حشرات منبع شگفت‌انگیز زیست‌الگو و الهام‌زیستی

مهدی ضرابی*[1]، نرگس خسروی[1]

چکیده

دانش زیست‌الگو و الهام‌زیستی، تقلید یا الهام از موجودات زنده و پدیده‌های طبیعی به منظور طراحی و ساخت وسایل و تدبیر فرایندهایی است که بتواند خسارات و مخاطراتی را که انسان به‌دلیل کاربرد برخی فناوری‌ها و زندگی صنعتی به طبیعت تحمیل نموده کاهش داده یا حذف نماید. در دنیای جانوری گروه بزرگ و متنوع حشرات با پراکنش گسترده در جهان، به‌دلیل ویژگی‌های ساختمان بدن و رفتارهای شگفت‌انگیز از مهمترین الگوها برای دانشمندان هستند. الگوبرداری موفقیت‌آمیز از این الگوهای ریزساختار بی‌نظیر، به حل بسیاری از مشکلات کمک نموده است. حجم عظیمی از اطلاعات در این سیستم‌های حیاتی کوچک وجود دارد. الگوگیری از حشرات عموما در هفت زمینه مختلف پایه زیست‌الگو می‌باشند: (۱) مواد و فناوری، (۲) سطوح، (۳) چسبندگی، (٤) بینایی، (٥) نور، (٦) حسگرها، (۷) رباتیک برای کاربردهای مختلف خلاصه می‌شود. الگوبرداری و الهام از این پدیده‌های خلقت محدوده‌ای ندارد و با پیشرفت دانش هر روز زمینه‌های جدیدتری به صورت پویا کشف می‌شود. این مقاله به مرور منابع زیست‌الگو و الهام‌زیستی از حشرات می‌پردازد.

واژگان کلیدی: زیست الگو و الهام زیستی، حشرات، مدل‌های ریز ساختار، فنآوری‌های نوین

* عهده‌دار مکاتبات، استادیار ، تلفن ۸۶۰۹۳۰۴۲ ، نمابر ۸۸۴۹۷۳۲۴، آدرس الکترونیکی mzarabi@ut.ac.ir

[1] گروه مهندسی علوم زیستی،دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

مقدمه

از پیدایش کره زمین نزدیک به ۴/۵۴ میلیارد سال و از پیدایش حیات بر روی آن یک میلیارد سال می‌گذرد[۱].

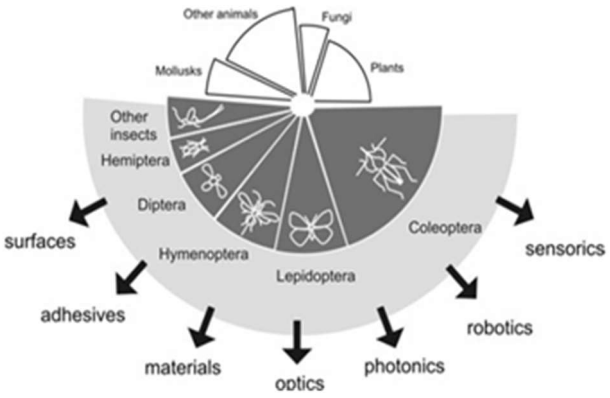
هم‌اکنون زمین خانه میلیون‌ها گونه از جانداران است که انسان فقط یکی از آنها است[۲]. عمر ما انسان‌های امروزی که از انسان‌سایانی که در آفریقا می‌زیستند تکامل یافته‌ایم تنها بین ۲/۳ تا ۲/۴ میلیون سال بر روی زمین است[۳و۴]. در طول این دوران طولانی زندگی بشر بر روی زیست‌کره، انسان مانند همه موجودات با پیروی از قواعد طبیعت و تعامل با همه موجودات زندگی کرده است و تاریخ تمدن انسان هیچ ردپایی از تخریب طبیعت به‌دست انسان ندارد. اما با شروع انقلاب صنعتی (۱۷۰۰ بریتانیا) که تا امروز کمی بیش از ۳۰۰ سال بر آن گذشته، بسیاری از رخدادهای وحشتناک زیست‌محیطی اتفاق افتاده است.

در واقع این صنعتی شدن که عمر آن در مقایسه با عمر ظهور انسان بر زیست‌کره بسیار بسیار اندک است و در مقابل عمر کره زمین به ثانیه‌ای می‌ماند، بیشترین تأثیرات مخرب را بر زیست‌کره گذاشته است.

اگرچه به نظر می‌رسد که صنعتی شدن به زندگی بهتر ما کمک کرده اما آلودگی و تخریب محیط‌زیست امروزه بقا ما و بسیاری موجودات زنده را تهدید کرده است. سؤال این است که چگونه باید ضمن بهره بردن از فواید زندگی مدرن به طبیعت و خودمان آسیب نرسانیم؟ به اعتقاد حکما و دانشمندان دوست‌دار خلقت تنها راه نجات برای تأمین منابع حیات و بقا، نگاه به استعدادهای طبیعت است. خداوند در طبیعت و عوالم آن، حکمتها و دانشهایی قرار داده است که نیاز واقعی بشر و سایر موجودات از آن تأمین می‌شود؛ لذا یک الگوی خوب برای همگرایی علوم، شناخت پدیده‌های طبیعی و الگوبرداری از آن است که این علم را زیست‌الگو[۱] می‌نامند[۵]. علمی که امروزه به زیست‌الگو و الهام‌زیستی[۲] مشهور شده، نسل آخر علم و فناوری است که در پی حل مشکلات با تکیه بر طبیعت به‌عنوان الگوی اصلی و استاندارد خلقت است [۷-۵].

واژه زیست‌الگو توسط اشمیت[۳] (۱۹۶۹) به‌کار برده شد. اما زیست-الگو سابقه‌ای هم‌پای تمدن بشر دارد که از ساخت ابزارهای اولیه با الهام از دندان حیوانات تا تولید نانو مواد زیستی جریان داشته است. طراحی ماشین پرواز داوینچی (۱۴۵۲-۱۵۱۹) با الهام از پرندگان، هواپیمای ساخت برادران رایت (۱۹۶۷-۱۸۶۷) با الهام از بال عقاب و تولید اولین شمع از موم زنبور مثال‌های زیست‌الگو هستند[۹-۷].

حشرات با تنوعی که نیمی از گونه‌های حیات را شامل می‌شوند بسیار مورد توجه محققان زیست‌الگو هستند. الهام و الگوبرداری از این گونه‌ها در گرایش‌های: (۱) مواد و فناوری[۴]، (۲) سطوح[۵]، (۳) چسبندگی[۶]، (۴) بینایی[۷]، (۵) نور[۸]، (۶) حسگر[۹]و (۷) رباتیک[۱۰] پایه علم زیست‌الگوی حشرات است (شکل ۱)[۱۰].



شکل ۱: زیست‌الگوی حشرات بر اساس تنوع راسته‌ای در مقایسه با همه جانداران

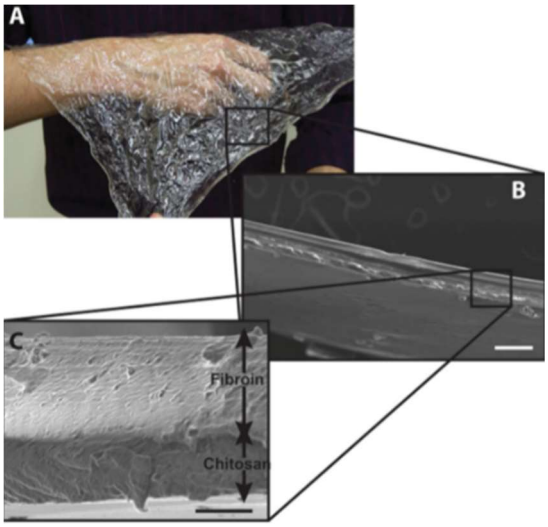
[1] Biomimetics
[2] Bioinspiration
[3] Schmitt
[4] Materials science and technology
[5] Surface science
[6] Science of adhesives
[7] Optics
[8] Photonics
[9] Sensorics
[10] Robotics

۱. علم مواد

علم زیست‌مواد[1] فصل مشترک علوم زیستی، فیزیک، مکانیک، شیمی و مهندسی است. ساختار مواد زیستی، راه حل‌های خلاقانه‌ای برای یافتن ترکیبات طبیعی ارائه می‌دهد[۱۱]. از بین این مواد، اسکلت‌خارجی (کوتیکول)[2] حشرات به‌دلیل خواص با ارزشی چون: (۱) کوچکی ساختار، (۲) مقاومت در برابر فشار، خشکی، رطوبت و دما، (۳) قابلیت ترشح و ذخیره مواد جانبی، (۴) حسگری شیمیایی و مکانیکی، (۵) طرح و رنگ‌آمیزی، (۶) نگهداری اکسیژن، هضم غذا، تمیز کردن بدن و... بسیار مورد توجه است [۱۰].

کوتیکول یک کامپوزیت لایه‌دار شامل ریزرشته‌های کیتین[3] است که در ماتریکسی از پروتئین و رنگدانه‌های آبگریز قرار دارد. کیتین پلیمری کریستالی شامل ۲۱–۱۸ مولکول مرتب شده در الگوهای مختلف با قطر حدود ۲/۸ نانومتر است که با توجه به ساختار مولکولی و پولاریته زنجیرهای تشکیل دهنده‌اش سه نوع α، β و γ دارد که دارای خواص مکانیکی متفاوتی است. همچنین بر اساس اختلاف میان‌کنش مولکولی بین کیتین و پروتئین‌ها و عملکرد آنها، دو نوع نرم و سخت دارد. کوتیکول «نرم» دارای مقدار مساوی کیتین و پروتئین با ۷۵–۴۰٪ آب بوده و انعطاف‌پذیر است. اما کوتیکول «سخت» ۵۰–۱۵٪ کیتین و ۱۲٪ آب دارد و بسیار محکم است[۱۲]. کیتین نامحلول در آب است لذا کاربرد صنعتی ندارد اما شکل داستیله آن به نام «کیتوسان»[4] امروزه تولید تجاری و صنعتی زیادی پیدا کرده است [۱۳]. از جمله ترکیب کیتوسان با فیبروئین و کلاژن پایه مهمی در تحقیقات روز مهندسی زیست‌الگو است. «shrilk» برگرفته از نام میگو[5] (منبع کیتوسان) و ابریشم[6] (منبع فیبروئین) یکی از این مواد است که ترکیبی از لایه‌های کیتوسان و فیبروئین می‌باشد. این کامپوزیت طبیعی و دست‌ساز بشر کاملاً زیست‌سازگار بوده، دو برابر محکم‌تر از کیتوسان و ده بار محکم‌تر از کیتین و فیبروئین است (شکل۲). این ماده امروز بهترین جایگزین پلاستیک‌ها و برخی وسایل پزشکی است[۱۴, ۱۵].

برخی رنگهای کوتیکول الهام بخش ساخت پوشش‌های رنگی خاص است. رنگ سفید سبک، کارامد و ارزان قیمتی که امروزه



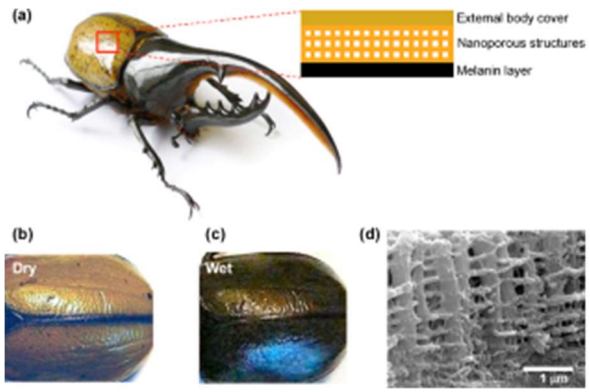
شکل۲: کامپوزیت زیست‌الگویی shrilk. (A) بخش کامپوزیتی SEM (B) لایه های فیبروئین و کیتوسان SEM (C) .ساختار کوتیکول

جایگزین مواد سفیدکننده معدنی در صنایع نساجی، کاغذ، پلاستیک، دندانپزشکی و رنگ‌سازی شده با الهام از نانوالیاف کیتین کوتیکول سوسک سایفوکیلوس[7] (شکل۳) تولید شده است[۱۶].

شکل۳: سوسک سایفوکیلوس

[1] Biomaterials
[2] Cuticle
[3] Chitin microfibrils
[4] chitosan
[5] Shrimp
[6] Silk
[7] Cyphochilus (Scarabaeidae)

رنگ کوتیکول چندلایه شگفت‌انگیز سوسک هرکول[1] که با جذب رطوبت از سبز خاکی به سیاه تغییر می‌کند نیز الگوی ساخت بافت‌های اسفنجی است که رنگشان با جذب رطوبت تغییر می‌کند (شکل۴)[۱۷].



شکل۴: (a) سوسک هرکول (b) رنگ خاکی-سبز در شرایط خشک (c) رنگ سیاه در رطوبت بالا. (d) SEM از لایه های کوتیکول.

یکی دیگر از جاذبه های دنیای حشرات که در مهندسی پزشکی الگو برداری شده، ساخت سوزن سرنگ بدون درد با الهام از ساختار دهان پشه هاست که قادرند با حداقل احساس درد و التهاب در پوست به رگ برسند. محققان دانشگاه کانسای ژاپن با استفاده از پلیمر زیست تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید، سوزن‌هایی بی‌خطر ساخته‌اند [۹].

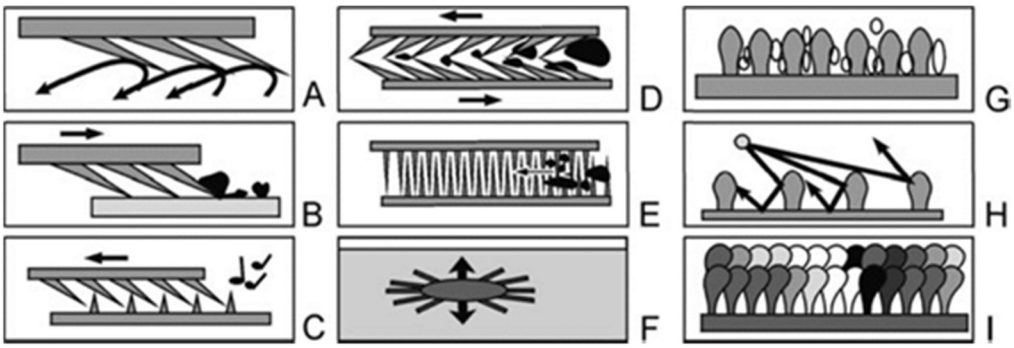
۲. علم سطوح

علم سطوح به بررسی خواص فیزیکوشیمیایی سطح بدن جانوران، گیاهان، جامدات و مایعات می‌پردازد. خواصی چون ضدسایش، فوق‌آبگریزی، چسبندگی، کاهش فشار، ضد مه، کاهنده صدا، جذب آب و حتی بینایی در پوست حشرات دیده می‌شود[۱۸]. برخی حشرات نیز پوستی با خصوصیت آئرودینامیکی و هیدرودینامیکی، خودتمیزکنندگی، تولید صدا، فیلترکنندگی، ذخیره هوا و مقاومت به گرما دارند (شکل۵). این خصوصیات الگوهایی برای ساخت سطوح با قابلیت چسبندگی، اصطکاک، پوشش، روان‌سازی، فیلتر-کنندگی، حسگری، مرطوب‌سازی، خودتمیزکنندگی، ضدرسوب، متحمل به گرما و بینائی در مهندسی زیست الگو هستند[۱۰].

ساخت سطوح ضدسایش و فوق‌آبگریز موفقیت‌های صنعت در الگوبرداری از حشرات است:

الف) سطوح ضدسایش:

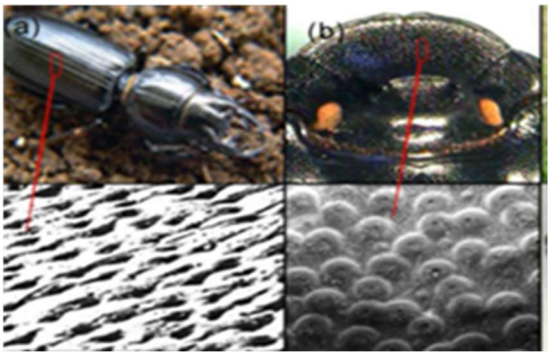
فرسایش مهم‌ترین عامل خسارت به مواد و دستگاه‌هاست. سالانه میلیون‌ها دلار بر تورهای هلیکوپتر، نازل‌های موتور موشک، تیغه‌های توربین، لوله‌ها و قطعات مکانیکی خسارت وارد می‌شود. زیست‌شناسان با کشف راز حیات حشرات بیابانزی مانند سوسک سرگین‌خوار[2]، سوسک‌های زمینی[3]، و مورچه‌ها که دائما تحت سایش و فرسایش شن‌ها هستند این چالش بزرگ مهندسان را حل



شکل ۵. انواع ریز ساختارهای پوست حشرات. (A) سطح فعال آیرودینامیکی، (B) تمیز کننده، (C) تولید کننده صدا، (D) ذخیره و توزیع کننده غذا، (E) فیلتر کننده، (F) سطح فعال هیدرودینامیکی، (G) نگه‌دارنده هوا، (H) سطح مقاوم به گرما و (I) الگوهای متنوع رنگ.

[1] *Dynastes Hercules* (Scarabaeidae)
[2] *Scarabaeus sacer* (Scarabaeidae)
[3] Ground beetle (Carabidae)

کرده‌اند. خاصیت ضد سایش این پوست‌ها که مانع چسبیدن خاک به آنها نیز می‌شود به هندسه عجیبشان مربوط است (شکل۶)[۱۸].



شکل ۶: هندسه پوست ضد فرسایش، (a) سوسک های زمینی، (b) سوسک سرگین خوار

ب)سطوح فوق آب‌گریز:

سطوح فوق آب‌گریز پوست حیوانات، گیاهان، و حتی برخی مواد جامد که زاویه تماس استاتیک (θw)[۱] بالاتر از ۱۵۰ درجه با قطره آب تشکیل می‌دهند، ایده‌های زیست‌الگویی برای صنعت هستند[۱۸]. ازجمله سن‌های آب‌پیما[۲] که بدون خیس‌شدن قادر به ایستادن و راه‌رفتن روی آبند، الگوهای ارزشمندی هستند (شکل۷). در واقع این نانو شیارهای نازک جهت‌دار در لایه کوتیکول موهای کوچک[۳] پای این حشره است که باعث فوق‌آبگریزی پا می‌شود[۱۸, ۱۹].

ساختار فوق‌آبگریز دیگری نیز در پولک‌های بال غالب پروانه‌ها دیده می‌شود. این پولک‌ها لبه‌هایی با آرایش منظم دارند که مانند سفال‌های سقف، مانع پخش آب شده و یک جریان آرام روی بال می‌سازند[۱۸].

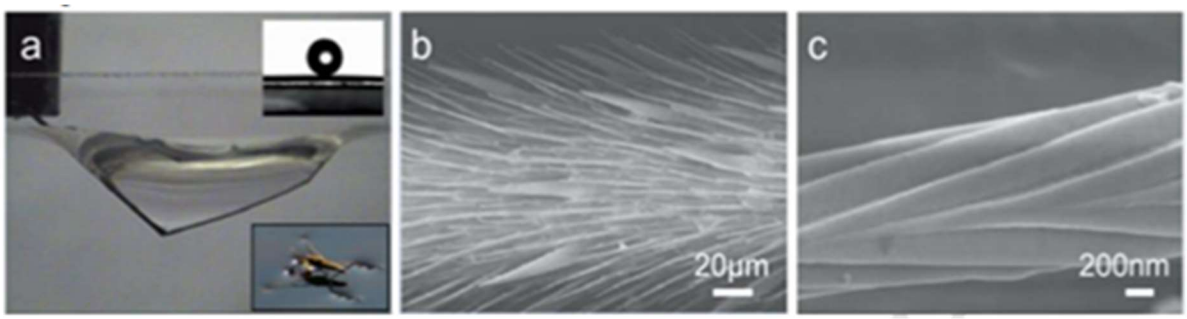
ج)سطوح بینائی:

مهندسی اپتیک درپی ساخت سطوح ضدانعکاس، بازتابنده قوی، رنگی و شفاف است[۲۰]. تنوع رنگ و نورپردازی بدن حشرات، الگوهای جذاب الهام مهندسان اپتیک اند. نقش رنگین‌کمانی بال پروانه *Trogonoptera Brookiana* به‌خاطر نانوساختارهای متنوع پولک‌هایش است که باعث جذب و پردازش نور می‌شود. شگفت‌انگیزتر آنکه حشره با تغییر زاویه بال نسبت به منبع نور، باعث تغییر رنگ بدن و شدت آن نسبت به رنگ زمینه محیط شده و این‌گونه خود را استتار می‌کند. علت این استتار جذب یا پراکنده‌کردن نور توسط نانوساختارهای پولک‌هاست (شکل۸)[۱۸].

ساختار میله‌های شش‌گوشه نانوسکوپی سازمان‌یافته (قطر و ارتفاعی حدود ۲۰۰ نانومتر) در چشم برخی شب‌پره‌ها نیز باعث خاصیت ضدانعکاسی است [۱۸].

و) سطوح ضد مه:

صنایع هواپیما و خودرو نیازمند شیشه‌های دید در مه غلیظ هستند. ساختمان چشم حشراتی که در محیط‌های مه‌آلود زندگی می‌کنند

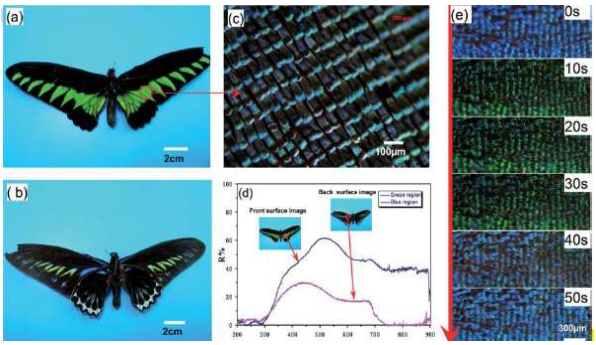


شکل۷: (a) ایستادن سن‌های آب‌پیما روی آب و (b, c) ساختمان موهای پنجه پا.

[۱] به زاویه تماس یک قطره با سطح جامد گفته می شود.

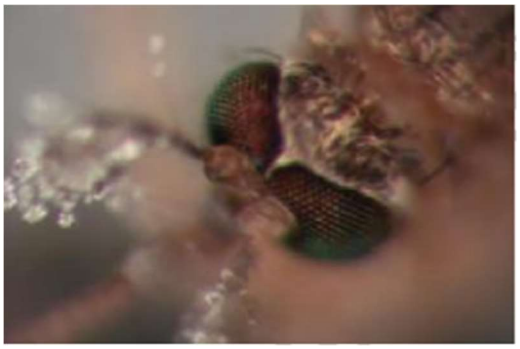
[۲] *Aquarius remigis* (Gerridae)

[۳] Microsetae



شکل ۸: بال پروانه Trogonoptera brookiana، (a) بال جلو، (b) بال عقب، (c) تصویر میکروسکوپ نوری بال، (d) طیف بازتابی پوست: سیگنال ضعیف ناحیه آبی نسبت به ناحیه سبز، (e) فرآیند یک دقیقه‌ای برگشت به فرکانس آبی اولیه

الگوی بی‌نظیری برای ساخت این شیشه‌هاست. چشمان مرکب پشه *Culex pipiens* یک مکانیسم حفاظتی مؤثر برای دید واضح در مه غلیظ دارد (شکل۹). در این چشم ریزساختارهای نانوئی شش‌ضلعی غیربسته‌بندی‌ای (NCP)[1] وجود دارد که مانع تجمع قطرات مه بر روی سطح اماتیدیای[2] چشم است. در عین‌حال چون ساختمان اماتیدیا خود یک شش‌ضلعی فشرده[3] (HCP) میکروپی است، عملاً مانع گیرکردن قطره‌های مه در حفره‌های بین هر اماتیدیا میشود[۱۸].

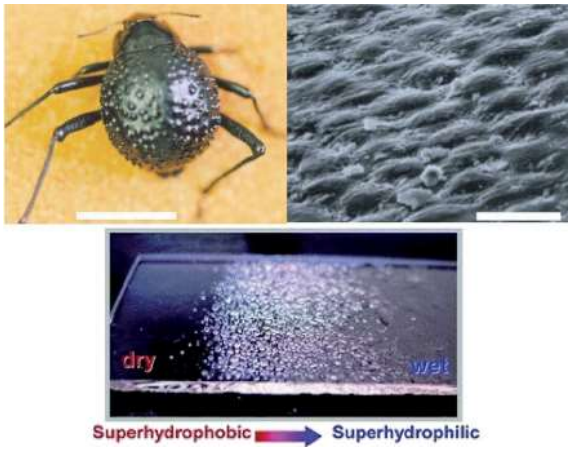


شکل ۹: چشم ضد مه پشه Culex pipiens

[2] یک واحد بینایی از چشم مرکب حشرات (ommatidia)

ه)سطوح جاذب آب:

بحران آب آشامیدنی در مناطق کم‌آب چالش بسیار بزرگی است اما محققان با الگوبرداری از حشرات بیابانزی به راه‌حلی اعجاب‌آور برای تأمین آب رسیده‌اند. سوسک استنوکارا[4] که در کویر کم‌آب نامیب برای خود آب تولید می‌کند یک الگوی شگفت‌انگیز است. سوسک بخار آب را از هوای مه‌آلود بیابان با ریزسازه‌های آب‌دوست و کانال‌های فوق‌آبگریز سطح بال خود جذب‌کرده و به صورت قطره در می‌آورد (شکل ۱۰). این قطرات کوچک به قطرات



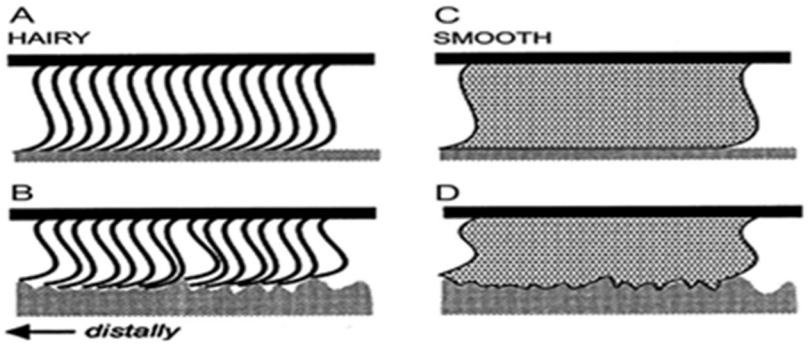
شکل ۱۰: سطح جاذب آب در بال‌های رویی سوسک استنو کارا (a) . سطح بال رویی سوسک ماده بالغ یا نمای فرورفتگی‌ها و برجستگی‌های آن؛ (b) تصویر SEM از قسمت های فرو رفته.

بزرگتر تبدیل شده و از کانال‌های نانومتری سطح بدن به سمت دهان می‌غلتند تا حشره آب گوارا را بنوشد. این قطرات بزرگ به‌واسطه قسمت‌های آبگریز و آبدوست، مومی و غیرمومی ناهموار سطح پشت بدن شکل می‌گیرند. مهندسان با تقلید از این الگوی پوست، چادرهای آب‌ساز ارزانی را ساخته‌اند که از بخار آب هوا یا مه قطرات آب را می‌سازد. این چادرها امروزه در پوشش ساختمان‌های مناطق خشک بکار می‌روند تا آب تولید کنند. الگوی سطوح آب‌دوست/ فوق‌آبگریزی در این چادرها در تولید انواعی

[1] Non-close-packed

[3] Hexagonally close-packed

[4] *Stenocara gracilipes* (Tenebrionidae)



شکل ۱۱: ریزساختارهای چسبندگی پای برخی حشرات: (A و B) نوع رشته‌های مویی و (C و D) صاف؛ (A و C) الگوی چسبندگی بر روی سطوح صاف و (B و D) سطوح ناهموار

از دستگاه جمع‌آوری و تولید آب آشامیدنی نیز به‌کار رفته است[۱۸] .

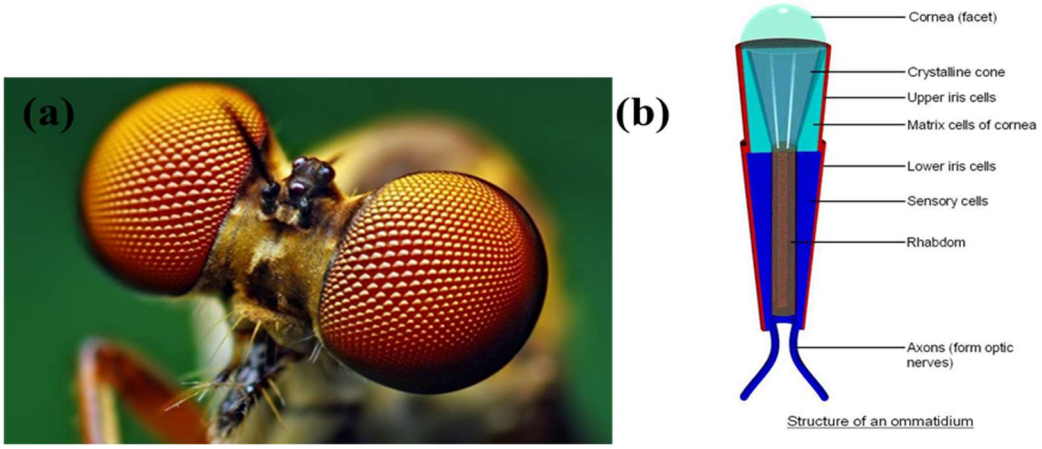
۳. علم چسبندگی

جلوه دیگر طبیعت، خواص مکانیکی و شیمیایی سطوح چسبنده است که به سختی از هم جدا می‌شوند. نمونه‌های فراوانی از سطوح چسبنده در حشرات به‌صورت اندامک‌هایی مانند چنگک‌ها، قفل و بندی‌ها، مکنده‌ها، و لنگرها و یا به شکل سطوح اصطکاکی و یا حتی انواع ترشحات چسبنده وجود دارد که قدرت چسبندگیشان به ساختار و عملکرد آنها بستگی دارد. عملکرد این سطوح سه نوع اصلی دارد: ۱) چسبندگی موقت که حشره با قدرت زیاد به چیزی می‌چسبد ولی براحتی جدا می‌شود، ۲) چسبندگی متحرک که در عین چسبیدگی حشره حرکت می‌کند، ۳) چسبندگی دائمی که در آن یک نوع مخلوط سیمان مانند ایجاد می‌شود. این چسبندگی‌ها به‌خاطر نیروهای مویرگی چسبنده[1]، پیوندهای مولکولی واندروالسی است. از جمله اثر پیوندهای مولکولی در چسبندگی پای سوسک‌های *Chrysolina polita* بر شیشه بررسی شده‌است. همچنین الگوی پاهای پر موی برخی حشرات مانند مورچه‌ها، زنبورها، سوسک‌ها، ملخ‌ها و مگس‌ها که شامل ریزسازه‌های چسبنده‌اند در ربات‌ها و سایر طرح‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند[۱۰, ۲۱]. این ریزساختار شامل رشته‌های موئی و متراکم صافی است (شکل۱۱) که تراکم آنها با افزایش وزن بیشتر می‌شود که نه‌تنها قدرت چسبندگی را زیادتر می‌کند بلکه سبب مقاومت به کشش و حساسیت به فشار است[۲۱].

ریزسازه دهان و ماده چسبی ترشحی سوسک استنوس[2] نیز الگوی شگفت‌آوری برای چسبندگی است. این سازه شامل دو صفحه چسبنده در لب پایینی است که حشره آن را به سمت شکار پرتاب کرده و شکار را گیر می‌اندازد[۲۲].

اگرچه افزایش قدرت چسب، زیست‌سازگاری و کاهش میزان ماده چسب در واحد سطح برای تولید چسب‌های طبیعی مورد توجه است، اما چالش اصلی صنعت یافتن چسب‌ها و مکانیسم‌هایی است که چسبیدن و جدا شدن پیاپی را امکان‌پذیر کند. حشرات به‌دلیل داشتن چنین الگوهایی بسیار مورد توجه‌اند[۱۰]. از جمله قدرت چسبندگی و برگشت‌پذیری سریع پای حشرات که باعث می‌شود به‌راحتی از دیوار بالا بروند، الگوی ساخت چسب‌ها زیست الگوئی است که در مقایسه با چسب‌های مصنوعی توانایی‌های شگفت‌آوری برای صنعت ایجاد می‌کند. عدم سمیت، سرعت و قدرت بالای اتصال به سطوح، چسبیدن مکرر، قدرت چسبیدن زیر آب، اتصال سریع برگشت‌پذیر و یا دائمی محکم از خواص مهم این چسب‌ها هستند. در زیست‌پزشکی که چسب‌ها باید سریع به بافت متصل شده، غیرسمی بوده، تولید متابولیت‌های های سمی نکرده، کاربردشان در هنگام جراحی آسان بوده، زیست تخریب‌پذیری

[1] Capillary adhesive force
[2] *Stenus* (Staphylinidae)



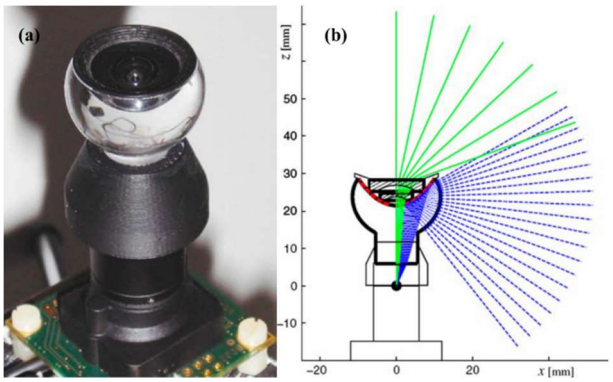
شکل۱۲: a) چشم مرکب ؛ b) یک واحد چشمی

تدریجی همراه با بهبود بافت داشته و مقرون به صرفه باشند، باعث افزایش کاربرد چسب‌های زیستی شده و کاملاً مورد تأیید اتحادیه غذا و دارو آمریکا[1] است [۲۱].

۴. علم تصویر

حشرات برخلاف مهره‌داران که یک نوع چشم دارند، دو نوع چشم ساده و مرکب دارند که چشم مرکب خود از واحدهای چشمی تشکیل شده‌است (شکل۱۲). در این ریزساختار شگفت‌انگیز هر نقطه از چشم مرکب یک تک تصویر را ثبت میکند تا همه نقاط تصویر گستره کامل واحدی را در نیمکره چشم بسازند. الگوبرداری از این قابلیت اولین بار توسط آندریاس بروکنر[2] در ۲۰۰۸ از موسسه فراونهوفر[3] در مهندسی اپتیک انجام شد که در پی آن شبیه‌سازی سیستم‌های تصویری با دقت بالا و میدان وسیع رواج یافت[۲۳].

ازجمله محققان نوروبیولوژی دانشگاه بیفلد[4] آلمان، سیستم تصویربرداری Bee eye را با الگو از چشمان زنبور عسل ساخته‌اند. این سیستم بر مبنای اصول کاتادیوپتریک[5] عمل میکند که در آن لنزها و آینه‌ها با شکست و بازتاب نور تصویری با میدان وسیع و وضوح بالا می‌سازند. در این دوربین سطح بازتاب در قسمت بیرونی تصویری محدب می‌سازد و قسمت مرکزی تمام نقاط تصویر را با لنزهای متعددش جمع‌آوری می‌کند (شکل۱۳)[۲۳, ۲۴].



شکل۱۳: (a) دوربین "Bee eye" با میدان دید ۲۸۰ درجه. (b) مسیر نور از اجسام به دو قسمت بیرون و مرکز.

۵. علم نور

بدن پرندگان، ماهی‌ها و حشرات دارای تنوع ساختارهای فوتونی یک‌بعدی تا سه‌بعدی است به‌طوری‌که رنگ‌های درخشان، رنگین‌کمانی و ضدانعکاسی به آنها می‌دهد. گوناگونی حشرات تنوع بی‌نظیری از این ساختارهای فوتونی دارد که پولک‌های بال پروانه‌ها

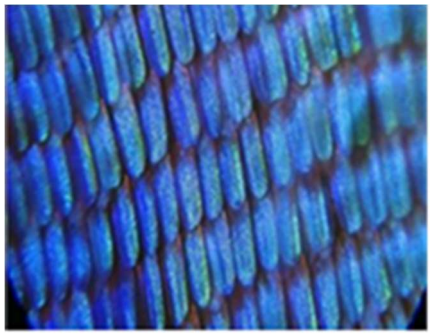
[1] Food & Drug Administration (FDA)
[2] Andreas Bru ¨ckner
[3] Fraunhofer
[4] Bielefeld
[5] Catadioptric

شگفت‌انگیزترین آنهاست. جذابیت رنگ آبی رنگین‌کمانی بال پروانه مورفو[1] به‌خاطر قرارگیری متناوب پولک‌های نسبتا درشت دارای بلورهای فوتونی است که فواصل ظریف بین آنها با لایه کیتین معمولی پرشده و یک ریزسازه‌های میکرو و نانویی تشکیل داده است (شکل۱۴)[۲۵]. با افزایش پولک‌ها، در واقع لایه‌های عبور نور بیشتر می‌شود که خود سبب انعکاس و بزرگنمایی بیشتر امواج نور است[۲۶, ۲۷].

امروزه از این نانوساختارها در ساخت محصولاتی مانند عینک‌های انعکاسی، دوربین دید در شب و میکروتراشه‌های کامپیوترها و موبایل‌ها استفاده می‌شود [۲۷] که محصولات فوق‌فناورانه زیست-الگویی پوشش SWC[2] لنزهای دوربین‌های Canon (شکل۱۵) و صفحه‌نمایش Qualcomm Mirasol (شکل ۱۶) تلویزیون‌ها و مانیتورهای شرکت کوالکام[3] در مقیاس تجاری از آن جمله‌اند (۱)[۲۸].

از این ساختار رنگ در ساخت پارچه نیز استفاده شده است. اولین بار شرکت ژاپنی تیجین[4] در پارچه‌ای به نام موفوتکس[5] به‌جای استفاده از رنگدانه بر اساس تغییر ضخامت و ساختار الیاف، رنگی رنگین‌کمانی و قابل تغییر ایجاد کرد. همین ساختار در صنعت خودرو نیز به‌کار گرفته شد و شرکت جنرال موتورز از آن برای ساخت پوشش بدنه یک نوع کادیلاک استفاده کرد[۲۹].

لکه‌های رنگی فلزی و درخشان در بال برخی سوسک‌ها که اندازه-ای از 1D تا 3D دارند نیز بخاطر ساختارهای فوتونی کوتیکول آنهاست (شکل ۱۷)[۲۵] .



شکل ۱۴: ساختار بلورهای فوتونی پولک‌های بال پروانه مورفو

شکل۱۵: پوشش SWC ضدبازتاب لنز دوربین‌های Canon الهام‌گرفته از چشم شب‌پره‌ها

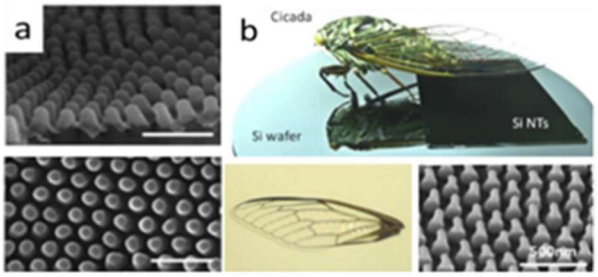
شکل ۱۶: Qualcomm ereader (چپ) و Top smart watch (راست) با صفحه نمایش Mirasol. الهام گرفته از بال پروانه مورفو

شکل۱۷: ساختارهای فوتونی کوتیکول تک‌لایه‌ای D۱ سوسک Chrysochroa raja

[1] *Morpho didius* (Nymphalidae)
[2] Subwavelength Structure Coating
[3] Qualcomm
[4] Teijin
[5] Morphotex

این لکه‌های فوتونی در چشمان بسیاری از حشرات نیز وجود دارد که نه‌تنها رنگ‌های درخشان و رنگین‌کمانی می‌سازند بلکه نقش ضدانعکاسی هم دارند که باعث افزایش کارایی دید و جلوگیری از انعکاس می‌شود. همین ریزساختارهای ضدبازتاب در چشم حشرات شب‌فعال از جمله شب‌پره‌ها به آنها قدرت جهت‌یابی دقیق در کمترین نور شب را می‌دهد. این سطوح ضدبازتاب عملاً یک سازه شبکه‌ای 2D است که انتقال نور را در شرایط تاریک افزایش می‌دهند. این چشم‌ها علاوه بر جهت‌یابی با جذب حداقل مقدار نور تصویر کامل می‌سازند که برای شکارچیان شب مانند سن‌های شکارگر که در تاریکی مطلق بدون خطا شکار می‌کنند حیاتی است. محققان براساس این خلقت شگفت‌انگیز ریزسازه‌های نانویی با حساسیت بالا به نور همراه با کاهش بازتاب طراحی و ساخته‌اند[۳۰].

برخی حشرات علاوه‌بر چشم دارای سامانه بینایی به نام گره قرنیه‌ای[1] هستند که لکه‌هایی حساس به نورند و به‌شکل برآمدگی‌های کوتیکولی با آرایش شش‌ضلعی در پوست (جیرجیرک‌ها) یا در بال (شب‌پره قوش[2]) دیده می‌شوند (شکل ۱۸). ساختار این لکه‌ها نه‌تنها به‌دلیل پتانسیل آنها برای کاربردهای تکنولوژیکی زیست‌الگو، بلکه برای درک اصول به‌کارگیری نور توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند[۲۵].



شکل ۱۸: SEM (a) گره قرنیه ای در چشم شب‌پره Attacus atlas ، در مقیاس ۵۰۰ nm، و (b) بال جیرجیرک (بالا) بال شفاف (پایین چپ) و SEM (پایین راست).

اگرچه هنوز الگوبرداری از ریزساختارهای کریستالی فوتونی یک چالش بزرگ علمی است، اما ساخت پلت‌فرم سنسورها، سلول‌های خورشیدی، صفحه نمایش‌ها، کاغذهای فوتونی از این ویژگی‌ها امکان‌پذیر شده‌است[۲۵]. با وجود این موفقیت‌ها هنوز فاصله زیادی برای درک عظمت خلقت در آفرینش کوچکترین ریزسازه‌های سه‌بعدی فوتونی حشرات ازجمله در برخی پروانه‌ها [۳۱]، سوسک‌های سرخرطومی[3]و شاخک‌دراز[4] وجود دارد. به‌طوری‌که ساخت چنین ریزساختارهایی که در دامنه طول‌موج مرئی با تناوب‌هایی بین ده تا صدها نانومتر قابل استفاده باشند حتی در شرایط آزمایشگاهی هم بسیار دشوار است. از جمله پلی‌کریستال فوتونی سه‌بعدی رنگ نارنجی بالپوش شپشه *Pachyrrynchus congestus pavonius* که در هیچ حشره‌ای یافت‌نشده موجب حیرت محققان است[۳۲].

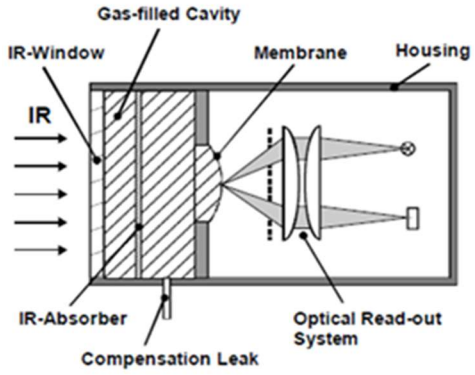
۶. علم حسگرها

حشرات منبع الهام برای ساخت حسگرها هستند. الگوی چشمهای زیست‌الگویی که حسگرهای نوری بسیار کوچک و کارآمدی برای هدایت دقیق و پایدار ربات‌های پرنده‌اند، بینایی پروانه‌ها بوده است. موهای حسی Filiform و گره‌های حسی زنگوله‌ای Companiform حشرات که حسگرهای جریان هوا و فشارند، علیرغم ظاهر ساده‌شان به شدت حساسند و به همین جهت الگوی مناسبی برای طراحان حسگرها می‌باشند. حسگرهای جریان هوا گیرنده‌هایی مکانیکی هستند که قادرند کمترین مقدار جریان هوا، صدا با فرکانس پایین و ارتعاش متوسط را تشخیص دهند. مجموعه‌ای از این موهای حسی در زائده سرسی[5] انتهای بدن جیرجیرک‌ها یک اندامک حسگری بسیار حساس ساخته است. حسگرهای فشار زیست‌الگویی[6] نیز بر اساس ساختمان و عملکرد گره‌های حسی زنگوله‌ای که در بخش‌هایی از بدن حشرات مانند پایه بال (پروانه‌ها)، بال‌های عقب[7] (مگس‌ها)، مفاصل پا (ملخ‌ها) و سرسی (سوسری‌ها) قرار دارند، طراحی می‌شوند. اولین نوع از این

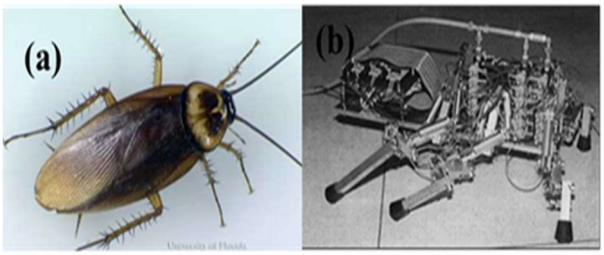
[1] Corneal nipples
[2] Hawk moths
[3] Weevils
[4] Longthorns
[5] Cerci
[6] Biomimetic strain sensors
[7] Halters

حسگرها در سال ۲۰۰۲ با الگو از گره‌های حسی زنگوله‌ای *Calliophora vicina* ساخته شد [۳۳].

حسگر آتش و دود، ساختار حسی شگفت‌آوری در سینه و شکم حشره آتش‌دوست[1] است که برای تولیدمثل نیازمند جنگل‌های آتش گرفته می‌باشد. این حشره عجیب، آتش و دود را از کیلومترها مسافت حس می‌کند و با پروازی طولانی به محل آتش میرسد و در چوب‌های تازه سوخته شده تخم‌گذاری می‌کند. محققان دریافته‌اند دریافت بوی دود و تشخیص امواج مادون‌قرمز حاصل از سوختن چوب‌ها در مغز حشره همگرا می‌شود تا ناوبری دقیقی به‌سمت آتش داشته باشد. حسگر زیستی مادون قرمز Pneumatic Golay با تجزیه و تحلیل عملکرد حسگر آتش و دود حشره و براساس اصول ریاضی طراحی شده است (شکل۱۹). این سنسور دارای محفظه‌ای است که از گاز پر می‌شود و در یک دیواره آن روزنه‌ای برای عبور اشعه IR و در دیواره دیگر غشاء نازک حساسی قرار دارد که به یک سیستم اپتیک متصل است. زمانیکه اشعه از روزنه و محفظه عبور کند میزان دما آن تغییر میکند که تغییرات در اپتیک حسگر ثبت و غلظت گاز تعیین می‌شود[۳۴].



شکل۱۹: ساختمان حسگر مادون قرمز Golay

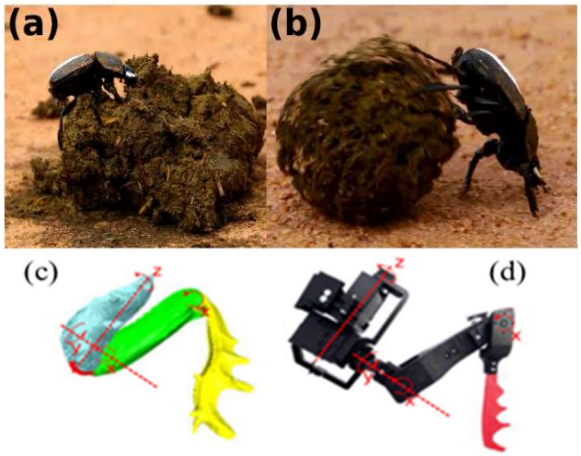


شکل۲۰: (a) سوسک‌های حمام و (b) ربات دونده‌ی زیست‌الگوئ

۷. علم رباتیک

رباتها در روند تکاملی‌شان به ربات‌های زیست‌الگوئی[2] امروزی رسیده‌اند که کاملاً از طبیعت الهام گرفته‌اند. هدف ساخت این ربات‌ها استفاده از مدل‌ها، سیستم‌ها و عناصر طبیعت برای غلبه بر محدودیت‌های فناوری ربات‌های سنتی است تا عملکرد و ثبات آنها بهبود یابد[۳۵].

ازجمله در ساخت نسل جدید ربات‌های بسیار کوچک دونده از پاهای حشرات الگوبرداری شده‌است. ربات‌های دونده شش پا که علاوه‌بر سرعت بالا انعطاف‌پذیری زیادی در دویدن دارند از سوسک‌های حمام (سوسری‌ها)[3] که با سرعت زیاد می‌دوند الگو گرفته‌اند (شکل۲۰)[۳۶]. همچنین از ساختار پای‌جلویی سوسک سرگین‌خوار[4] که توپ سرگین را می‌سازد، پاهای رباتیک گوی‌ساز ساخته شده است (شکل۲۱)[۳۷].



شکل۲۱: (a) سوسک سرگین خوار در حال تشکیل توپ سرگین، (b)حرکت به همراه توپ، (c) ساختمان پای جلوی سوسک سرگین خوار و (d) پای رباتیک

[1] Pyrophilous
[2] Biomimetic robot
[3] *Periplaneta americana Linnaeus* (Blattidae)
[4] *Scarabaeus galenus* (Scarabaeoidea)

پرنده‌های زیست‌الگوئی ازجمله ریزربات‌هایی هستند که کوچکی، قدرت پرواز و انعطاف‌پذیری فوق‌العاده بال‌هایشان از ساختمان بدن و عملکرد بال حشرات پرنده بسیار کوچک الگوبرداری شده است[۳۸, ۳۹]. Ornithopteri جدیدترین ربات پرنده‌ای که طراحی پیچیده دارد مدل ارتقا یافته طرح ماشین پرنده لئونارد و داوینچی است. بعد گذشت یک قرن از ساخت اولین هواپیما، دانشمندان موفق به ساخت پرنده‌های جدید زیست الگوئی (BAV)[1] شده‌اند که قادر به انجام مأموریت‌های هوایی ویژه هستند. طرح بال و شیوه پرواز این پرنده‌های کوچک بدون سرنشین از برخی حشرات الگوبرداری شده است. آژانس تحقیقات پروژه‌های پیشرفته دفاعی آمریکا DARPA[2] در ۲۰۰۵ اولین پرنده زیست الگوئی BMAV [3] در ابعاد نانو را ساخت که توانست ۲ گرم بار را ۷/۵ سانتی‌متر جابه‌جا کند. این ریزپرنده نسبتا ارزان، علیرغم داشتن تجهیزات مکانیکی و الکترونیکی فشرده، فوق العاده سبک و آنقدر کوچک‌اند که قابل تشخیص نیستند درحالی‌که به‌راحتی توسط یک اپراتور هدایت می‌شوند. اندازه بسیار کوچک آنها امکان عبور آسان از منافذ ریز و پرواز در فضاهای بسیار محدود را فراهم می‌کند و در عین کوچکی از هر چیز تصویربرداری کرده و آن را در حافظه خود ثبت یا مخابره می‌کنند. به همین خاطر در مأموریت‌های نظامی و عملیات پلیسی، جستجو در مکان‌های پر-خطر برای تشخیص نشت مواد شیمیایی، تابش‌های شدید، وجود ولتاژهای بالا و نیز خدماتی مانند سنجش از راه دور که از ربات‌های دیگر ساخته نیست از آنها استفاده می‌شود[۳۸].

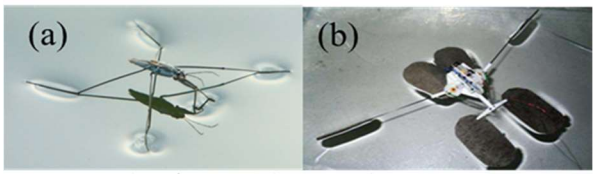
نمونه دیگری از موفقیت‌های اخیر رباتیک ساخت ربات‌های کوچک هلی‌کوپتری (drones)[4] است. در ساخت این پرنده‌ها از شکل بال و نوع پرواز زنبورها که drones یا ویزویز کننده نامیده می‌شوند، الگوبرداری شده است. برخی از آنها کارهای هیجان-انگیزی مانند خدمات پیک شهری را انجام می‌دهند و یا حتی به-عنوان تلفن‌های همراه آینده به کار گرفته خواهند شد. حتی برخی از آنها نیز به‌دلیل کاربردهای نظامی به وسایلی بسیار ترسناک تبدیل شده‌اند (شکل ۲۲)[۴۰].

محققان همچنین از مگس‌ها به‌دلیل عملکرد بالای پروازشان برای ساخت هواپیماهای بدون‌سرنشین الگو گرفته‌اند. مگس‌خانگی می-تواند در ثانیه تا ۲۰۰۰ بار بال بزند[۴۱] این عدد شگفت‌آور است

شکل ۲۲: یک ریز پرنده ساخت آزمایشگاه میکروسکوپی هاروارد که مانند یک زنبور کوچک به راحتی روی یک گل می نشینند.

درحالی‌که با چنین ضرب‌آهنگی کاملاً با ثبات پرواز کرده و می-تواند ناگهانی تغییر مسیر بدهد بدون آنکه تعادلش به‌هم بخورد. Elzinga و همکاران در ۲۰۱۴ بر مبنای این توانایی خارق‌العاده یک مگس‌ربات[5] ساختند. اما با وجود این موفقیت‌ها نویز زیاد این پرنده که مهمترین ایراد است هنوز حل نشده و از همین رو تحقیقات زیست الگوئی برای شناخت و درک بهترین مدل‌های ممکن از حشرات برای حل این مشکل همچنان ادامه دارد[۴۰].

ریزربات‌های آب‌پیما یکی دیگر از محصولات جذاب زیست-الگوئی‌اند که با الگوبرداری از حرکت سن‌های آب‌پیما ساخته شده‌اند. این حشرات به‌راحتی روی آب راه می‌روند و یا به بالا پریده و به‌شکل عجیب و کنترل نشده‌ای دوباره بر سطح آب می-نشینند (۲). این قدرت مانور به ساختمان و عملکرد نوک خمیده پاها بستگی دارد. ریزربات آب پیمای امروزی تا ۱۴ سانتیمتر پریده و بدون آنکه سطح آب را بشکند دوباره روی آب می‌نشینند (شکل۲۳) [۴۲].



شکل ۲۳: (a) ایستادن سن آب‌پیما روی سطح آب، (b) ربات الهام گرفته از آب‌پیما

[1] Biomimetic air vehicles
[2] Defense Advanced Research Projects Agency
[3] Biomimetic micro air vehicles
[4] هواپیماهای بدون سرنشین
[5] Robotic fly

هر وسیله نقلیه‌ای به ناوبری نیاز دارد و چون همه جانوران دارای چنین قدرتی هستند دانشمندان زیست‌الگو به بررسی ناوبری حیوانات پرداخته‌اند. درمیان جانوران، مورچه‌ها از قوی‌ترین و دقیق‌ترین سیستم ناوبری برخوردارند که می‌توانند بدون کوچکترین خطا مسیر لانه تا غذا را تشخیص داده و دائماً در تردد باشند. درعین حال مکانیسم‌های ناوبری در گونه‌های مختلف مورچه‌ها متفاوت است. برخی از گونه‌های اجتماعی آنها با ترشح ماده شیمیایی (فرومون) و گونه‌های انفرادی آنها با ضبط تصاویر محیط ناوبری می‌کنند. امروزه مهندسان زیست الگو از این رفتارهای هدایت‌شونده بصری و مکانیسم‌های حسی- حرکتی بسیار کارامد برای طراحی سیستم‌های ناوبری دقیق الهام می‌گیرند. تشخیص حرکت و اجتناب از برخورد و همچنین تثبیت پرواز از جمله این مکانیسم‌های فوق‌العاده برای الگوبردارند. طرح رباتهای‌زیستی[1] از ناوبری بصری مورچه‌ها الهام گرفته‌است. با- وجود این موفقیت‌ها دانشمندان هنوز نتوانسته‌اند برداشت کامل نورولوژیکی از شیوه ناوبری حشرات برای طراحی سیستم‌های مستقل بیابند[۴۳].

اگرچه اصول زیست‌الگوی حشرات بر مبنای هفت گرایشی که بیان شد در رشته‌های مختلف مهندسی به‌کار گرفته شده، اما الگوگیری از حشرات و الهام از پیچیدگی‌های خلقت آنها در زمینه‌های دیگر نیز مورد توجه محققان است. یکی از این زمینه‌ها معماری است. طراحان سازه به‌شدت به‌دنبال درک راز و رمز لانه‌های حشرات اجتماعی (زنبورها، مورچه‌ها و موریانه‌ها) هستند تا از خصوصیات معماری و ویژگی‌های عجیب آنها برای طراحی‌های خاص الگوبرداری کنند. جالب‌ترین نمونه، لانه موریانه‌های بیابانی است که به شکل تپه‌ای کوچک است. این لانه‌ها، دالان‌ها و اتاقک‌هایی دارند که هوا در آنها نفوذ می‌کند و اکسیژن به مرکز لانه رسیده و دی‌اکسیدکربن خارج می‌شود. دالان‌هایی مویرگی در همه‌جای لانه، اتاقک‌ها را به هم وصل می‌کنند تا همیشه هوایی تازه و کاملاً خنک در لانه جریان داشته باشد (شکل۲۴ -a). این سازه الهام‌بخش معماران شرکت آروپ[2] برای طراحی برج تجاری هراره زیمبابوه بوده تا تالار عظیم آن بدون هر گونه خنک‌کننده با سیستم تهویه طبیعی هوایی کاملاً مطبوع داشته باشد (شکل۲۴) (۳)[۴۴].

معماران همچنین از ساختار هندسی بسیار پیچیده و بی‌نظیر لانه- های زنبورهای عسل و وسپ‌ها[3] برای ساخت ساختمان‌های محکم و ضد زلزله الهام گرفته‌اند[۴۵].

دانش زیست‌الگو با همه قدمت آن و تلاش‌های محققان گرایش- های مختلف اکنون فقط بر دروازه‌ای از عجایب خلقت و از جمله دنیای شگفت‌انگیز حشرات ایستاده تا بی‌نهایت الگو برای الهام گرفتن و الگوبرداری را در مقابل دیدگان ما قرار دهد. این دانش و فناوری نوین در دانشگاه تهران با قدمتی نزدیک به دوازده سال ابتدا با ساخت شبه‌آنزیم‌ها در مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک در حوزه آنزیم‌های مصنوعی پایه‌گذاری شد[۵۴-۴۶] سپس تلاش متخصصان هنر و معماری، مهندسی بیونیک و رباتیک در دانشگاه قدم‌های بزرگی مانند طراحی و ساخت ربات انسان‌نما (سورنا) را شکل داد. راه اندازی رشته کارشناسی ارشد «زیست الگو» در

شکل۲۴: (a) موریانه‌های بیابانی و (b) تالار دروازه شرقی مجتمع تجاری هراره زیمبابوه

[1] Bio Robotic
[2] Arup
[3] Wasps (انواع زنبورهایی که دارای بدنی تپل و بند عرضی نازک در شکم و سینه هستند)

دانشکده علوم و فنون نوین (۱۳۹۶) و تأسیس هسته پژوهشی زیست‌الگو و الهام‌زیستی (۱۳۹۷) نیز به سازماندهی و توسعه این رشته بسیار کمک نموده است. همچنین تدوین استاندارد ملی زیست الگو (۱۳۹۶) توسط متخصصان دانشگاه و سازمان ملی استاندارد، اکنون راهنمای ارزشمندی برای محققان کشور است[۵۵].

قطعاً الهام و الگوبرداری از شگفتی‌های دنیای حشرات در زمینه‌های بیوشیمی و بیوفیزیک، سلولی‌مولکولی، مهندسی‌پزشکی، رباتیک، هوا فضا، طراحی صنعتی و معماری یکی از جذاب‌ترین زمینه‌های فعالیت‌های علمی زیست‌الگوئی است. به‌یقین رونق فعالیت‌های علمی در این رشته، آینده روشنی از پیشرفت علم و فناوری زیست‌الگو و الهام‌زیستی را در کشور نوید می‌دهد.

تشکر و قدردانی

وظیفه خود میدانیم تا از اشارات و راهنمایی های حکیمانه استاد ارجمند جناب آقای دکتر موسوی موحدی که مشوق نگارش این مقاله بودند و بسیار بما آموختند، صمیمانه قدردانی نماییم. قطعاً زحمات خالصانه ایشان برای شکوفایی و رشد این دانش در کشور از خاطره‌ها فراموش نمی‌گردد.

به استحضار می رساند این مقاله کل یا بخشی از آن در جایی به چاپ نرسیده است.

وبگاه های بازدید شده در این مقاله

(1) https://asknature.org/idea/mirasol-display-technology/
(2) https://www.theverge.com/2015/7/30/9070591/robot-jump-water-insect-small-no-splash
(3)https://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/

منابع و مؤاخذ

[1]. Stassen, Chris (2005-09-10). "The Age of the Earth". Talk Origins Archive. Retrieved 2008-12-30.
[2]. May, R. M. (1988). How many species are there on earth? Science, 241(4872), 1441-1449.
[3]. Stringer, C.B. (1994), "Evolution of Early Humans", in Jones, Steve; Martin, Robert; Pilbeam, David, The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution, Cambridge University Press, p. 242, ISBN 978-0-521-32370-3.
[4]. McHenry, H.M (2009), "Human Evolution", in Ruse, Michael; Travis, Joseph, Evolution: The First Four Billion Years, Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, p. 265, ISBN 978-0-674-03175-3.
[۵]. موسوی موحدی، ع.ا. (۱۳۹۲) . زیست الگو: همگرایی در علم و حکمت، نشریه نشاء علم، مجلد۴، شماره ۱،صص ۶-۹ .

[6]. Benyus, J.M. (2009) Biomimicry: Innovation inspired by nature. HarperCollins e-books.
[7]. Hwang, J., Jeong, Y., Park, J. M., Lee, K. H., Hong, J. W., & Choi, J. (2015). Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine. International Journal of Nanomedicine, 10, 5701.
[8]. Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics—using nature to inspire human innovation. Bioinspiration & Biomimetics, 1(1), P1.
[۹]. موسوی موحدی، زینب (۱۳۹۵). فنآوری های جدید بر مبنای دانش زیست الگو و الهام زیستی، نشریه نشاء علم، مجلد۷، شماره ۱،صص ۵۳-۶۱.

[10]. Gorb, S.N. (2011). Insect-inspired technologies: insects as a source for biomimetics, in Insect Biotechnology, Springer. p. 241-264.
[11]. Liu, Z., Zhang, Z., & Ritchie, R. O. (2018). On the materials science of nature's arms race. Advanced Materials, 30(32), 1705220.
[12]. Vaclaw, M. C., Sprouse, P. A., Dittmer, N. T., Ghazvini, S., Middaugh, C. R., Kanost, M. R. ... & Dhar, P. (2018). Self-Assembled Coacervates of Chitosan and an Insect Cuticle Protein Containing a Rebers–Riddiford Motif. Biomacromolecules, 19(7), 2391-2400.
[13]. Pillai, C. K. S., Paul, W., & Sharma, C. P. (2009). Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. Progress in polymer science, 34(7), 641-678.
[14]. Fernandez, J. G., & Ingber, D. E. (2013). Bioinspired chitinous material solutions for environmental sustainability and medicine. Advanced Functional Materials, 23(36), 4454-4466.
[15]. Fernandez, J. G., & Ingber, D. E. (2012). Unexpected strength and toughness in chitosan-fibroin laminates inspired by insect cuticle. Advanced materials, 24(4), 480-484.

[16]. Zeighami, F., & Tehran, M. A. (2016). Developing optically efficient nanofiber coatings inspired by cyphochilus white beetle. Journal of Industrial Textiles, 46(2), 495-509.
[17]. Kim, J. H., Moon, J. H., Lee, S. Y., & Park, J. (2010). Biologically inspired humidity sensor based on three-dimensional photonic crystals. Applied Physics Letters, 97(10), 103701.
[18]. Han, Z., Mu, Z., Yin, W., Li, W., Niu, S., Zhang, J., & Ren, L. (2016). Biomimetic multifunctional surfaces inspired from animals. Advances in Colloid and Interface Science, 234, 27-50.
[19]. Gao, X., & Jiang, L. (2004). Biophysics: water-repellent legs of water striders. Nature, 432(7013), 36.
[20]. Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2010). Green tribology: principles, research areas and challenges. Philosophical Translations of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 368(1929), 4677-4694.
[21]. Favi, P. M., Yi, S., Lenaghan, S. C., Xia, L., & Zhang, M. (2014). Inspiration from the natural world: from bio-adhesives to bio-inspired adhesives. Journal of Adhesion Science and Technology, 28(3-4), 290-319.
[22]. Betz, O., Koerner, L., & Gorb, S. (2009). An insect's tongue as the model for two-phase viscous adhesives? ADHESION ADHESIVES& SEALANTS, 6(1), 32-35.
[23]. Bogue, R. (2013). Developments in biomimetic vision. Sensor Review, 33(1), 14-18.
[24]. Stürzl, W., Böddeker, N., Dittmar, L., & Egelhaaf, M. (2010). Mimicking honeybee eyes with a 280 field of view catadioptric imaging system. Bioinspiration & Biomimetics, 5(3), 036002.
[25]. Yi, W., Xiong, D. B., & Zhang, D. (2016). Biomimetic and Bioinspired Photonic Structures. Nano Advances, 1, 62-70.
[26]. 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.
[27]. Ragaei, M., Sabry, A. K. H., & Abdel-Rahman, A. (2016). Insect's photonic crystals and their applications. Bioscience Research, 13(1), 15-20.
[28]. Vukusic, P., & Sambles, J. R. (2003). Photonic structures in biology. Nature, 424(6950), 852.
[۲۹]. انزابی، نعیمه (۱۳۹۵). استفاده از علم زیست الگو در منسوجات، نشریه نشاء علم، مجلد ۷، شماره ۱، صص ۶۲-۷۰.
[30]. 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.
[31]. Ghiradella, H. T., & Butler, M. W. (2009). Many variations on a few themes: a broader look at development of iridescent scales (and feathers). Journal of the Royal Society Interface, 6(suppl_2), S243-S251.
[32]. Xu, J., & Guo, Z. (2013). Biomimetic photonic materials with tunable structural colors. Journal of Colloid and Interface Science, 406, 1-17.
[33]. Johnson, E. A. C., Bonser, R. H. C., & Jeronimidis, G. (2009). Recent advances in biomimetic sensing technologies. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 367(1893), 1559-1569.
[34]. Schmitz, H., Kahl, T., Soltner, H., & Bousack, H. (2011, March). Biomimetic infrared sensors based on the infrared receptors of pyrophilous insects. In Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication (Vol. 7975, p. 797506).
[35]. Lee, T., Jang, S., Jeong, M., & Cho, D. I. D. (2016, October). Allometric scaling of insects and animals for biomimetic robot design considerations. In 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (pp. 1541-1546). IEEE.
[36]. Delcomyn, F., & Nelson, M. E. (2000). Architectures for a biomimetic hexapod robot. Robotics and Autonomous Systems, 30(1-2), 5-15.
[37]. Aditya, S. K. V., Ignasov, J., Filonenko, K., Larsen, J. C., Baird, E., Hallam, J., ... & Manoonpong, P. (2017). Bio-Inspired Design and Kinematic Analysis of Dung Beetle-Like Legs. In 2nd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics.
[38]. Ward, T. A., Rezadad, M., Fearday, C. J., & Viyapuri, R. (2015). A review of biomimetic air vehicle research: 1984-2014. International Journal of Micro Air Vehicles, 7(3), 375-394.
[39]. Liu, H., Ravi, S., Kolomenskiy, D., & Tanaka, H. (2016). Biomechanics and biomimetics in insect-inspired flight systems. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371(1704), 20150390.
[40]. Lentink, D. (2014). Bioinspired flight control. Bioinspiration & Biomimetics, 9(2), 020301.

[41]. Tripplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (2005). Borror and DeLong's introduction to the study of insects. Thomson Brooks/Cole, Belmont, California.
[42]. Koh, J. S., Yang, E., Jung, G. P., Jung, S. P., Son, J. H., Lee, S. I., ... & Cho, K. J. (2015). Jumping on water: Surface tension–dominated jumping of water striders and robotic insects. Science, 349(6247), 517-521.
[43]. Graham, P., & Philippides, A. (2017). Vision for navigation: What can we learn from ants? Arthropod Structure & Development, 46(5), 718-722.
[44]. Gorb, S. N., & Gorb, E. V. (2016). Insect-inspired architecture: insects and other arthropods as a source for creative design in architecture. In Biomimetic Research for Architecture and Building Construction (pp. 57-83). Springer, Cham.
[45]. Pohl, G., & Nachtigall, W. (2015). Biomimetics for Architecture & Design: Nature-Analogies-Technology. Springer.
[46]. Moosavi-Movahedi, A. A., Semsarha, F., Heli, H., Nazari, K., Ghourchian, H., Hong, J. ... & Sefidbakht, Y. (2008). Micellar histidinate hematin complex as an artificial peroxidase enzyme model: Voltammetric and spectroscopic investigations. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 320(1-3), 213-221.
[47]. Farivar, F., Moosavi-Movahedi, A. A., Sefidbakht, Y., Nazari, K., Hong, J., & Sheibani, N. (2010). Cytochrome c in sodium dodecyl sulfate reverse micelle nanocage: From a classic electron carrier protein to an artificial peroxidase enzyme. Biochemical Engineering Journal, 49(1), 89-94.
[48]. Gharibi, H., Moosavi-Movahedi, Z., Javadian, S., Nazari, K., & Moosavi-Movahedi, A. A. (2011). Vesicular Mixed Gemini− SDS− Hemin− Imidazole Complex as a Peroxidase-Like Nano Artificial Enzyme. The Journal of Physical Chemistry B, 115(16), 4671-4679.
[49]. Hong, J., Wang, W., Huang, K., Yang, W. Y., Zhao, Y. X., Xiao, B. L., ... & Moosavi-Movahedi, A. A. (2012). A highly efficient nano-cluster artificial peroxidase and its direct electrochemistry on a nano complex modified glassy carbon electrode. Analytical Sciences, 28(7), 711-716.
[50]. Hong, J., et al., Direct electrochemistry of artificial peroxidase based on self-assembled cytochrome c-SDS-nano-micelle. Analytical letters, 2012. 45(15): p. 2221-2235.
[51]. Kermani, H. A., Shockravi, A., Moosavi-Movahedi, Z., Khalafi-Nezhad, A., Behrouz, S., Tsai, F. Y. ... & Moosavi-Movahedi, A. A. (2013). A surfactant–heme–sulfonyl imidazole system as a nano-artificial enzyme. Journal of the Iranian Chemical Society, 10(5), 961-968.
[52]. Yang, W. Y., Hong, H., Zhao, Y. X., Xiao, B. L., Gao, Y. F., Yang, T., ... & Moosavi-Movahedi, Z. (2013). Electrochemical study of a nano vesicular artificial peroxidase on a functional nano complex modified glassy carbon electrode. J. New Mat. Electrochem. Syst, 16, 89-95.
[53]. Moosavi-Movahedi, Z., Kalejahi, E. S., Nourisefat, M., Maghami, P., Poursasan, N., & Moosavi-Movahedi, A. A. (2017). Mixed SDS-Hemin-Imidazole at low ionic strength being efficient peroxidase-like as a nanozyme. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 522, 233-241.
[54]. Sajadimehr, Y., Moosavi-Movahedi, Z., Haghighi, M. G., Miyardan, A. B., Nourisefat, M., & Moosavi-Movahedi, A. A. (2019). Iron-Porphyrin/Cysteine/PEG as Pseudo-Chloroperoxidase Nanozyme. ChemistrySelect, 4(35), 10357-10364.
[۵۵]. استاندارد ملی ایران، بیومیمتیک(زیست الگو)، اصطلاحات و تعاریف، مفاهیم و روش‌شناسی. شماره۲۲۱۲۷ چاپ اول ۱۳۹۶، ICS: 07.080 ، کمیته تدوین: دکتر علی‌اکبر موسوی موحدی(رئیس)، دکتر فرنوش عطار(دبیر)، دکتر مهدی ضرابی، دکتر منصوره مظاهری، دکتر زینب موسوی موحدی و دکتر مریم نوری صفت.