Biotechnology, University of Alzahra, Tehran, Iran