

پاهای مارمولک‌ها، آبدزدک‌ها و عنکبوت‌ها

در بدن بسیاری از حیوانات ساختارهای نانو وجود دارد. بیوتریبولوژی، مطالعه اصطکاک، روان‌کنندگی و فرسایش در مورد موجودات زنده است. بررسی پدیده‌های چسبندگی پای مارمولک از نمونه‌های مثال‌هایی است که در حوزه بررسی این دانش قرار می‌گیرد. مارمولک‌های گکو گونه‌های شناخته شده در قابلیت بالا رفتن از سطوح صاف و حتی چسبیدن به سقف و راه رفتن روی آن هستند. آبدزدک‌ها، حشرات کوچکی هستند که می‌توانند روی آب اسکی بروند بدون آنکه پاهای آن‌ها در آب فرو رود و خیس شود. عنکبوت قابلیت فوق‌العاده‌ای در چسبیدن و بالارفتن از سطوح صاف دارد. این مقاله به بررسی چسبندگی این موجودات بر اساس نیروهای واندروالس بین نانوساختار پا و سطح، پرداخته است. از ساختار مشابه بدن این موجودات در کاربردهای فناوری نانو استفاده شده است.

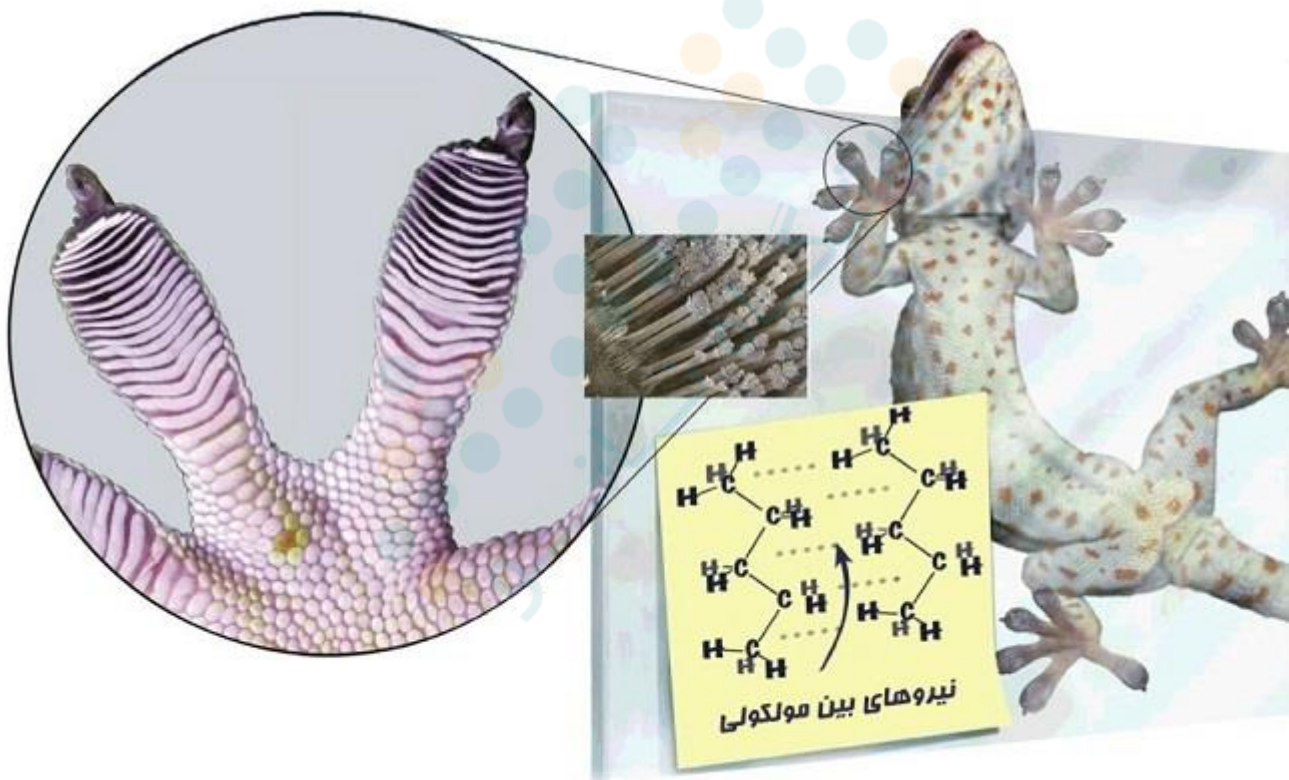
پاهای مارمولک‌ها، آب‌دزدک‌ها و عنکبوت‌ها

زمین‌مهد نانوفناوری است و طراح و سازنده موجودات، قدرتی بی‌کرانی دارد که اکنون هیچ‌کس نمی‌تواند آن را انکار کند. نانو در حیات وابسته به علم محدود بشری است که باید ابزارهایی مثل میکروسکوپ‌های قدرتمند الکترونی را برای دیدن این ابعاد استفاده کند، نیست و از روزی که موجودات ایجاد شده‌اند، نانوساختارها و پدیده‌های نانومتری و حتی فراتر از آن بوده‌اند. فکر کنید که هر مارمولک، پشه، مگس، سوسک یا آب‌دزدکی که می‌بینید بدون استفاده از روش‌های پرهزینه ساخت، از پاهایی برخوردارند که نانوساختارهایی دارد. شما خیلی از این موجودات را دیده‌اید. اما با مطالعه این مقاله متوجه خواهید شد که از این به بعد باید با دقت بیشتری به حرکت‌های این حیوانات توجه کنید.

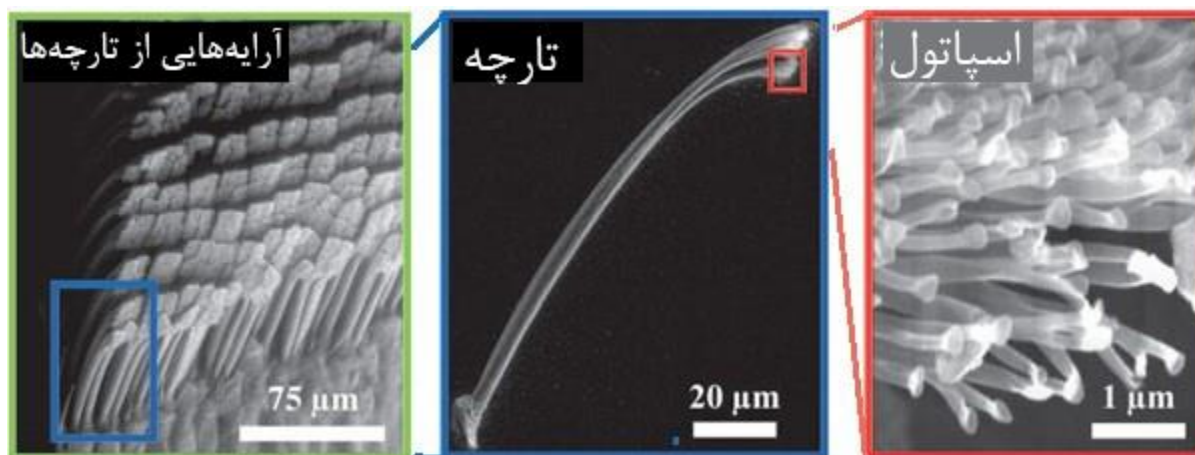
تریبولوژی مطالعه اصطکاک، روان‌کنندگی و فرسایش است، زمانی که در مورد موجودات زنده مطرح می‌شود "بیوتریبولوژی" نامیده می‌شود. بررسی پدیده‌های چسبندگی پای مارمولک از نمونه‌های مثال‌هایی است که در حوزه بررسی این دانش قرار می‌گیرد. مارمولک‌های گکو گونه‌های شناخته شده‌ای هستند که در قابلیت بالا رفتن از سطوح صاف و حتی چسبیدن به سقف و راه رفتن روی آن می‌باشد. بین پای مارمولک و سطح نیروی چسبندگی بالایی وجود دارد. اما این نیرو از کجا آمده است؟ منشأ این نیروی چسبنده سوالی بوده که مدت زیادی بی‌پاسخ مانده است. در سال ۲۰۰۰ گزارشی از پاهای چسبنده مارمولک به چاپ رسید که در آن مکانیزم چسبندگی پاهای مارمولک بیان شده بود. آن‌ها این نیروی چسبندگی خاص را ناشی از تجمع نیروی واندروالس بین رشته‌های متعدد پای گکو و مولکول‌های سطحی مواد جامد عنوان کردند. کشف این حقیقت نیز مرهون استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی قدرتمندی بود که می‌توانست ابعاد نانومتری را به نمایش بگذارد [۱].



شکل ۱: پدیده مشابه در پای انواع مارمولک ها



شکل ۲: رمز حرکت مارمولک ها روی دیوار در پاهای آن ها است [۳].

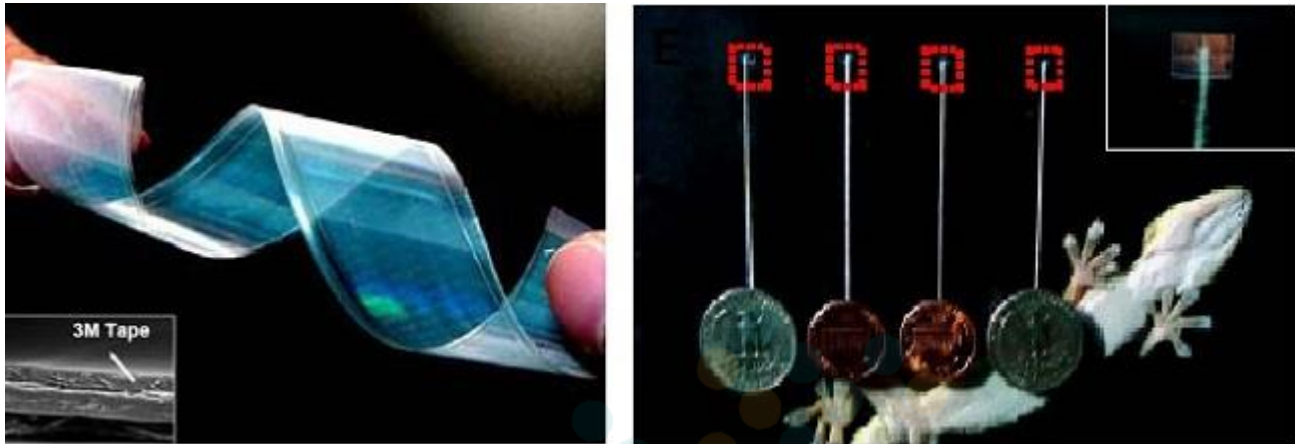


شکل ۳: ساختار ریز پاهای مارمولک‌ها

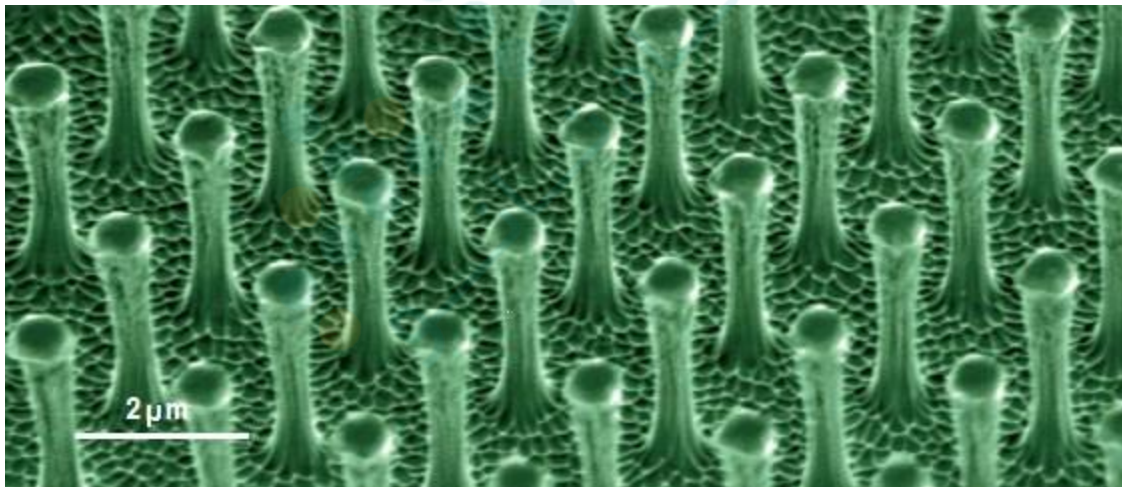
نیروی واندروالس یک نیروی جاذبه یا دافعه الکترومغناطیسی ضعیف است که بین مولکول‌های خنثای نزدیک به هم وجود دارد. با این حال ارتباط بین این نیرو در مقیاس مولکولی و چسبندگی پاهای مارمولک غیرقابل قبول به نظر می‌رسد [۳]. بررسی انجام شده با میکروسکوپ الکترونی روی پاهای یک گکوی توکای در آسیای جنوبی یافت می‌شود (نشان می‌دهد که نزدیک به پانصد هزار موی (ستا) برجسته روی پای مارمولک قرار دارد. هر مو حدود ۱۰۰ میکرومتر (دو برابر قطر موی انسان) طول دارد و ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ رشته ظریف با برجستگی انتهایی (اسپاتول) روی آن است. به خاطر این ساختار سلسله مراتبی، فاصله بین مولکول‌های سطحی و موها خیلی نزدیکتر به هم می‌شود و نیروهای واندروالس عمل می‌کند. هر چند نیروی ایجاد شده با هر موی واحد اندک است اما تجمع نیروها از هزاران رشته مو به اندازه کافی قدرتمند می‌شود. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که یک پای گکوی ۱۰۰ نیوتن نیروی چسبندگی ایجاد می‌کند. از سویی نیروی ایجاد شده تک رشته ای می‌تواند وزن یک مورچه را تحمل کند و با یک میلیون رشته با مساحتی کمتر از یک سکه ۱۹۶ نیوتن نیروی چسبندگی ایجاد می‌شود. در واقع یک گکو می‌تواند بدنش را با یک بند انگشت هم نگه دارد. پای گکو هم خصوصیت خود تمیز شونده و ضد خوردگی نیز دارد و همیشه تمیز است. این به خاطر عدم تعادل نیروهای چسبندگی یک ذره آلوده از رشته موهای مجاور است [۳].

ایده نوار چسب‌های گکو از مکانیزم استفاده شده در پای مارمولک الهام گرفته شده است تا بتواند حرکت روی سطوح صاف و سقف‌های شیشه‌ای را ممکن کند. چسب گکو خودتمیز شونده می‌باشد و بارها چسبیده و جدا می‌شود. چسب گکو فیلمی با آرایه‌های فشرده‌ای از میله‌های منعطف پلی‌ایمیدی است که با روش لیتوگرافی پرتو الکترونی و حکاکی پلاسمای اکسیژن آماده می‌شود. این رشته‌ها به اندازه‌ای ظریف و فشرده هستند که نیروی چسبندگی گکو را به همان حد ایجاد کنند. موهای نوار چسب گکو ۲۰۰۰ نانومتر طول و ۲۰۰ نانومتر قطر دارند و به سطحی منعطف چسبیده است. یک سانتیمتر مربع از نوار گکو حدود ۱۰۰ میلیون از این رشته موها دارد و می‌تواند وزن یک کیلوگرم را روی صاف‌ترین سطوح تحمل کند. این چسب مواد شیمیایی مضر چسب‌های معمولی را ندارد. این نوار باید از کنار کشیده شود تا جدا شود. کاربرد چنین نواری می‌تواند در کاربردهای رباتیک باشد. با این حال در مرحله

کنونی فرایند ساخت نوار چسب گکو آنقدر طولانی و پرهزینه می باشد که فعلاً تجاری نیست. کاربردهایی که برای این چسب ها در نظر گرفته شده است، گیره ها و بخیه های جراحی، ابزارهای ایمنی برای صخره نوردی، بندهای یک طرفه نایلونی، بانداژهای ساده تر و دستکش های چسبنده برای دروازه بان ها و... می باشد [۶].

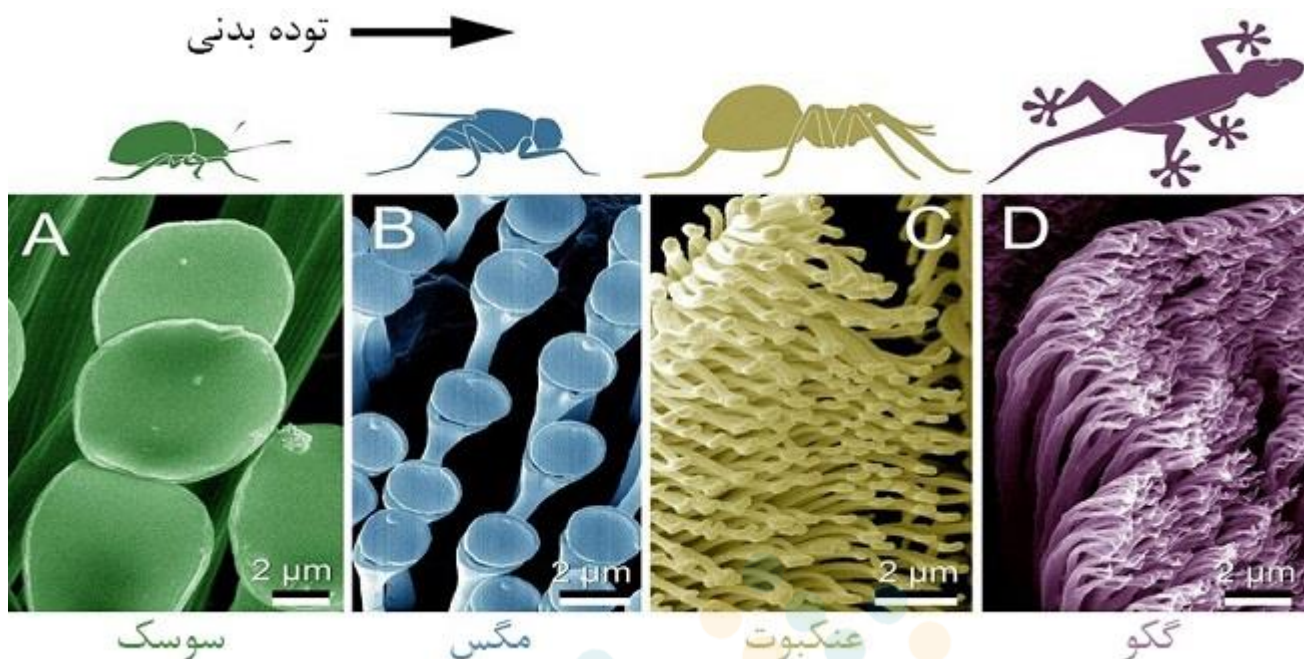


شکل ۴: نوار چسب گکو



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی موهای پلی ایمیدی میکرومتری شبیه به موهای پای گکو.

سوسک ها و مگس ها نیز نانوساختارهایی دارند که به آن ها کمک می کند تا به دیوارها و سقفها و چیزهایی که به ظاهر صافند بچسبند. در تغییر ابعاد موجود شکل این پاها تغییر می کند .



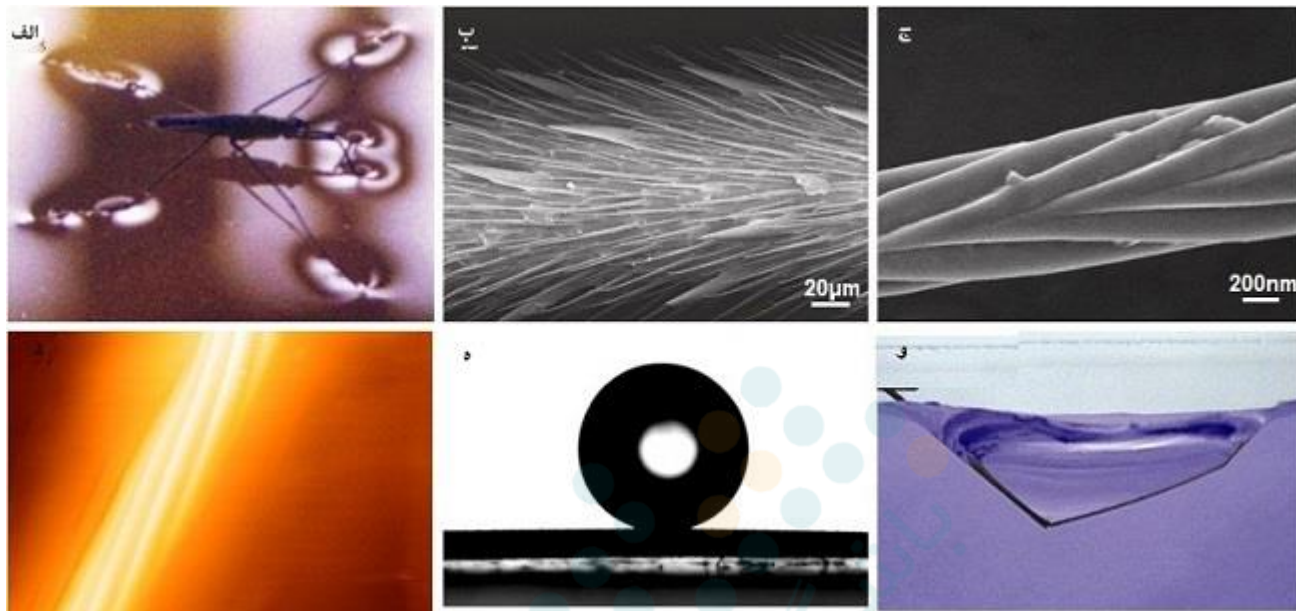
شکل ۶: شکل ستا و اسپاتول در سوسک، مگس، عنکبوت و گکو و تغییر آن ها

در زمان برداشتن پاهای مارمولک باید پاها را از دیوار بکند و این کار با لوله کردن ستاها به داخل انجام می‌شود [۳]. آبدزدک‌های گرایدای حشرات کوچکی حدود یک سانتیمتر هستند که به طور معمول روی سطح آب برکه‌ها، یا آب‌های ساکن دیده می‌شوند. شبیه به سایر حشرات آن‌ها هم ۶ پای متصل به هم دارند که از شمار زیادی ستا تشکیل شده است. آبدزدک روی آب اسکی هم می‌رود و بدون آنکه پاهای آن در آب فرو برود و خیس بشود این کار را انجام می‌دهد. در اثر راه رفتن آبدزدک سکون آب به هم نمی‌خورد. این مساله نیز مدت هاست که دانشمندان را به تفکر واداشته است. در گذشته دانشمندان علت این رخداد را کشش سطحی ناشی از انحنای سطوح آزاد می‌دانستند .

در سال ۲۰۰۴ این حقیقت مشخص شد که ساختار میکرو و نانومتری پاها در خواص ضد آب آن‌ها تاثیر بالایی دارد. ساختار پاهای آبدزدک‌ها طوری است که می‌توانند روی آب راه بروند. پنج علت برای رخ دادن این اتفاق وجود دارد؛ مساحت سطح، نیروهای گرانشی، نیروهای سطحی (نیروهای واندروالس) و یک سطح واکسی (آبگریز) روی پای آن‌ها و از همه مهم‌تر اینکه میکرومویهای پاهای آن‌ها از نانوشیارهای مارپیچی تشکیل شده است. سنجش مکانیکی پاها نشان داده است که حداکثر نیروی حمایت‌کننده یکی از پاها ۱۵ برابر کل وزن بدن حشره است. این راهنمای خوبی برای طراحی سطوح فوق آبگریز در حرکت و وسایل آبی است [۳].

تصاویری با کیفیت SEM نشان می‌دهد که میکرومویهای سوزنی شکل پاها را پوشانده‌اند. قطر مویهای انسان ۸۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است. قطر ستا در پای آبدزدک کمتر از ۳ میکرومتر است. شیارهای مارپیچ نانومتری در هر میکروستایی وجود دارند و ساختاری چند سطحی را ایجاد کرده‌اند. هوا بین فضای میروستاها و نانوشیارها محبوس شده تا بالشی از هوا را در سطح پاها ایجاد کند که

اجازه ی تر شدن پاها را نمی‌دهد. بنابراین آبدزدک می‌تواند با سرعت روی آب راه برود، بدون اینکه پاهایش خیس شود و این فوق آبریزی پاها در مقیاس ماکرو (ابعاد عینی) دیده می‌شود [۳].

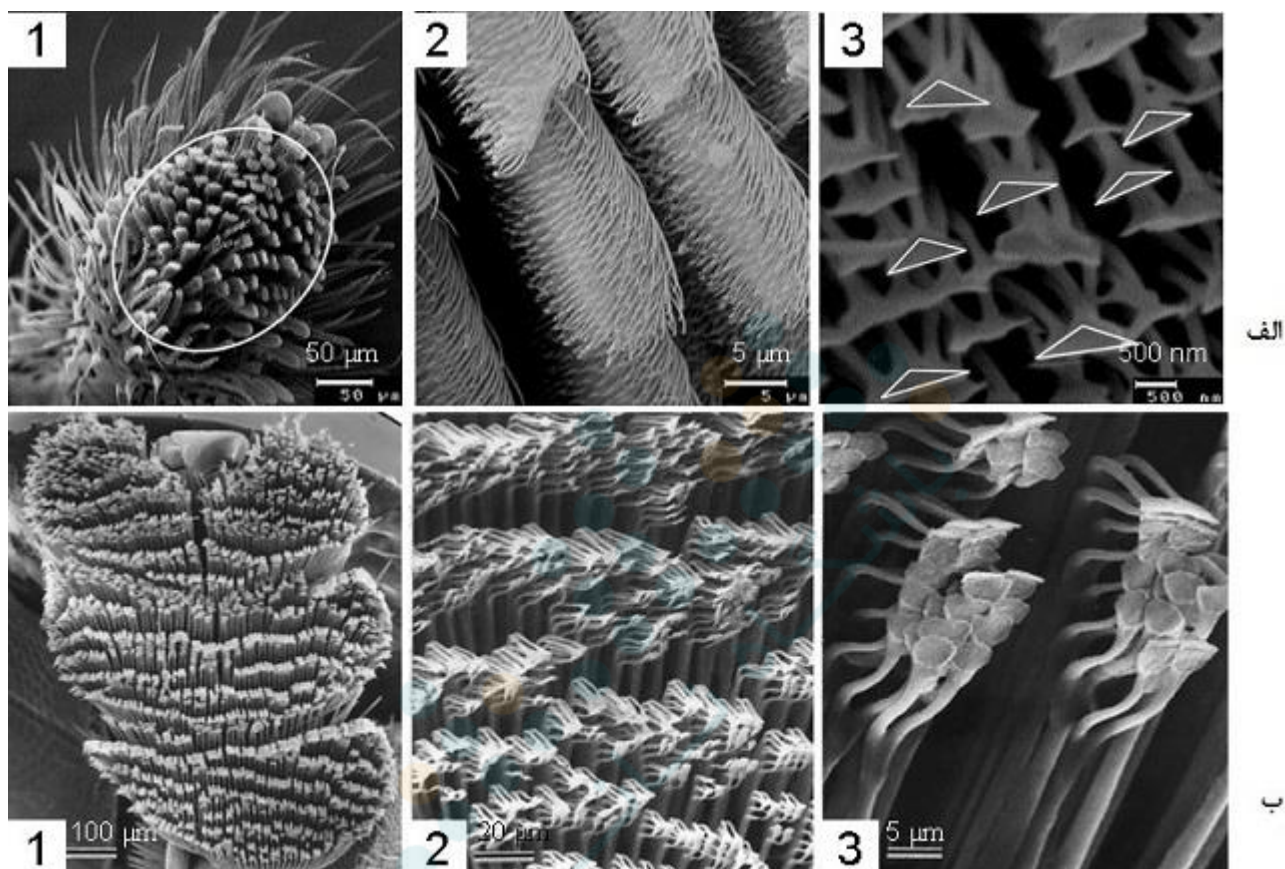


شکل ۷: الف) آبدزدک ایستاده روی آب؛ تصاویر SEM، ب) میکروستاهای پا، ج) نانوشیارها، د) تصویر AFM نانوشیارهای ستا، ه) یک قطره آب روی یک پا، و) حداکثر نفوذ پاها به داخل آب

بررسی‌ها نشان می‌دهد که وقتی پاها به سطح آب می‌خورند می‌توانند تا عمق ۴ میلیمتری فرو بروند و حجم آب دفع شده در این حالت، ۳۰۰ برابر حجم خود پا است. این دافعه ی آب از نیروی پشتیبان سطحی بالای آن نشأت می‌گیرد و نیروی تنه‌ای یکی از پاها کافی است تا ۱۵ برابر وزن آبدزدک روی سطح آب را تحمل کند. این نیروی پشتیبان مطمئن‌ترین تضمین برای آن است که آبدزدک حتی در طوفان‌های شدید نیز می‌تواند آزادانه روی سطح آب حرکت کند بدون آنکه در آب فرو رود. این کشف می‌تواند در تولید مواد ضد آب پیشرفته مفید و موثر باشد [۳].

قابلیت فوق العاده عنکبوت در چسبیدن و بالارفتن از سطوح صاف معلق بر اساس نیروهای واندروالس است. بعد از محاسبات آن‌ها دریافتند که نیرویی که پاها به عنکبوت می‌دهند، ۱۷۰ برابر وزن بدنش است. این نیرو کمی متاثر از محیط پیرامون می‌باشد، به صورتی که عنکبوت می‌تواند از سطوح تر یا صاف هم عبور کند. بعد از مشاهده ی پاهای عنکبوت زیر میکروسکوپ SEM مشخص شد در این پاها نیز تعداد زیادی موی ستا وجود دارد، که روی آن‌ها یک لایه چندصد نانومتری (ستول (Setule) قرار دارد. با این ستا و ستول‌ها، عنکبوت می‌تواند از سطح یک جامد بالا برود و همچنین اندازه‌گیری‌های بیشتر با AFM نشان داد که هر ستول می‌تواند ۴۰ نانونیوتن ایجاد کند، این آنقدر زیاد است که بتواند یک عنکبوت ریز ۱۵ میلی گرمی را جابجا کند. دانشمندان عقیده دارند این نیروی چسبندگی از تعامل واندروالسی بین ستول‌هایی که اتصال ضعیفی دارند و فاصله هر کدام از آن‌ها با هم حدود

چندین نانومتر است. تجمع اثر تعامل های بسیار خرد، روی همه ۸ پای عنکبوت می‌تواند به نیرویی منجر شود که در ابعاد عینی (ماکرومتری) بسیار بزرگ است [۳]. این ویژگی در بدن عنکبوت و پاهای آن به پدیده ای منجر میشود که کمک می کند عنکبوت در آب خیس نشود. بر این اساس پارچه هایی ساخته شده که در آب خیس نمی شوند [۴].



شکل ۸: نیروی چسبندگی پنهان ایجاد شده از میکروساختارها ردیف الف) تصویر SEM پاهای عنکبوت، و ب) پاهای سوسک

به جز گکو و عنکبوت چسبندگی فوق العاده در سوسک ها با سطح نیز با همان مکانیزم توجیه می‌شود. مشاهدات SEM نشان می دهد که سرهای تارهای شکمی پاهای سوسک به طور جمعی به هم می‌چسبند و خوشه‌هایی را می‌سازند که این خوشه‌ها به صورت ردیف ردیف مستقر شده‌اند [۳].

بیشتر حیوانات و حشرات با نیروی بالای چسبندگی روی پاهایشان قابلیت چسبندگی را از نیروی موینگی آب به دست آورده‌اند. با این حال گکوها، عنکبوت ها، مگس ها و برخی سوسک ها می‌توانند از سطوح عمود یا سقف ها بدون نیاز به آب بالا بروند. نوار چسب های ساخته شده با ساختار مشابه پاهای این موجودات می‌تواند بارها و بارها بچسبد و جدا شود. لباس های فضانوردان یا چسب هایی که زیر دریا است می‌تواند با این مکانیزم، حرکت آن ها را در سطوح خارجی تسهیل کند. در رباتیک نیز از این نوع چسب ها می‌تواند برای ساخت مارمولک های مصنوعی بهره برد [۳].

1. J. m. Benyus, Innovation inspired by nature Biomimicry, J. ECOS, No 129, 2006.
2. A. Lakhtakia, R. J. Martin-Palma, Engineered Biomimicry, Elsevier, 2013, p291
3. L. Jiang, L. Feng, Bioinspired Intelligent Nanostructured Interfacial Materials, 2010.
4. NatureTech Technology, video, part 1&2&3.
5. H. Yahya, Biomimetics, technology imitates Nature, Global Publishing, 1999.
6. Heinmann Chemistry, Bonding, surfaces and nanoparticles, pg173

