

تصویرهای رنگی این مقاله
در صفحه ۳ جلد آمده است

سفری به بال رنگارنگ پروانه‌ها

مهدیه سالار کیا

چکیده

دانشمندان پس از بررسی‌های دوبعدی، با تکیه به دستگاه‌ها و روش‌های پیشرفته و امروزی موفق به تشخیص دقیق ساختار سلول‌ها در بال پروانه شده‌اند و در کمال شگفتی علت رنگی بودن بال‌های پروانه را وابسته به شکل هندسی این سلول‌ها دانسته‌اند. در این مقاله سازوکار تولید رنگ توسط این سلول‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. کلیدواژه‌ها: ریزساختار، بلورهای نوری، ژئوپرید، گروه فضایی، غشای اسکلتی، غشای پلاسمایی

آغاز سخن

نگاه جست‌وجوگر انسان همواره در طراحی روند تکاملی حیاتش، طبیعت را الهام‌بخش خود قرار داده است. طبیعت نیز در گذر زمان همواره شگفتی‌هایی را که از خلقت در آستین داشته، در برابر دیدگان کنجکاو بشر به نمایش گذاشته است. پروانه‌ها را می‌توان نمونه شاهکارهایی بی‌مانند از این دست دانست که بی‌تردید با نمایش زیبایی‌های خود و افسونگری در دامن طبیعت، ذهن پرسش‌گر بشر را به خود جلب کرده‌اند که: این تنوع رنگ و تلفیق طرح‌های گوناگون در بال این موجود از کجا ناشی می‌شود و سازوکار نهفته در این آفریننده چیست؟ این رازی بود که طبیعت آن را میلیون‌ها سال در نهاد خود پنهان می‌کرد اما هم‌اکنون با تکیه به ابزارهای پیشرفته امکان پرده‌برداری از آن توسط پژوهشگران ممکن شده است.



شکل ۱ ساختار ژیریوید و نمایی نزدیک از بال پروانه

که جهت گیری های متفاوت آن ها در برابر نور به تولید رنگ های گوناگون می انجامد. دانشمندان برای این سلول ها نام ژیریوید^۲ را برگزیده اند؛ ریز ساختارهایی که نور خورشید را هم چون یک بلور پراکنده می کنند و عملکرد انتخابی و متنوع آن ها رنگ های متفاوتی می آفریند.

ژیریوید چیست؟

ژیریوید شکلی شبیه یک بومرنگ است. این نام برگرفته از واژه gyrating، به معنی مارپیچی یا چرخشی است. در سال ۱۹۷۰، دانشمندی به نام آلن اچ. شوئن^۳ این شکل را به عنوان یکی از گروه های فضایی معرفی کرد.

ژیریوید در بدن پروانه، مرکب از سه استخوان پهن است که در راستاهای مختلف، جهت گرفته اند؛ درست مانند یک بادبزن یا فرفره. کوچک ترین حرکت در بال پروانه در جهت گیری ژیریویدها و حرکت در بال پروانه در جهت گیری ژیریویدها و

فیزیک نوری و رنگ آفرینی

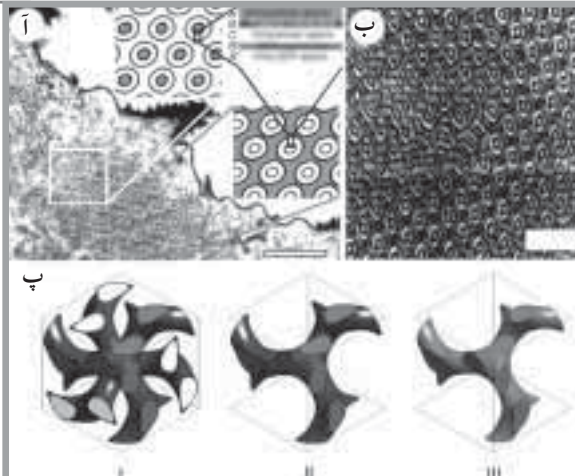
نزدیک ترین راه برای رمزگشایی از این شاهکار این است که به سادگی بپذیریم که رنگدانه ها مسئول چنین اثری بوده اند. اما در کمال شگفتی باید گفت که هیچ رنگدانه ای در بال پروانه ها وجود ندارد. این طرح ها و رنگ های خیره کننده تنها و تنها، از داربستی نتیجه می شود که سلول های بال پروانه در آن جای گرفته اند. به طور خلاصه باید گفت شکل هندسی این سلول ها و چگونگی رفتار آن ها در برابر نور، چنین فریبندگی ای را به صاحبانش بخشیده است.

از دیرباز پژوهشگران، علاقه مند به کشف ساختار سلولی بال پروانه بوده اند اما از آن جا که در این زمینه آن ها تنها به تصویرهای دوبعدی حاصل از میکروسکوپ الکترونی دسترسی داشتند، از درک واقعی این ساختارهای سه بعدی ناتوان بودند. هم اکنون به کمک روش هایی کارآمد هم چون پراش پرتوهای X با زاویه کوچک^۴، مشخص شده است که تولید رنگ در بال پروانه از برهم کنش های فیزیکی نور با مواد زیستی موجود در بال پروانه ناشی می شود. این مواد زیستی بلورهای نوری یا ریزساختارهای سه بعدی پیچیده ای هستند

ژیریوید در بدن پروانه، مرکب از سه استخوان پهن است که در راستاهای مختلف، جهت گرفته اند؛ درست مانند یک بادبزن یا فرفره. کوچک ترین حرکت در بال پروانه در جهت گیری ژیریویدها و در نتیجه، در عملکرد آن ها در برابر نور، تغییر ایجاد می کند

شکل ۲ نمایش ریزساختارهای نوری بال پروانه:

(A) مقطع TEM یک سلول شکمی پروانه، تا خوردگی پیچیده غشا، پلاسمایی و غشا، SER را نشان می دهد. بافت مشخص ریزساختار، دو حلقه هم مرکز را در بردارد که در یک شبکه مثلثی قرار گرفته اند. سایه - روشن های مختلف نشان دهنده تفاوت بخش های موجود در این بافت است. در اینجا سطح یک ژیریوید دوتایی شامل ۵ بخش، از قشر تا هسته آن به صورت ABCBA مشاهده می شود؛ A فضای بیرون سلولی، B غشا، پلاسمایی، C فضای سیتوپلاسمی، B' غشا، SER و A' فضای درون سلولی است. (ب) بخش های ABC نمونه ای از یک هم پسار (کوپلی مر) سه جزیی است. (پ) مدل سه بعدی سلول بال پروانه؛ (I) سلول واحد ژیریوید دوتایی شامل ۵ بخش ABCBA، (II) یک ژیریوید تک که غشا، پلاسمایی سلول آن در اطراف فضای بیرون سلولی دیده می شود. (III) با مرگ سلول، سیتوپلاسم و غشا، سلولی یعنی بخش های BCBA، جای خود را به هوا می دهند و پشت ژیریوید از کپتین خالی می شود.



تشکیل ریزساختارها

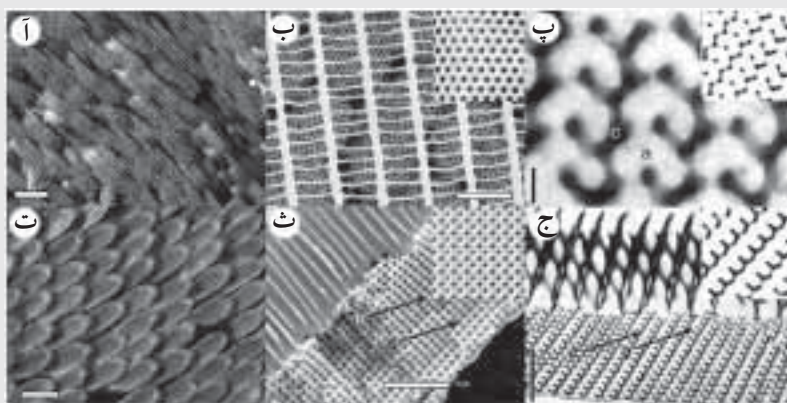
بنابه تصویرهای به دست آمده از روش فرافروستی میکروسکوپ الکترونی^۶، TEM، ریزساختارها در جریان برهم کنشی درونی میان غشاء پلاسمایی سلول با غشاء اندوپلاسمی بسیار نازک و ظریف درونی^۷، یک جفت غشاء چربی دولایه تشکیل می دهند که دولایه آن به طور موازی با یکدیگر قرار دارند و سیتوپلاسم سلولی، میان آنها فاصله می اندازد. مقطع عرضی تصویر TEM، این فرایند را نشان می دهد درحالی که بافت مشخصی از دو دایره هم مرکز در یک شبکه مثلی مشاهده می شود. بخش های سایه روشن، ناحیه های متفاوت را در صفحه یک ژئروید دوتایی شامل هسته لایه نشان می دهد که به صورت ABCB'A' نشان داده شده است که در آن فضای بیرون سلولی، B غشای پلاسمایی، C توده سیتوپلاسمی، B' غشای نازک اندوپلاسمی و A' فضای درون سلولی است، شکل ۳.

روش SER، ظرفیت فیزیکی غشاء چربی دولایه و اندامک های سلولی دیگر را در خودسازی ساختارهای زیست شناختی به روشنی نشان داده است. این غشاء مقدار پروتیین مورد نیاز را تنظیم کرده، در ادامه، برهم کنش های الکترواستاتیکی

در نتیجه، در عملکرد آنها در برابر نور تغییر ایجاد می کند. ساختار ژئروید باعث می شود که همه طول موج های نور از بال عبور کند بجز یکی، که بازتابش می یابد. آنچه رنگ نور را کنترل می کند اندازه ژئروید است. هرچه ژئروید کوچک تر باشد رنگ مشاهده شده در بال، به آبی نزدیک تر است وگرنه، بال بیش تر به رنگ های نزدیک به سرخ دیده می شود. پس، تغییر اندازه این ریزساختارهای زیستی است که به بال پروانه رنگ های مختلف می دهد.

سازوکار تولید رنگ

بلورهای سه بعدی زیست شناختی شامل شبکه ای پیچیده از کیتین^۸ کوتیکولی^۹ اند که همراه با هوا تولید رنگ در بال پروانه را به عهده دارند. سطح پستی بال پروانه شبکه ای از شیارهای بلند و موازی را دربردارد که با بافت عرضی به هم متصلند و شکلی شبیه یک پنجره، درون سلول بال ایجاد کرده اند. بلورهای نوری یا به صورت بلورهای ناپیوسته، یا تکه های تک از میدان های بلوری نوری جوش خورده درون بال قرار دارند و جهت گیری آنها در برابر نور عامل اصلی تولید رنگ های متفاوت در پروانه هاست.



شکل ۳ بررسی زیرساختار تولیدکننده رنگ در دو نوع پروانه: (آ) ریزنگاری نور سلول های شکمی پوشاننده بال پروانه. سایه روشن ها نتیجه جهت گیری اتفاقی میدان های بلور است. (ب) تصویر SEM از سطح پستی بال پروانه، بلورهای ناپیوسته ای را نشان می دهد که زیر شبکه ای از شیارهای موازی و بلند قرار دارند. (پ) تصویر TEM ریزساختار بافت مشخص و بی مانندی را نشان می دهد که مشخصه صفحه ژئروید است. (ت) ریزنگاری نوری سطح پستی یک نمونه پروانه دیگر. (ث) تصویر SEM پهلوی بال پروانه، میدان های چندبلوری را زیر ستونی از پنجره ها نشان می دهد که توسط شبکه ای از شیارها و بافت عرضی فاصلمدار ایجاد شده است. (ج) تصویر MET ریز ساختارها که بافت مشخص و بی مانند سطح ژئروید را نشان می دهد.

هیچ رنگدانه ای در بال پروانه ها وجود ندارد. این طرح ها و رنگ های خیره کننده تنها و تنها، از داربستی نتیجه می شود که سلول های بال پروانه در آن جای گرفته اند

چهار گوش با کانال‌های دایره‌ای هوا، تقارن مکعبی را برای ریزساختار ژیروئید مورد تأیید قرار می‌دهد. این مشاهده‌ها، گروه فضایی ژیروئید تک را برای ریزساختارهای بلوری نوری در پروانه ثابت کرده است. در ۵ نمونه پروانه مورد بررسی، بافت‌هایی مشاهده شد که مشخصه صفحه‌های ویژه در گروه فضایی ژیروئید تک است و نه الماس.

نتیجه‌گیری

بررسی ساختار و عملکرد شبکه ژیروئید به‌عنوان اجزاء سازنده در بال پروانه و آگاهی از برهم‌کنش‌های میان نور و ریزساختارها در این موجود می‌تواند در طراحی و ساخت ابزارهای نوری سودمند باشد؛ ابزارهایی که از سازوکارهای فیزیکی مشابهی برای تولید نور بهره‌برداری می‌کنند. پس از میلیون‌ها سال اکنون گزینش‌پذیری و عملکرد نوری بلورهای نوری در پروانه‌ها الهام‌بخش فناوری شبیه‌سازی زیستی قرار گرفته است. درواقع، خواص نوری موجود در ریزساختارها گاه می‌تواند بر راه‌کارهای مهندسی شده پیشی گیرد.

بجز پروانه‌ها، سنجاقک‌ها و بیدها نیز از روش‌های پیچیده برای دست‌کاری و تغییر نور استفاده می‌کنند که دانشمندان اکنون در آغاز راه بررسی آن‌ها هستند.



1. Small angle X-ray scattering (SAXS)
2. gyroid 3. Schoen, A. H. 4. chitin
5. Cuticle

۴. نوعی پلی‌ساکارید نیتروژن‌دار که بخش اصلی اسکلت برخی جانداران را تشکیل می‌دهد.

۵. لایه‌ای محافظ در سطح برخی اندام‌های گیاهان و جانوران بی‌مهره که توسط سلول‌های بشره ترشح می‌شود و ساختار سلولی ندارد.

6. transmission electron microscope (TEM)
7. smooth endoplasmic reticulum (SER) membrain



1. www.msnbc.msn.com.
2. www.pnas.org/content/107/26/11676.
3. Halford, B., "The butterfly effect", C & EN. 2010, 21 June- 25 nov., 8.

تشکیل غشاء را همراهی می‌کنند.

سامانه ژیروئید ABCB'A' در بال پروانه بی‌شبهت به یک هم‌بهار (کوپلی‌مر) سه‌جزیی نیست چنان‌که، اجزاء آن را دو غشاء چربی B و B' (در دو سو)، و غشاء سیتوپلاسمی C (در میان دو غشاء) تشکیل می‌دهد و بنابراین ساختاری فشرده دارد. پس از تشکیل این غشاء دولایه در فضای بیرون‌سلولی، پلی‌ساکاریدی به‌نام کیتین رسوب می‌کند و در سراسر محیط خارجی سلول، پلی‌مر تشکیل می‌دهد.

تعیین گروه فضایی بلورها

از دهه ۱۹۷۰، پیچیدگی بلوری سلول‌های موجود در بال پروانه‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. چنان‌که اشاره شد در بیش‌تر بررسی‌ها برای تعیین ریزساختارهای سه‌بعدی از میکروسکوپ الکترونی دوبعدی استفاده می‌شد که برای این کار مناسب نبود. از این‌رو، ساختار بلورها به‌طور متفاوت به‌صورت مکعب ساده، مکعب وجوه مرکزدار و وجوه مرکزدار کدر وارونه در نظر گرفته می‌شد که حباب‌های هوا در شکل‌گویی‌هایی درون کیتین آرایش یافته بود. اساس کار چنین بود که الگوی پراش پرتوهای X از چنین بلورهایی با آنچه که از بال پروانه به دست آمده بود مقایسه می‌شد. در بررسی‌های کنونی، مدل‌های رایانه‌ای با ساختار مکعبی یا الماس، سازگاری خوبی با پراش حاصل از سلول‌های مربوط به بال ۵ نوع پروانه نشان داده است و در ادامه، وجود شبکه‌های سه‌گوش و



مولکول‌ها در لایه‌ای بسیار نازک سطح بال پروانه را می‌پوشانند در حالی که حباب‌های هوا در آن به دام افتاده‌اند و همچون آینه‌های چند لایه عمل می‌کنند. به این ترتیب نور فرابنفش توسط بال پروانه جذب می‌شود و دوباره به رنگ‌های متفاوت مانند سبز و آبی نشر می‌کند.

تولید رنگ در بال پروانه از برهم‌کنش‌های فیزیکی نور با مواد زیستی، موجود در بال پروانه ناشی می‌شود. این مواد زیستی بلورهای نوری یا ریزساختارهای سه‌بعدی پیچیده‌ای هستند که جهت‌گیری‌های متفاوت آن‌ها در برابر نور به تولید رنگ‌های گوناگون می‌انجامد