ماشین‌های مولکولی

محمدرضا ستاری
دانشجوی کارشناسی رشته شیمی کاربردی دانشگاه قم

چکیده

ماشـــین‌آلات، بخش جداناپذیری از زندگی انسان‌ها شـــده‌اند. با آغاز انقلاب صنعتی، پیشرفت و تحول در صنعت ماشـــین‌آلات، زندگی مردم را دچار تحول کرد. با ورود ماشـــین‌های بخار، در وقت و انرژی انســـان صرفه‌جویی شد که از فواید اصلی این موتورها بود. با گذشت زمان و باز هم با پیشرفت، موتورهای بخار جای خود را به موتورهای الکتریکی دادند. این موتورها آلودگی موتورهای بخار را نداشتند و از بازدهی بیشتری نیز برخوردار بودند. امروزه ما با طلوعی از پیشرفت جدید در صنعت ماشین‌آلات رو به رو هستیم اما این بار، این پیشرفت قابل دیدن با چشم نیست بلکه ابعادی در حد مولکول دارد و برای دیدن آن نیاز به میکروسکوپ‌های الکترونی داریم. این پیشـــرفت را ماشین‌های مولکولی می‌نامیم. پژوهش‌های بسیاری در مورد این ماشین‌ها صورت گرفته است اما توسعه این ماشین‌های مولکولی پیچیده هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد، همانند طلوع موتورهای بخار در چند صدسال پیش.

کلیدواژه‌ها: ماشین‌های مولکولی، پیوند مکانیکی، شیمی توپولوژی، روتاکسان‌ها، کاتنان‌ها

مقدمه

«تا چه اندازه کوچک می‌توانید ماشین بسازید؟» این پرسشی بود که ریچارد فاینمن[1] برنده جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۶۵، در آغاز یک سخنرانی در ســـال ۱۹۸۴ مطرح کرد. او به مخاطبان حاضر در جلســـه گفت: «بیایید در مورد ساخت ماشین‌هایی با قطعه‌های بسیار ریز صحبت کنیم».

او باور داشت که می‌توان ماشین‌هایی با ابعاد نانو ساخت که در طبیعـــت نیز نمونه‌هایی از آن‌ها وجود دارد و تاژک‌های باکتری را مثال زد؛ تاژک‌هایی که با چرخش خود، باکتری را رو به جلو حرکت می‌دهند.

آیا انسان با دستان بزرگ خود می‌تواند ماشین‌هایی آن‌چنان کوچک بسازد که برای دیدن آن‌ها نیاز به میکروسکوپ الکترونی باشد؟

یکی از این راه‌ها، ساختن دستی کوچک‌تر از دست انسان و برابر با ابعاد ماشـــین است که می‌تواند این ماشین‌ها را بسازد. به گفته فاینمن، این راه امتحان شده بود ولی موفقیت بزرگی نداشت.

هدف از سخنرانی فاینمن، الهام بخشیدن به پژوهشگران بود تا بتوانند محدودیت‌ها را در ســـاخت این ماشین‌ها کنار بزنند. فاینمن در پایان سخنرانی خود با شیطنت گفت: «اوقات خوبی را در طراحی مجدد ماشـــین‌آلات مشابه داشته باشید تا ببینید که آیا می‌توانید این کار را انجام دهید یا خیر. ۲۵ تا ۳۰ سال به آن زمان دهید، قطعاً اســـتفاده سودمندی از آن خواهید برد، آن استفاده چیست؟ من نمی‌دانم».

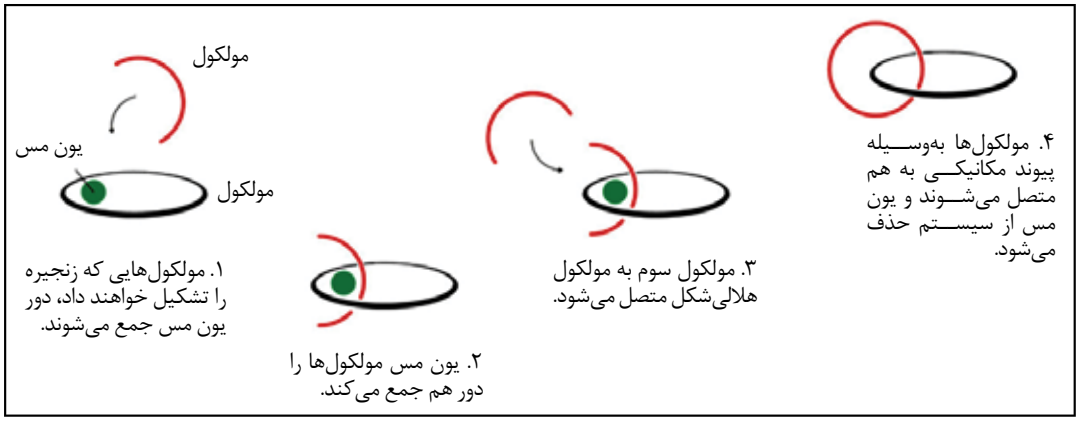
ترکیب‌های کمپلکس؛ نقطه آغاز ماشین‌های مولکولی

بخش چشمگیری از پیشرفت در ماشین‌آلات مولکولی، ریشه در ظهور کمپلکس‌های مولکولی به هم پیوسته دارد. در چنین کمپلکس‌هایی، قطعه‌ها با پیوندهای کووالانســـی به هم متصل نیستند، بلکه با پیوندهای مکانیکی به هم متصل شده‌اند و مانند حلقه در یکدیگر قرار دارند. در میانه قرن بیستم، شیمی‌دانان در تلاش بودند زنجیره‌هـــای مولکولی تولید کنند که مولکول‌های حلقه‌ای بتوانند در آن‌ها به هم متصل شوند.

در دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی، چند گروه پژوهشـــی گزارش دادند که توانسته‌اند مولکول‌های زنجیره‌ای تولید کنند ولی مقدار آن بسیار کم و روش تولید بســـیار پیچیده بود. پس از سال‌ها، سرانجام در ســـال ۱۹۸۳ یک گروه فرانسوی، به سرپرستی ژان پیر ســـاوژ[2] با اســـتفاده از یون مس موفق به کنترل ساخت این مولکول‌ها شد.

ژان پیر ساوژ در زمینه فوتوشیمی کار می‌کرد. در فوتوشیمی کمپلکس‌های مولکولی ساخته می‌شوند که می‌توانند از انرژی موجود در پرتوهای خورشید برای هدایت واکنش‌های شیمیایی استفاده کنند.

ســـاوژ مدلی از یکی از این کمپلکس‌های فعال فوتوشیمیایی ساخت و متوجه شد که کمپلکس ساخته‌شده به زنجیره مولکولی شباهت دارد، به این صورت که دو مولکول در اطراف یون مس به هم آویخته شده‌اند، شکل ۱.

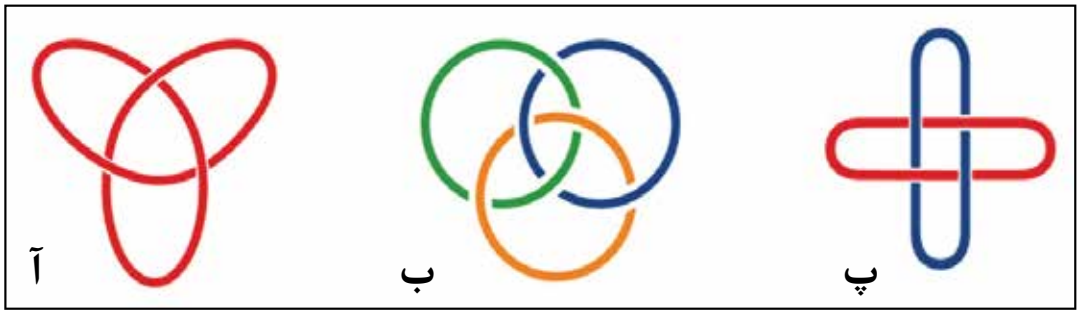


▲ شکل ۱ به کمک یون مس، مولکول‌ها با پیوند مکانیکی با هم پیوند می‌یابند.

در پژوهش‌ها و تلاش‌های قبلی برای ایجاد مولکولی مشابه، پژوهشگران توانسته بودند تنها به بازدهی چنددرصدی برسند اما به لطف یون مس، ساوژ به بازده چشمگیر ۴۲ درصد دست یافت.

با این روش انقلابی، شیمی توپولوژی[۳] ـ بخشی از علم شیمی که در آن معمولاً با استفاده از یون‌های فلزی، کمپلکس‌ها را به‌طور فزاینده‌ای مانند زنجیره یا گره‌های پیچیده به هم پیوند می‌زنند ـ دوباره زنده شد.

ژان پیر ساوژ و جیمز فریزر استودارت[۴] رهبران این زمینه هستند و مولکول‌های پیچیده‌ای را ساخته‌اند، شکل ۲.

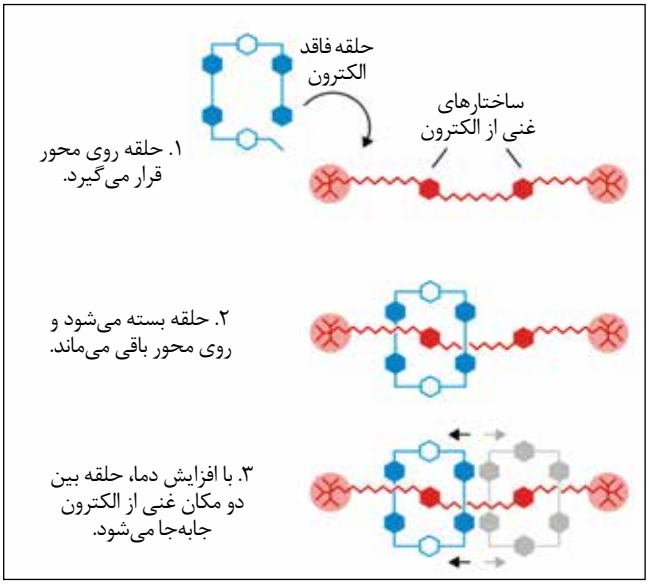


▲ شکل۲ آ) مولکول گره سه پره[۵] ساخته‌شده توسط ساوژ. ب) مولکول حلقه‌های برومین[۶] ساخته‌شده توسط استودارت. پ) گره سلیمان[۷] ساخته‌شده توسط ساوژ و استودارت.

حال این مولکول‌ها چه ربطی به ماشین‌های مولکولی دارند؟

یک ماشین برای اینکه وظیفه‌ای را انجام دهد باید از چند قسمت تشکیل شده باشد که بتوانند نسبت به یکدیگر حرکت کنند. ساوژ متوجه شد که دو حلقه به هم پیوسته این نیاز را برطرف می‌کند. یعنی دو حلقه به هم پیوسته توانایی حرکت محدود دارند. در سال ۱۹۹۴، گروه ساوژ موفق شد که یک کاتنانی[۸] یا همان مولکول‌های در هم پیچیده را تولید کند که در آن یک حلقه به‌طور کنترل شده دور حلقه دیگر می‌چرخید. هنگامی که انرژی اضافه‌ای به مولکول داده می‌شد، می‌توانست یک دور دیگر بچرخد. این، نخستین ایده ماشین‌های مولکولی غیر بیولوژیکی بود.

پیش از آن یعنی در سال ۱۹۹۱، استودارت و گروهش، یک حلقه باز بدون الکترون و یک محور دارای دو مکان غنی از الکترون ساختند. هنگامی که این دو مولکول در یک محلول قرار گرفتند حلقه بدون

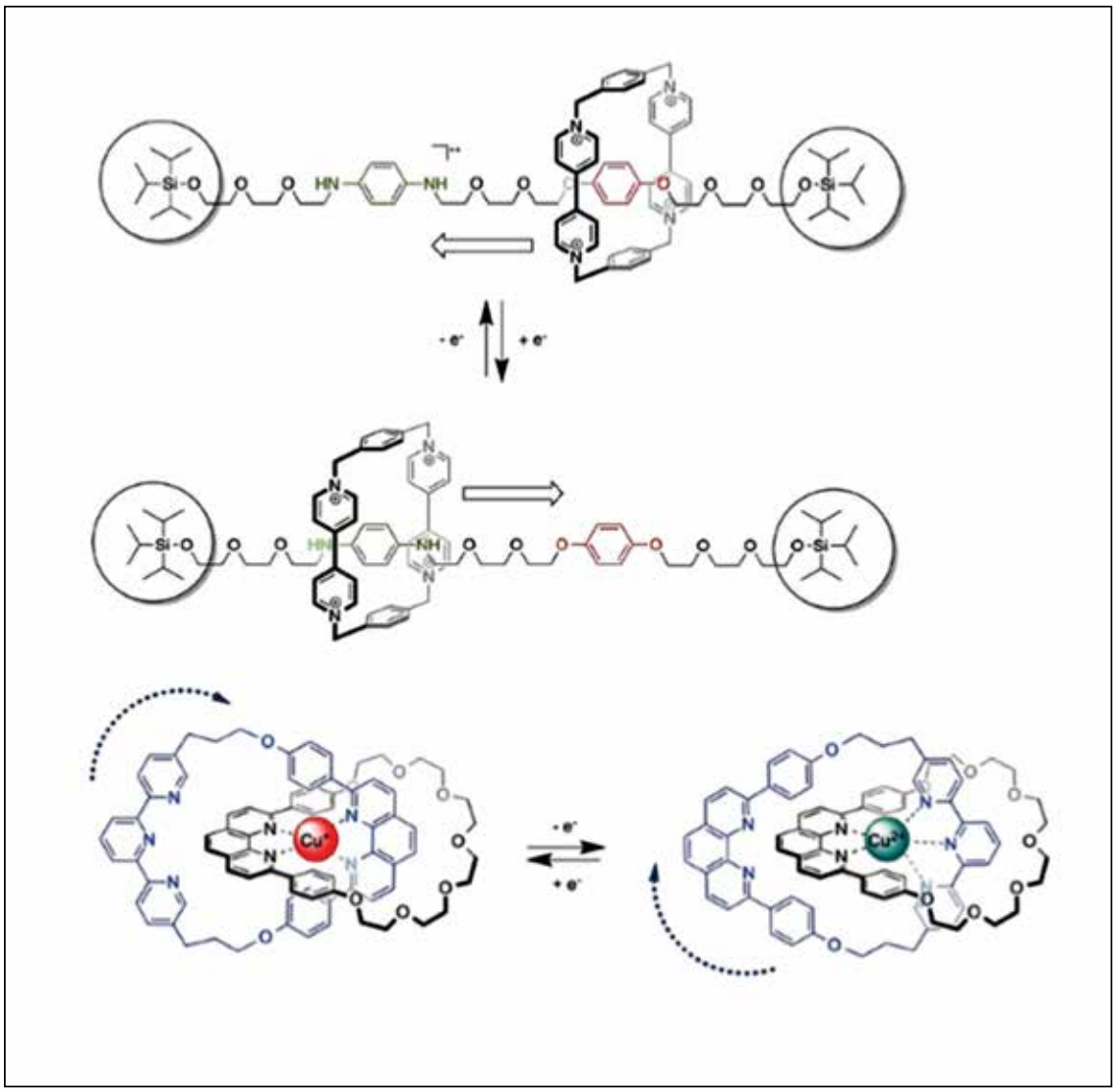


▲ شکل ۳ آ) استودارت، یک مکان انتقال مولکولی ایجاد کرد تا حلقه به‌صورت کنترل‌شده در امتداد محور حرکت کند.

الکترون، جذب محور غنی از الکترون شـــد. در مرحله بعد، دهانه حلقه را بســـتند تا حلقه روی محور مولکولی باقی بماند. در نتیجه آن‌ها توانستند که یک روتاکسان[۹] ایجاد کنند؛ ساختاری شامل یک مولکول حلقه‌ای، روی محوری مولکولی که به‌صورت مکانیکی به آن متصل شده است.

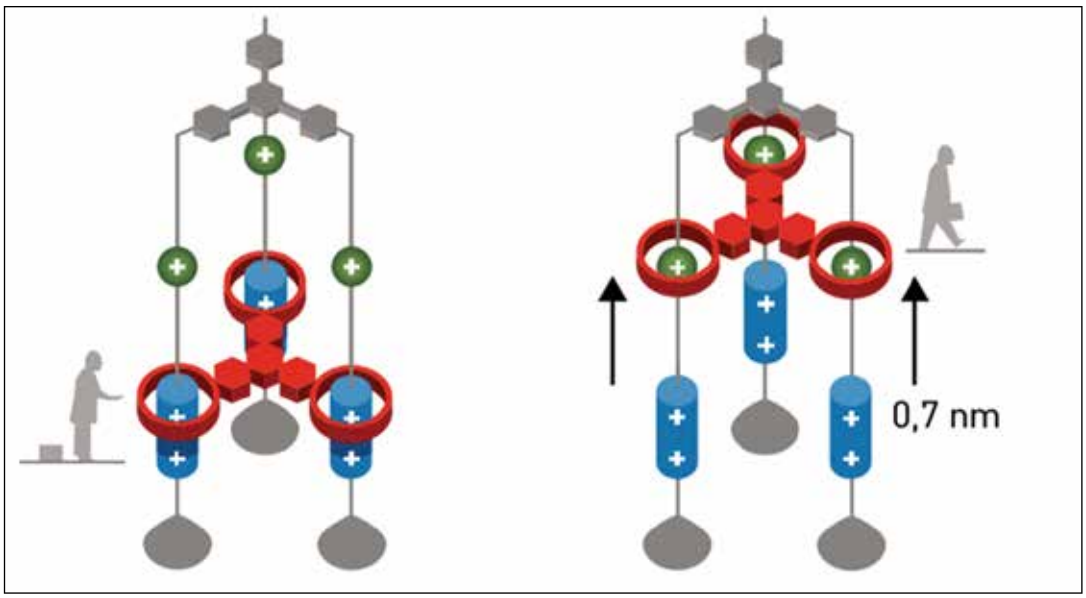
پس از آن اســـتودارت با دادن گرما به روتاکســـان، حلقه را به‌صورت کاملاً کنترل‌شـــده در محل‌های غنی از الکترون روی محور مولکولی، به عقب و جلو هدایت کرد، شکل ۳.

این گروه، یک حلقه بیس ـ پاراکوات سیکلوفن[۱۰] را به محور روتاکسان شامل دو گروه غنی از الکترون بنزیدین[۱۱] و دی فنول‌ها وارد کردند. در طی چرخه‌های اکسایش ـ کاهش و یا تغییرات pH، این حلقه با کسب انرژی بین دو مکان غنی از الکترون یعنی بنزیدین و دی فنول‌ها جابه‌جا می‌شود. گروه ساوژ نیز یک کاتنانی طراحی کرد که در آن ترپیریدین[۱۲] و فنانترولین[۱۳] ساختارهای حلقه‌ای را تشکیل دادند و در مرکز آن‌ها یون Cu^{+} قرار داشت. با کاهش و اکسایش این یون، یکی از این دو حلقه‌ها جابه‌جا می‌شد، شکل ۴.



▲ شکل ۴ حرکات کنترل‌شده الکتروشیمیایی کاتنان‌ها

از سال ۱۹۹۴، گروه استودارت از روتاکسان‌های مختلفی برای ساخت ماشین‌های مولکولی استفاده کرد. یکی از این مولکول‌ها بالابر مولکولی نام دارد که در سال ۲۰۰۴ ساخته شد، شکل ۵. این مولکول می‌تواند با اعمال نیرویی برابر با ۲۰۰ پیکونیوتون خود را ۰/۷ نانومتر بالاتر از سطح بیاورد. در سال ۲۰۰۵ نیز ماهیچه مصنوعی ساخته شد که در آن، روتاکسان‌ها با انقباضی در حدود ۲/۸ نانومتر توانست یک لایه طلای بسیار نازک را خم کند.

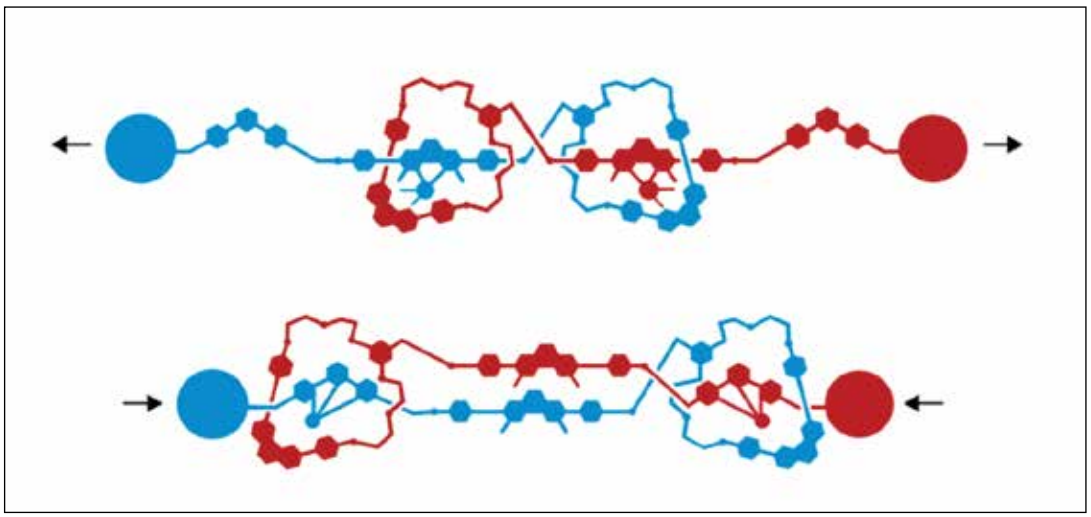


▲ شکل ۵ بالابر مولکولی استودارت

گروه استودرات همچنین توانست تراشه‌ای رایانه‌ای مبتنی بر کاتنان و روتاکسان بسازد. در این تراشه صدها روتاکسان وجود دارد که توانایی ذخیره ۱۶۰ کیلوبایت اطلاعات را با ظرفیت ۱۰۰ گیگابایت بر سانتی‌متر مربع دارد. شاید این مقدار کم باشد اما در مقایسه با تراشه ریزی که امروزه در رایانه‌ها قرار دارد بسیار ریزتر است و ممکن است انقلابی بزرگ در زمینه فناوری اطلاعات ایجاد کند.

ساوژ همچنین پتانسیل روتاکسان‌ها را بررسی کرد. در سال ۲۰۰۰ او موفق شد دو مولکول حلقه‌ای را دور و یا نزدیک کند چنان‌که ساختار الاستیکی از خود نشان دهند. این ساختار شبیه ساختار عضلات انسان است، شکل ۶.

این تیم همچنین توانست ساختاری شبیه به یک موتور بسازد که در آن حلقه‌های روتاکسان، به‌طور متناوب در جهت‌های مختلف می‌چرخند.



▲ شکل ۶ ساوژ توانست دو مولکول حلقوی با ساختاری مشابه ساختار عضلات انسان را به هم نزدیک و یا دور کند.

نخستین موتور مولکولی کنترل‌پذیر

تا این جای کار، ما توانستیم موتورهای مولکولی بسازیم که در جهت‌های مختلفی به‌طور متناوب می‌چرخند اما هدف، تولید موتورهایی با این ویژگی است که بتوانند در یک جهت بچرخند و بتوان آن‌ها را کنترل کرد. در دهه ۱۹۹۰، تلاش‌های مختلفی در این باره صورت گرفت که در نهایت برای نخستین بار، بن فرینگا[۱۴] توانست موتور مولکولی کنترل‌شده‌ای را بسازد.

در سال ۱۹۹۹، نخستین موتور مولکولی با توانایی چرخش در یک جهت توسط بن فرینگا ساخته شد. در حالت عادی، حرکت

مولکول‌ها به‌صورت تصادفی است. به‌طور متوسط یک مولکول در حال چرخش، چند بار به سمت راست و چند بار نیز به سمت چپ حرکت می‌کند اما فرینگا مولکولی را طراحی کرد که به‌صورت مکانیکی بتواند در یک جهت خاص بچرخد، شکل ۷.

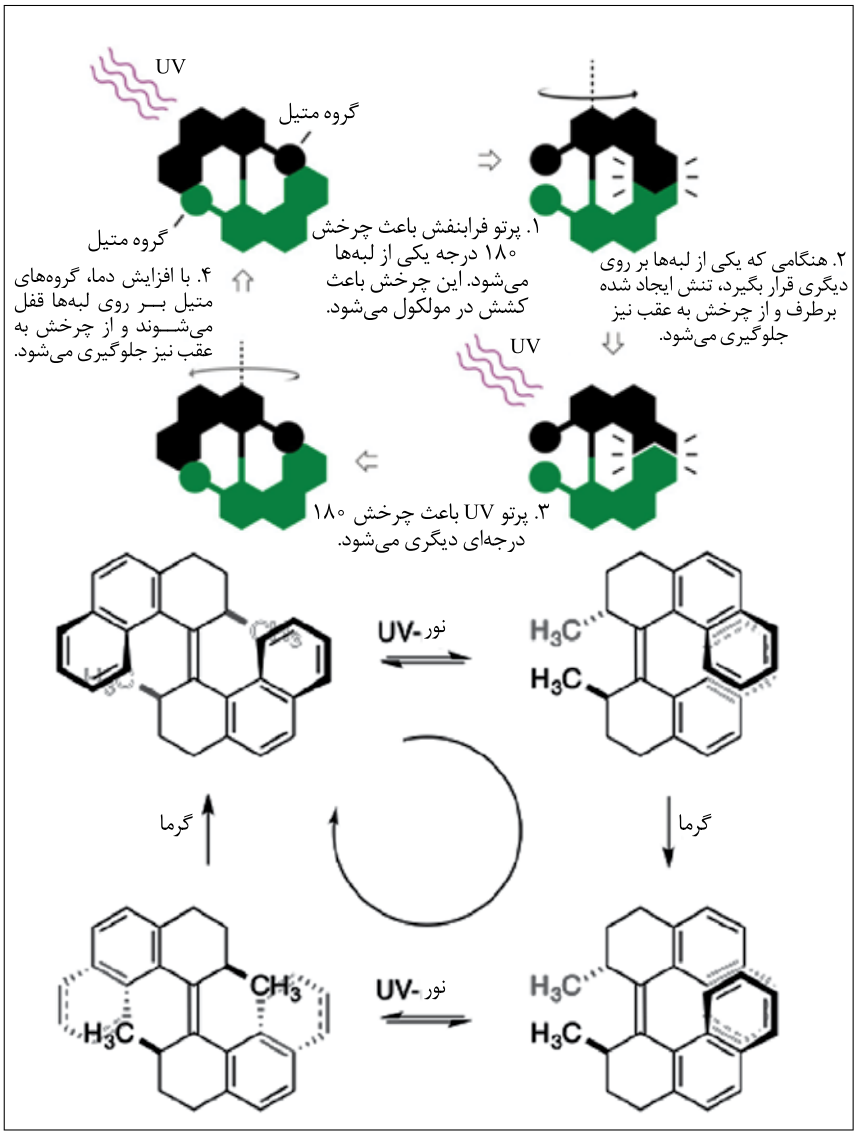
در واقع این موتور از دو بخش مولکولی تشکیل شده است که این دو بخش با پیوند دوگانه به هم متصل هستند.

با تابش یک پالس پرتو فرابنفش، یکی از لبه‌های چرخان، ۱۸۰ درجه در محور پیوند دوگانه کربن ـ کربن می‌چرخد و مانند چرخ‌دنده‌ای در لبه دیگر قفل می‌شود. با پالس بعدی، لبه چرخان ۱۸۰ درجه دیگر می‌چرخد و این چرخش بارها در یک جهت ادامه می‌یابد.

این طراحی هوشمندانه از فرینگا، جهشی عظیم در توسعه ماشین‌آلات مولکولی بود. فرینگا و همکارانش مشکل چرخش چند جهتی مولکول‌ها را با این طرح رفع کردند و سال‌های بعد از آن چندین نسل از این‌گونه موتورها طراحی شدند.

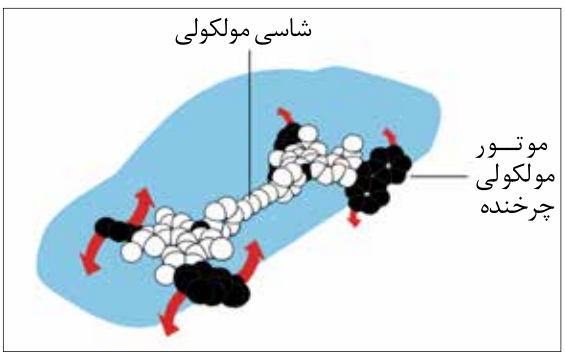
به‌عنوان نمونه‌هایی از پیشرفت‌های مرهون این طراحی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

ـ در سال ۲۰۱۴، گروه فرینگا توانست این موتور را بهینه کند و سرعت آن را به ۱۲ میلیون دور بر ثانیه برساند.



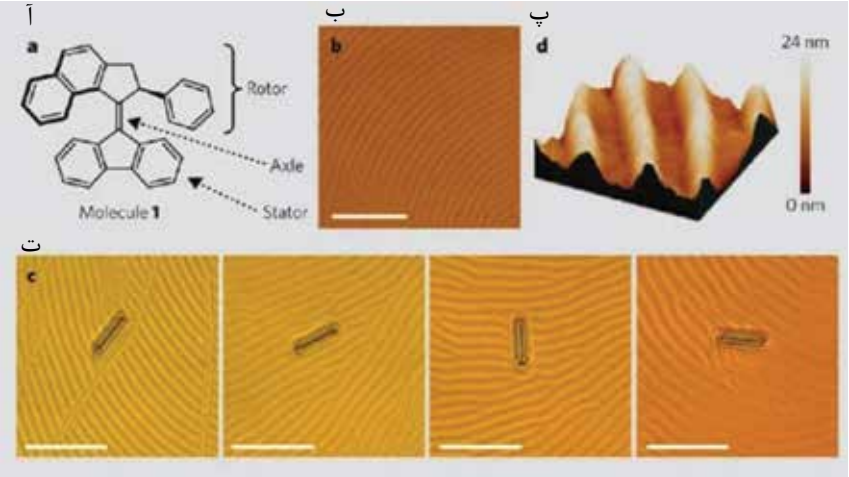
▲ شکل ۷ موتور مولکولی فرینگا. گروه وی موتور را بهینه کرد چنانکه امروزه با سرعت ۱۲ میلیون دور بر ثانیه می‌چرخد.

ـ در سال ۲۰۱۱، یک نانوماشین چهارچرخ متحرک ساخته شد؛ یک شاسی مولکولی، چهار موتور را که به‌عنوان چرخ عمل می‌کنند در کنار هم نگه می‌دارد و هنگام چرخش چرخ‌ها یا همان موتورها، اتومبیل از روی سطحی به سمت جلو حرکت می‌کند، شکل ۸.



▶ شکل ۸ نانو ماشین چهارچرخ فرینگا

ـ در آزمایشـــی دیگر، گروه فرینگا با اســـتفاده از موتورهای مولکولی مشابه توانست جسمی به طول ۲۸ میکرومتر (۱۰ هزار برابر بزرگ‌تـــر از موتورهـــای مولکولی) را بچرخاند. در این آزمایش، آن‌ها موتورها را در یک بلور مایع قرار دادند به‌طوری‌که یک درصد از ســـامانه، موتورهای مولکولی را شامل می‌شـــد. هنگامی که پژوهشگران موتورها را چرخاندند، متوجه شدند که با چرخش موتورها، ســـاختار بلور مایع تغییر می‌کند. آنان جســـمی را بالای بلورمایع گذاشتند و مشـــاهده کردند که آن جسم به‌دلیل حرکت موتورها می‌چرخد، شکل ۹.



▲ شکل ۹ آ) ساختار موتور،
ب) بافت چندضلعی یک فیلم بلوری آلاییده شده با موتور مولکولی،
پ) میله شیشه‌ای با تابش نور فرابنفش، روی بلورمایع می‌چرخد. هر عکس از چپ به راست با فواصل ۱۵ ثانیه‌ای گرفته شده است.
ت) ساختار سطح فیلم بلورمایع.

[برای مشاهده فیلم، می‌توانید بارکد زیر را با گوشی هوشمند خود اسکن کنید.]

نتیجه‌گیری

تمام ایـــن رویدادها، از اوایل دهه ۱۹۸۰ جایی که ســـاوژ، اســـتودارت و فرینگا، پیوند مکانیکـــی و چرخش یک‌جهتی را در ماشـــین‌های مولکولی ابداع کردند، آغاز شـــده است. به همین خاطر، این ســـه دانشـــمند، جایزه نوبل شیمی سال ۲۰۱۶ را برای طراحی و ســـاخت ماشین‌های مولکولی از آن خود کردند. در طول این ســـال‌ها و تا امروز، ساخت ماشین‌ها و اکتشـــافات بسیاری صورت گرفته است اما کارهای این سه نفر منجر شـــد تا پژوهشگران سراسر جهان، از این مولکول‌ها به‌عنوان جعبه‌ابزار شـــیمیایی استفاده کنند. یکی از بارزترین این نمونه‌ها، ساخت روبات مولکولی بر پایه روتاکسان است که می‌تواند آمینواســـیدها را به هم متصل کند. اکنون با گذشت حدود ۳۷ سال از سخنرانی فاینمن، ما توانایی پاسخ به پرسش او با این مضمـــون «تا چه اندازه کوچک می‌توانید ماشـــین بسازید؟» را داریم؛ پاسخ ما هم‌اکنون این است: حداقل ۱۰۰۰ برابر باریک‌تر از یک تار مو.

پی‌نوشت‌ها

1. Feynman, R.
2. Sauvage, J. P.
3. Topological chemistry
4. Stoddart, J.F.
5. Trefoil knot
6. borromean rings
7. Solomon's wisdom
8. Catenane
9. Rotaxane
10. Bis-paraquat cyclophane
11. benzidine
12. Terpyridine
13. phenanthroline
14. Feringa, B.

منابع

1. www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-chemistryprize2016-1.pdf
2. www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-chemistryprize2016-1.pdf
3. www.nature.com/articles/440163a#MOESM1