

Polymerization
Quarterly, 2021
Volume 10, Number 4
Pages 31-43
ISSN: 2252-0449

Catalytic Self-Propelled Nano/Micromotors.

I. Principles and Geometry Design

Samaneh Moayeri and Sepideh Khoee*

Polymer Laboratory, School of Chemistry, College of Science, University of Tehran,
P.O. Box 14155-6455, Tehran, Iran

Received: 21 Febraury 2020, Accepted: 12 May 2020

Abstract

Synthetic micro/nanomotors are functionalized micro/nanoparticles with the ability of self-propelling motion. Synthetic micro/nanomotors are the mimic of mobile organisms like bacteria in nature. Micro/nanomotors have different types such as fuel required micro/nanomotors and fuel-free ones and various applications. Fuel-free micro/nanomotors move through environmental changes like increasing in temperature by heating, magnetic and ultrasonic fields, etc. Platinum-based micro/nanomotors are the most common types of micro/nanomotors. Hydrogen peroxide is the fuel utilized in platinum-based micro/nanomotors. The decomposition of hydrogen peroxide fuel on the platinum surface of synthetic micro/nanomotors, supplies the required energy for motion of motors. Platinum-based micro/nanomotors have different structures and geometrics include spherical, stomatocyte, rod, tubular, and shell that that creates various motion mechanisms and speeds. The motion speed of micro/nanomotors has a wide range of amounts from one micrometer per second to hundreds micrometers per second. In this review, platinum-based micro/nanomotors and their different types have been introduced. In addition, different mechanisms of motion include self-electrophoresis, self-diffusiophoresis and bubble-propulsion mechanisms have been discussed. Then, the comparison of velocities in different motion mechanisms, applications of micro-nanomotors and the challenge of using their platinum type in in vivo conditions were also mentioned.

Key Words

patinum-based micro/nanomotors,
bubble propulsion,
self-electrophoresis,
self-diffusiophoresis,
drug delivery

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: khoee@ut.ac.ir

میکرو-نانوموتورهای خودپیش‌رونده کاتالیزی: ۱- اصول و طراحی هندسی

سمانه معیری، سپیده خوئی*

تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۶۴۵۵

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۳

میکرو-نانوموتورهای سنتزی، میکرو-نانوذرات عامل‌دارشده‌ای هستند که قابلیت حرکت خودبه‌خود را دارند. میکرو-نانوموتورها حاصل شبیه‌سازی ریزساختارهای متحرک در طبیعت بوده که دارای مزیت کنترل‌پذیری حرکت هستند. میکرو-نانوموتورها انواع و کاربردهای مختلفی دارند که از جمله بی‌نیاز به سوخت و نیازمند آن را می‌توان نام برد. انواع بی‌نیاز به سوخت، با استفاده از تغییرات محیطی مانند افزایش دما در اثر گرمایش، میدان‌های مغناطیسی و فراصوت حرکت می‌کنند. میکرو-نانوموتورهای کاتالیزی نظیر میکرو-نانوموتورهای برپایه پلاتین، رایج‌ترین انواع میکرو-نانوموتورهای نیازمند سوخت هستند. سوختی که در میکرو-نانوموتورهای پلاتینی استفاده می‌شود، هیدروژن پراکسید است که با تجزیه آن در سطح پلاتین انرژی لازم برای حرکت موتورها فراهم می‌شود. میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، ساختارها و هندسه‌های متفاوت شامل کروی، کاسه‌ای، شکل، میله‌ای، مخروطی، لوله‌ای توخالی و پوسته‌ای دارند که سازوکارهای حرکتی و سرعت‌های مختلف را در آنها ایجاد می‌کنند. سرعت حرکت میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، بازه بزرگی از سرعت‌های کم تا خیلی زیاد، از چند میکرومتر بر ثانیه تا چندصد میکرومتر بر ثانیه را شامل می‌شود. در این مقاله، ابتدا میکرو-نانوموتورهای پلاتینی معرفی و انواع آنها ذکر شده است. همچنین، انواع سازوکارهای حرکتی شامل خودالکتروفورز، خوددیفیوزوفورز و حباب‌رانشی توضیح داده شده‌اند. سپس، مقایسه سرعت‌ها در سازوکارهای حرکتی مختلف، کاربردهای میکرو-نانوموتورها و چالش استفاده از نوع پلاتینی آنها در شرایط درون‌تنی نیز بحث شده‌اند.

بسیار ش

فصلنامه علمی

سال دهم، شماره ۴

صفحه ۴۳-۳۱، ۱۳۹۹

ISSN: 2252-0449

چکیده



سمانه معیری



سپیده خوئی

واژگان کلیدی

میکرو-نانوموتورهای پلاتینی،
حباب پیش‌رونده،
خودالکتروفورز،
خوددیفیوزوفورز،
دارورسانی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

khoe@ut.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری نانو بسیار گسترش یافته است. از قرن بیستم تا به حال، مطالعات زیادی درباره طراحی ماشین‌هایی انجام گرفته است که بتوانند وظایفی را در مقیاس‌های کوچک میکرو و حتی نانو انجام دهند. بدین ترتیب، ساخت میکرو-نانوماشین‌ها و به دنبال آن میکرو-نانوموتورها به سرعت گسترش یافت. میکرو-نانوموتورها، ذرات عامل‌دار شده با قابلیت حرکت خودبه‌خود هستند. در واقع، به منظور شبیه‌سازی ریزساختارهای متحرک مثل باکتری‌ها، میکرو-نانوموتورها با قابلیت کنترل حرکت در سطوح میکرو و نانو طراحی شدند [۱]. آن‌ها می‌توانند برای حرکت، گونه‌های مختلف انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کنند. میکرو-نانوموتورها از این انرژی در فرایندهای حمل، انتقال و رهایش ذرات و سایر اجسام در مقیاس‌های میکرو و نانو در محیط‌های مایع استفاده می‌کنند. بنابراین، میکرو-نانوموتورها دارای کاربردهای مختلف در دارورسانی، جراحی نانو، بستن زخم، حسگرها، رفع آلودگی‌های محیطی و غیره هستند. با توجه به ساختار ساده و قابلیت کنترل جهت و سرعت میکرو-نانوموتورها، پژوهش‌های بسیاری در زمینه کنترل حرکت و عامل‌دار کردن آن‌ها انجام گرفته است. میکرو-نانوموتورها انواع گوناگونی دارند که از لحاظ ساختار، هندسه و سازوکار حرکت با هم تفاوت دارند. همچنین، انواعی از آن‌ها با استفاده از سوخت و برخی دیگر بی‌نیاز به آن و با استفاده از سایر انرژی‌ها مثل گرما [۲]، امواج مغناطیسی [۳]، فراصوت [۴] و غیره حرکت می‌کنند. ساختارهای مختلف مثل لایه‌به‌لایه، ژانوس (Janus) و هسته-پوسته به همراه هندسه‌های گوناگون شامل کروی، کاسه‌ای، شکل، میله‌ای، مخروطی و نیم‌مخروطی و لوله‌ای توخالی و مارپیچی در سنتز میکرو-نانوموتورها به کار گرفته می‌شوند [۵]. هر یک از این ساختارها و هندسه‌ها، بر مقدار سرعت و کنترل پذیری حرکت موتورها اثرگذارند. میکرو-نانوموتورهایی که با مصرف سوخت حرکت می‌کنند، خود به دو دسته آنزیمی و فلزی تقسیم می‌شوند.

میکروموتورهای سنتزی

متداول‌ترین میکروموتورهای سنتزی، از نوع کاتالیزی هستند و کاربردهای پزشکی آن‌ها به طور عمده محدود به مطالعات آزمایشگاهی و مفهومی است. از آنجا که میکرو-نانوموتورهای سنتزی بر مبنای سوخت‌های سمی پایه‌ریزی می‌شوند، استفاده از آن‌ها در کاربردهای درون‌تنی امکان‌پذیر نیست، مگر اینکه

سوخت و مواد کاتالیزی با مواد زیست‌سازگار جایگزین شوند. در این راستا، تلاش‌هایی برای جابه‌جایی سوخت ریزموتورها با زیست‌سوخت‌های در دسترس گلوکوز یا اوره، انجام شده است. با این حال، غلظت مورد نیاز برای این سوخت‌ها در بیشتر کارهای گزارش شده، بسیار بیشتر از سطح فیزیولوژیکی است. افزون بر این، سرعت این موتورها بسیار کم بوده و به طور متوسط در مقیاس چند میکرومتر بر ثانیه است. تاکنون تلاش‌های بی‌شماری برای بهبود سرعت، جهت‌گیری و تقویت فعالیت حرکت آنزیمی با استفاده از پلیمرهای الکتروفعال، برای بارگذاری مقادیر بیشتر آنزیم یا افزایش مساحت سطح فعال با استفاده از ساختارهای مزوحفره‌ای توخالی انجام گرفته است. از سوی دیگر، موادی که در محیط کمی اسیدی، مانند روی، منگنز یا کربنات کلسیم تجزیه می‌شوند، نیز در ساخت موتورهایی میکرو-نانوموتور به کار گرفته شده‌اند که می‌توانند در محیط‌هایی مانند معده یا در مجاورت سلول‌های سرطانی با pH زیر ۷، فعالیت کنند [۶].

میکرو-نانوموتورهای بر مبنای میدان خارجی، که می‌توانند با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی، امواج فراصوت و نور را به سمت منطقه مدنظر سوق دهند، نیز در رده میکرو-نانوموتورهای سنتزی قرار می‌گیرند. همچنین، این میکروموتورها می‌توانند از مواد مختلف با قابلیت‌های متفاوت ساخته شوند. آن‌ها می‌توانند با استفاده از زیست‌مولکول‌ها یا مواد شیمیایی عامل‌دار شوند تا بتوانند کارهایی مشابه سامانه‌های کاتالیزی انجام دهند. افزون بر این، میکرو-نانوموتورهای مزبور از قابلیت کنترل بهتری برخوردار هستند. اما همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، نیاز به کنترل خارجی، برای کنترل آن‌ها در سه بعد وجود دارد. در نتیجه، یک فن تصویربرداری مناسب برای ردیابی آن‌ها ضروری است، زیرا آن‌ها نمی‌توانند به طور مستقل به منطقه مدنظر برسند.

تحریک شیمیایی (واکنش کاتالیزی)

حرکت میکرو-نانوموتورها با ترکیبات مختلف و براساس سازوکارهای پیشرفته‌ای مختلف گزارش شده است [۷]. در میان این موتورهایی سنتزی، میکروموتورهای کاتالیزی، که حرکت آن‌ها با تجزیه هیدروژن پراکسید هدایت می‌شود، به دلیل پیش‌رانش مؤثر حباب، در مایعات زیستی و محیط‌هایی با قدرت یونی زیاد بسیار جذاب بوده‌اند. نشان داده شده است، موتورهایی خودران در اجرای عملیات حمل-تحويل بار در کاربردهای مختلف زیست‌فناوری، زیست‌پزشکی و زیست‌محیطی بسیار خوب عمل می‌کنند. حرکت میکرو-نانوذرات تحت سوخت H_2O_2 می‌تواند با

سه سازوکار رخ دهد: خودالکتروفورز (self-electrophoretic)، خوددیفیوزوفورز (self-diffusiophoretic) یا حرکت حباب رانشی (bubble-driven movement).

حرکت خودالکتروفورز

در این نوع حرکت، که اولین بار توسط گروه Sen در سال ۲۰۰۴ نشان داده شد، نانومیله‌های Au-Pt با وجود H_2O_2 حرکت کردند. در این مثال، گرادیان پروتون با تجزیه H_2O_2 به O_2 و H^+ در طرف پلاتین و تولید H_2O از واکنش H_2O_2 با H^+ تولیدی در طرف طلا ایجاد می‌شود. هر دو طرف با هم به عنوان سلول گالوانی با گردش کوتاه کار می‌کردند و حرکت بر خودالکتروفورز استوار بود [۸]. در سال ۲۰۱۰، گروه Wang نانوسیم‌های Ni/(Au50/Ag50)/Ni/Pt را برای برداشت و انتقال ذرات پلیمری یا لیپوزوم‌های حاوی داروی ضدسرطان دوکسوروبیسین (DOX) معرفی کردند. نانوسیم‌های فلزی با خودالکتروفورز در ۵٪ وزنی H_2O_2 شتاب گرفتند [۹].

حرکت خوددیفیوزوفورز

سازوکار حرکتی دیگر در مجاورت هیدروژن پراکسید، خوددیفیوزوفورز است که گلستانیان [۱۰] برای نخستین بار آن را معرفی کرد و Howse و همکار به طور تجربی آن را اثبات کردند [۱۱]. آن‌ها حرکتی را توصیف کردند که به واسطه حل‌پذیری گاز اکسیژن تولیدشده، یک گرادیان غلظتی ایجاد می‌شود. Wilson و همکاران کوپلیمرهایی را به شکل استوماتوسیت (stomatocyte) طراحی کردند و نانوذرات پلاتین را داخل حفره آن‌ها قرار دادند. با این کار، سوخت هیدروژن پراکسید وارد استوماتوسیت شده و در سطح پلاتین به آب و گاز اکسیژن تجزیه می‌شود. بنابراین، تخلیه بار سریع به صورت نیرویی برای القای حرکت جهت‌دار رخ می‌دهد. این پژوهشگران، استوماتوسیت حساس به دما را نیز تهیه کردند. در دماهای بیشتر ($40^\circ C$)، حفره استوماتوسیت کوچک‌تر و مقدار رهایش هیدروژن پراکسید کاهش یافت که به حرکت شبه‌براونی کند منجر شد.

حرکت حباب رانشی

حرکت حباب رانشی در میکرو-نانوموتورها بر پس‌زدن حباب‌های تولیدی، به ویژه در یک سمت میکرو-نانوموتورها یا داخل لوله‌ها و قیف‌ها استوار است. بدین ترتیب، حرکت با تولید حباب، مثلاً تولید گاز اکسیژن در طول تجزیه هیدروژن پراکسید، آغاز می‌شود. از احتمالات دست‌یابی به حرکت، ساخت ذرات ژانوس است.

در زمینه درمان سرطان، Wu و همکاران ذرات ژانوس پلیمر-طلا ($7 \mu m$) را طراحی و آنزیم کاتالاز را به سطح طلا متصل کردند. پس از واکنش کاتالاز با هیدروژن پراکسید، حرکت از طریق حباب‌های گاز اکسیژن تولیدشده در یک سمت ذرات، آغاز شد. داروی دوکسوروبیسین در حین فرایند پلیمرشدن، داخل ذرات تعبیه شد که با تابش زیرقرمز نزدیک قابل رهایش بود. انتقال مغناطیسی جهت‌دار به سمت سلول‌های هلا (HeLa cells) با تلفیق ذرات نیکل فراهم شد [۱۲].

کاتالیزگرهای فلزی: پلاتین

انواع ذرات ژانوس کاتالیزی، طبق ماهیت عامل کاتالیزی آن‌ها به ۴ دسته تقسیم می‌شوند:

- کاتالیزگرهای فلزی،
- میکروموتورهای برمبنای کلسیم‌کربنات،
- کاتالیزگرهای گرابس و
- میکروموتورهای ژانوس برپایه چهارچوب‌های فلز-آلی (MOF).

که از این میان، تنها به دسته اول پرداخته می‌شود. فلزات واسطه انتهایی به عنوان کاتالیزگرهای ناهمگن، به خوبی شناخته شده‌اند. این فلزات با مهندسی و طراحی به موتورهای ذره‌ای متصل می‌شوند تا قابلیت تولید گرادیان شیمیایی را داشته باشند که موجب ایجاد نیروی محرکه کلی برای حرکت می‌شود. در این بین تمرکز ویژه روی موتورهای برپایه پلاتین است. این بدان دلیل است که نه تنها اولین گزارش‌ها درباره ذرات ژانوس پلاتین پایه‌ریزی شده، بلکه مطالعات گسترده‌ای درباره سازوکار حرکت و شیمی سطح وابسته به شکل‌شناسی آن‌ها نیز انجام شده است. فلزاتی که عموماً در این زمینه استفاده می‌شوند، عبارتند از: پلاتین، آلومینیم-پالادیم، نقره، ایریدیم، آلیاژ گالیم-آلومینیم و منیزیم. فلز پلاتین به صورت تک‌فلز و همچنین به همراه سایر فلزات در ساختار میکرو-نانوموتورهای سنتزی استفاده می‌شود. سوختی که برای میکرو-نانوموتورهای پلاتینی به کار می‌رود، هیدروژن پراکسید بوده که از جمله سوخت‌های رایج در میکرو-نانوموتورهاست. فلز پلاتین، سطح کاتالیزی مناسب برای تجزیه هیدروژن پراکسید به آب و گاز اکسیژن را فراهم می‌کند. گاز اکسیژن تولیدشده در محیط آبی به شکل حباب داخل مایع محبوس می‌شود و با رشد حباب و جداسدن آن از سطح موتور، انرژی لازم را برای حرکت آن فراهم می‌کند. از این رو میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، زیرمجموعه میکرو-نانوموتورهای کاتالیزی هستند.

کم تا خیلی زیاد، از چند میکرومتر بر ثانیه تا چندصد میکرومتر بر ثانیه را شامل می‌شود. تفاوت در سرعت میکرو-نانوموتورهای مختلف از ساختار و هندسه آن‌ها ناشی می‌شود. ساختارهای کاسه‌ای شکل حاوی نانوذرات پلاتین حاصل از کوپلیمردو قطعه‌ای اتیلن گلیکول-استیرن، سرعتی برابر 115 length/s دارند. در حالی که ساختارهای لوله‌ای، بازه سرعتی گسترده‌ای بین 1 length/s تا 350 length/s را شامل می‌شوند. میکرو-نانوموتورهای ژانوس پلاتینی، که با سازوکار خوددیفیوزوفورز حرکت می‌کنند، سرعتی بین 2 length/s تا 6 length/s دارند. انواع دوفلزی آن‌ها نیز که با سازوکار خودالکتروفورز حرکت می‌کنند، دارای سرعتی معادل $1/5 \text{ length/s}$ هستند. در انتها، ساختارهای میله‌ای پلاتینی با سرعت‌های بین 2 length/s تا 100 length/s به حرکت خود ادامه می‌دهند [۱۴].

انواع میکرو-نانوموتورهای پلاتینی بر حسب ساختار و هندسه

با توجه به بعضی از محیط‌های محلول، بهینه کردن هندسه موتورها به منظور بهبود سرعت اهمیت دارد. تاکنون، میکروموتورهای حباب‌رانشی با هندسه‌های متفاوت، شامل میکروموتورهای مخروطی، میکروکره‌های ژانوس، میکروموتورهای میله‌ای و موتورهایی با سایر هندسه‌ها گسترش یافته‌اند. هندسه میکروموتورها نقش مهمی در سرعت و حرکت آن‌ها ایفا می‌کند. حباب‌ها در سطح میکروموتورهای ژانوس و میله‌ای تولید و به‌خاطر گرادیان غلظتی آن‌ها، درون سوخت پخش می‌شوند. بیشتر میکروموتورهای ژانوس و میله‌ای به هنگام انتشار حباب‌ها به داخل سوخت حرکت می‌کنند.

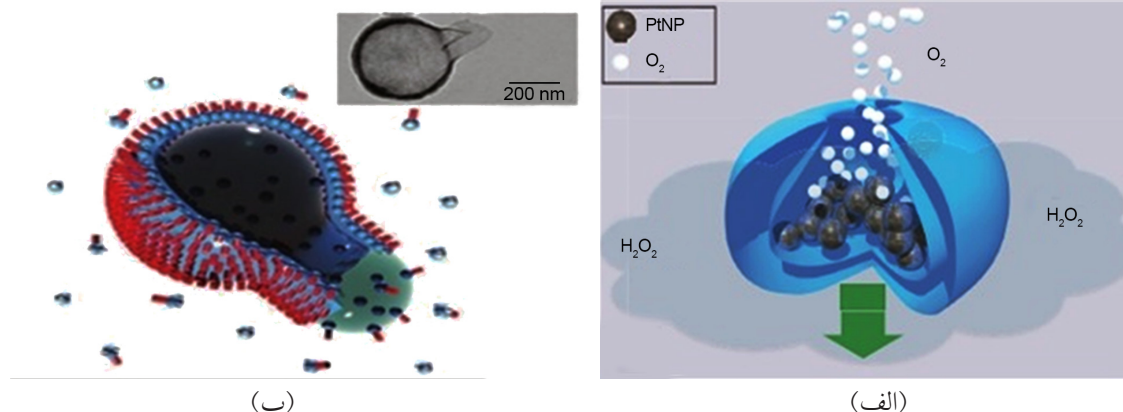
ساختارهای استوماتوسیت

اولین نانوموتور پلاتینی گزارش شده، به نام استوماتوسیت، برپایه نانوساختار کاسه‌ای شکل پلیمری بود که نانوذرات پلاتین در آن قرار داشتند (شکل ۱-الف) [۱۵]. چنین نانوحفره‌هایی برای اکسیژن حاصل از تجزیه هیدروژن پراکسید راه خروجی فراهم می‌کنند. نانوحفره‌های پلیمری، با سنتز و خودگردایش تعدادی از کوپلیمهرهای قطعه‌ای دومحیط‌دوست تهیه شدند که به دنبال آن، نانوذرات به‌طور گزینشی در ساختار آن‌ها به‌دام افتادند. نانوساختارهای نامتقارن، شبیه نانوبطری‌هایی هستند که اخیراً گزارش شده‌اند. این نانوبطری‌ها، برپایه نانوساختارهای سیلیکا با سطح داخلی آب‌دوست، به منظور قراردادن گزینشی بار در ساختار آن‌ها و یک سطح خارجی آب‌گریز هستند (شکل ۱-ب) [۱۶].

از دیدگاه سازوکار حرکت، به میکرو-نانوموتور پلاتینی، میکرو-نانوموتور حباب‌رانشی هم گفته می‌شود که حاکی از حرکت رو به جلو برپایه شکل‌گیری حباب است. هندسه و ساختار میکرو-نانوموتورهای پلاتینی نیز در تعیین مسیر، جهت و سرعت حرکت و مقدار نفوذ آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. مقدار سوخت مصرفی، اثرهای قدرت یونی محیط بر شکل‌گیری حباب‌ها، اندازه آن‌ها و مدت زمان لازم برای جداسدن حباب‌ها از موتور، متغیرهای مورد توجه در پژوهش‌های اخیر در زمینه سنتز و حرکت میکرو-نانوموتورهای پلاتینی هستند. در کاربردهای پزشکی، نیاز به کاهش سوخت مصرفی به منظور عملیاتی‌شدن این سامانه‌ها به‌خوبی احساس می‌شود. بنابراین، کاهش غلظت سوخت مورد نیاز برای حرکت میکرو-نانوموتورهای پلاتینی از تلاش‌های عمده در سنتز آن‌هاست.

اولین میکروموتورهای کروی Pt، با طراحی میکروکره‌های پلی‌استیرینی ساخته شدند که نیمی از سطح آن با Pt پوشش یافته بود. حرکت آن‌ها تحت غلظت‌های مختلف H_2O_2 ارزیابی و نشان داده شد، در زمان‌های کوتاه حرکت و سرعت آن‌ها به‌طور مستقیم متناسب با غلظت H_2O_2 بود. با این حال، در زمان‌های طولانی‌تر حرکت به حالت تصادفی برمی‌گردد [۱۱]. با لایه‌نشانی یک لایه Pt روی سطح ذرات سیلیکا و سپس تابکاری (annealing) آن، میکروکره‌های سیلیکای پوشش‌یافته با پلاتین ساخته می‌شوند که در مجاورت H_2O_2 و سطح فعال (به‌منظور تعدیل تنش سطح مایع)، به تولید حباب منجر می‌شود. ساخت مدل نامتقارن آن به شکل یک کره دوتکه است که افزون بر حرکت چرخشی درجا، حرکت در مسیرهای شبه خطی و شبه چرخشی را نیز ارائه می‌دهد [۱۳]. اگرچه مطالعات حرکت نشان داد، میکروذرات نیمه پوشیده‌با پلاتین برخلاف جهت پوشش پلاتین حرکت می‌کنند، ولی سازوکار حرکت تجمعی آن هنوز مبهم بود.

عدم شکل‌گیری حباب‌ها (در نبود سطح فعال) طی جابه‌جایی و مطالعات نظری متعدد، حرکت آن‌ها را به یک سازوکار خوددیفیوزوفورز مربوط می‌کند. این سازوکار، برپایه تولید میدان‌ها و گرادیان‌هایی است که باعث می‌شوند، حرکت سیال بر سطح ذرات، اثرهای قطبش سطحی بر جای بگذارد. افزون بر این، مطالعه عمیق آزمایشگاهی درباره اثر سطح فعال‌ها بر حرکت میکروموتورها نشان داد، حرکت ذرات ژانوس کاتالیزی در مجاورت سطح فعال‌های مختلف با مشکل مواجه می‌شود که خود از سازوکار حرکت خوددیفیوزوفورز پشتیبانی می‌کند. سرعت حرکت میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، بازه بزرگی از سرعت‌های



شکل ۱- دو نوع از نانوموتورهای پلاتینی: (الف) استوماتوسیت مصنوعی ابرمولکولی با نانوذرات پلاتین به‌دام‌افتاده در ساختار آن [۱۵] و (ب) نانوبطری نامتقارن شیمیایی از جنس سیلیکا و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری [۱۶].

این ساختار محذب، به‌طور جالبی سازوکار حرکت حباب‌رانشی را هم نشان می‌دهد که خود افزایش سرعت برای ساختارهای جزئی حکاکی‌شده را تایید می‌کند. یک پیکربندی جذاب براساس میکروموتور نامتقارن تشکیل‌شده از صدها تا هزارها نانوذرات پلاتین که به‌صورت خوشه‌ای در یک جا کنار هم قرار گرفتند، توسط Yamamoto و همکاران شرح داده شد (شکل ۳) [۱۸].

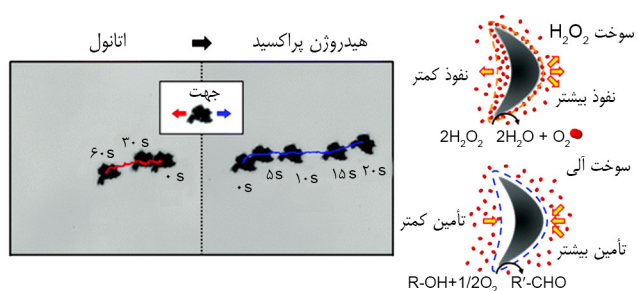
چنین میکروموتورهایی، حرکت مؤثری را نه تنها در مجاورت هیدروژن پراکسید، بلکه در سایر ترکیبات آلی مثل اتانول، متانول، پروپانول و اتیلن گلیکول، با استفاده از اکسیژن محلول نشان دادند. سرعت‌ها و الگوهای حرکت، بیشتر به شکل‌شناسی میکروموتورها بستگی داشت، تا به الکل‌های مختلف امتحان‌شده مرتبط باشد. با تغییر سوخت‌ها، نوعی وارونگی در جهت‌های حرکت انتقالی و چرخشی، به‌واسطه گرادیان‌های غلظت مربوط به اکسیژن تولیدشده در هر واکنش به وجود آمد.

دو سازوکار حرکتی برای میکروموتورهای میله‌ای وجود دارد؛ که عبارت از: (الف) میکروموتورهای میله‌ای که از طریق حباب‌های

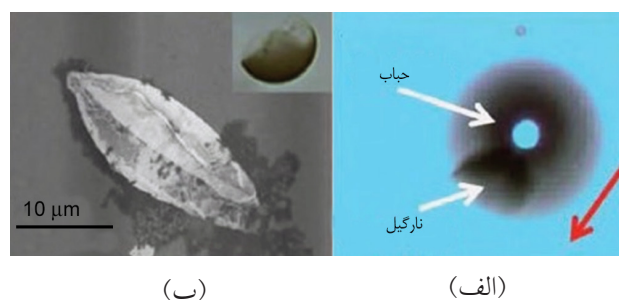
آنها با رشد ناهمسان سل-ژل تهیه می‌شوند و قطری برابر با ۳۵۰ nm و حفره‌ای با اندازه ۱۰۰ nm دارند. در جایی که ترکیبی از گونه‌های مختلف نانوذرات از راه خودگردایش روی تک‌بلورهای پلیمر به راحتی جمع و ثابت شده‌اند، نانوموتورهای دارای حرکت خودبه‌خود با قابلیت کنترل از راه دور می‌توانند باری به بزرگی ۱۰۰ برابر وزن خود را منتقل کنند. نانوذرات پلاتین با تجزیه کاتالیزی هیدروژن پراکسید موجب حرکت کارآمدی در میکرو-نانوموتورها می‌شوند.

ساختارهای میله‌ای

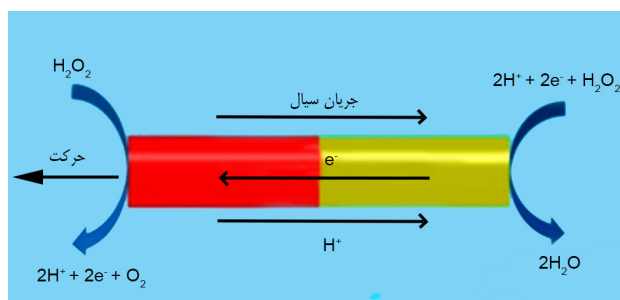
شکست تقارن، نه تنها می‌تواند از ترکیب شیمیایی متفاوت ترکیبات ایجاد شود، بلکه می‌تواند با تغییر هندسه فیزیکی ساختار، مانند آنچه که در میکروموتورهای لوله‌ای دیده می‌شود، نیز حاصل شود. برای میکروذرات، یک ساختار نامتقارن شبیه نارگیل، از راه قالب‌های سیلیکایی حکاکی‌شده کامل یا جزئی به دست آمد، جایی که لایه پلاتین از پیش روی آن نشانده شده بود (شکل ۲) [۱۷].



شکل ۳- وارونگی مسیر در حرکت انتقالی موتورهای پلاتینی، در مجاورت سوخت‌های آلی (اتانول) و هیدروژن پراکسید و سازوکارهای حرکتی مربوط به آنها [۱۸].



شکل ۲- تصاویر: (الف) میکروسکوپ نوری و (ب) میکروسکوپ الکترونی پویشی از میکروذرات نارگیلی شکل پوشیده شده با پلاتین [۱۷].



شکل ۴- دو واکنش الکتروشیمیایی مختلف در میکروموتورهای دوفلزی در سازوکار خودالکتروفورز [۱۹،۲۰].

انرژی شیمیایی حاصل از واکنش کاتالیز شود.

هیچ چیز ارزشمندتر از این نیست که زاویه مخروطی ارتباط بسیار نزدیکی با حرکت میکروموتورها دارد. طراحی منطقی زاویه مخروطی میکروجت به کمک علم هیدرودینامیک، می‌تواند کارایی میکروجت‌های حباب‌رانشی را در میزان استفاده از سوخت بهبود بخشد.

در سال ۲۰۱۵ Gao و همکاران، میکروموتورهای لوله‌ای برپایه روی (PEDOT/Zn) را از طریق لایه‌نشانی الکتریکی با استفاده از قالب‌های غشایی پلی‌کربناتی طراحی کردند. این میکروموتورها در گاستریک اسید حل می‌شدند و با تولید گاز هیدروژن حرکت و در معده بار خود را تخلیه می‌کردند. آزمون‌های حیوانی مربوط با استفاده از موش نیز در این پژوهش انجام شد (شکل ۵) [۲۳]. همچنین در سال ۲۰۱۶، Wang و همکاران میکروموتور مخروطی کاتالیزی برپایه منگنز اکسید (PEDOT/MnO₂) را طراحی کردند که در محلول بسیار رقیق هیدروژن پراکسید (۰/۴٪)، سرعتی معادل ۳۱۸/۸ μ/s داشت. این میکروموتور در محیط‌های پیچیده‌تر مثل سرم آلبومین گاوی نیز حرکت کارآمدی را نشان داد. میکروموتور مزبور، در حمل و انتقال داروی ضدسرطان کامپتوتسین (Camptothecin)، با روش جاذبه الکتروستاتیک نیز موفق بود (شکل ۶) [۲۴].

میکرو موتورهای ژانوس

میکروموتورهای ژانوس ساختارهای متعددی مانند ساختارهای دوفلزی، پوسته‌ای و میکروموتورهای کپسولی دارند. یک میکروموتور دوفلزی از طریق واکنش کاتالیزی بین سطح و محلول اطراف میکروموتور حرکت می‌کند. مطالعات تجربی نشان داده است، سرعت میکروموتورهای خودده خود پیش‌رونده، ۶۰ μ/s و بیشتر است [۲۵،۲۶]. میکروموتور ژانوس از دو نیم‌کره، بخش غیرفعال و بخش فعال ساخته شده است. میکروموتور ژانوس،

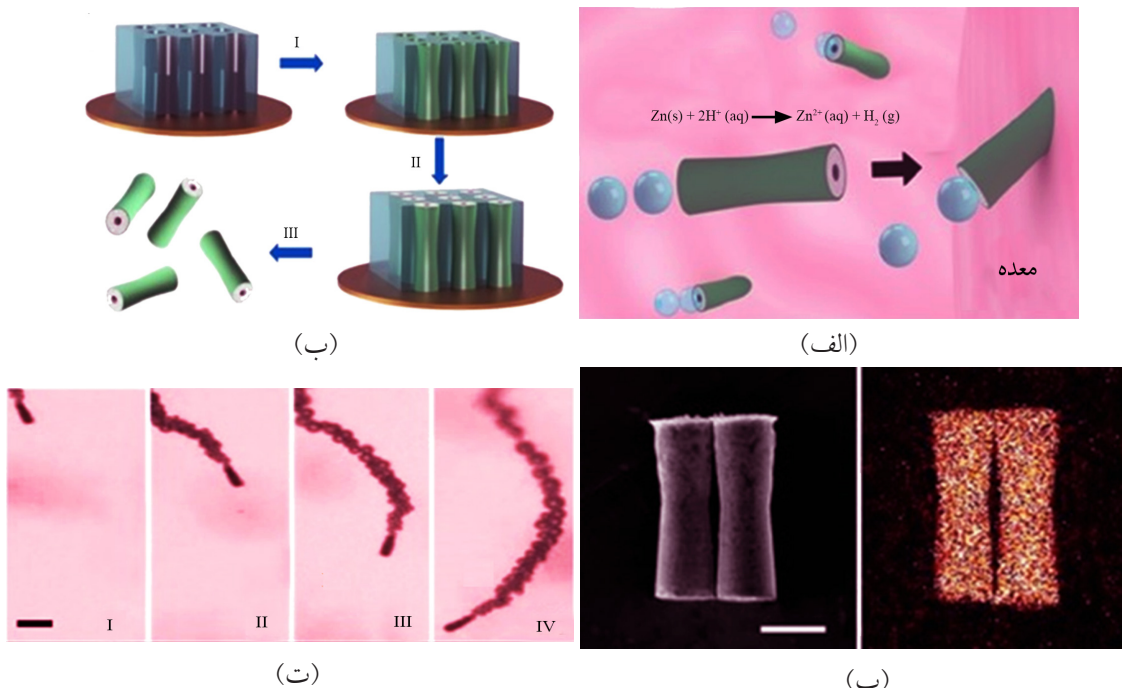
تولیدشده در سطح و تنها در یک انتهای میکرومیله‌ها حرکت می‌کنند و (ب) سازوکارهای الکتروجنبشی میکرومیله‌هاست. برای میکروموتورهای خودالکتروفورز، مثل میکروموتورهای دوفلزی، دو واکنش الکتروشیمیایی مختلف، که با جریان‌های الکترونی پیش می‌روند (سازوکار خودالکتروجنبشی)، سبب حرکت میکروموتورها می‌شوند که در شکل ۴ دیده می‌شود.

به منظور افزایش هسته‌زایی حباب‌ها، میکروموتورهای پوسته‌ای و مخروطی ساخته می‌شوند که کاتالیزگر در داخل پوسته یا دیواره داخلی میکروجت‌ها، به صورت پوشش قرار داده شده است. برخلاف میکروموتورهای جامد، میکروموتورهای پوسته‌ای و مخروطی دارای حفره مقعر هستند، جایی که حباب‌ها تولید شوند، رشد می‌یابند. هنگامی که شعاع حباب‌ها به اندازه کافی بزرگ شود، جدا شده و از انتهای میکروموتور، محلی که حباب‌ها به راحتی رها می‌شوند، فوران می‌کنند. این میکروموتورها از طریق تولید و خروج حباب‌ها حرکت می‌کنند که در ادامه هر دو بررسی می‌شوند.

ساختارهای لوله‌ای و مخروطی

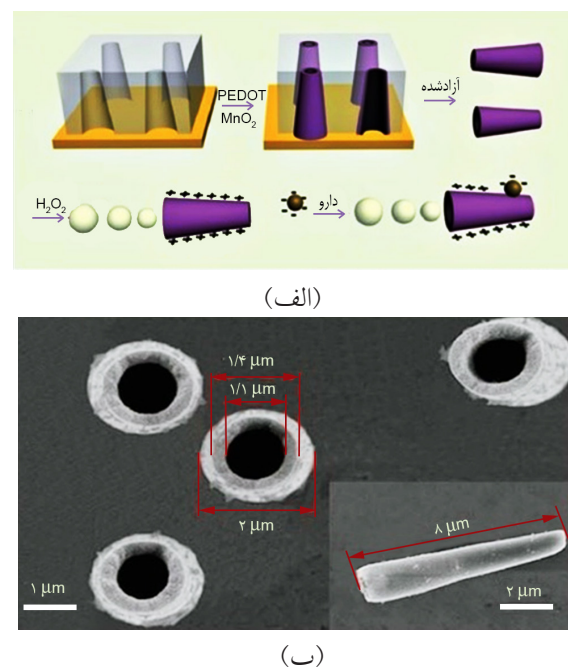
میکروموتورهای مخروطی، زیرمجموعه‌ای از میکروموتورهای لوله‌ای هستند. براساس آزمایش‌ها، با افزایش زاویه مخروطی، ضریب پسار کاهش می‌یابد که معمولاً سبب افزایش سرعت میکروموتور می‌شود. میکروموتور مخروطی شکل، نسبت به نوع استوانه‌ای با شعاع و طول یکسان، می‌تواند سرعت بیشتری داشته باشد. به عنوان مثال، در کار Wang و همکاران، سرعت میکروموتورها با افزایش زاویه مخروطی افزایش یافت [۲۱]. در مطالعه دیگر دیده شد، زاویه مخروطی اثر مهمی بر بسامد حباب‌های تولیدی و سرعت میکروموتورهای لوله‌ای مخروطی دارد [۲۲]. سرعت متوسط یک میکروموتور، حاصل از جابه‌جایی مرحله‌ای و بسامد تولید حباب است. با افزایش زاویه مخروطی از ۰° تا ۵°، سرعت میکروجت به دلیل افزایش نیروی پسار مؤثر بر آن، کاهش یافت.

ضریب شکلی، که به هندسه سطح و ویژگی‌های شیمیایی برمی‌گردد، در سطوح مقعر نسبت به سطوح محدب مقادیر کمتری دارد. زاویه مخروطی، ضریب شکلی را هم در سطوح مقعر و هم در سطوح محدب تحت تاثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب، جداسدن حباب‌ها از سطوح مقعر به مراتب آسان‌تر از سطوح محدب است. براساس مطالعات نظری، زاویه مخروطی می‌تواند اندازه و بسامد تولید حباب را نیز تحت تاثیر قرار دهد. افزون بر این، افزایش زاویه مخروطی میکروموتور می‌تواند سطح تماس میکروموتور با سوخت را افزایش دهد و سبب دسترسی بیشتر میکروموتور به



شکل ۵- تهیه و شناسایی میکروموتورهای PEDOT/Zn: (الف) نمایی از حرکت درون تنی و نفوذ به بافت میکروموتورهای برپایه روی در معده موش، (ب) تهیه میکروموتورها با استفاده از قالب‌های غشایی پلی کربناتی (I لایه‌نشانی میکرولوله PEDOT، II لایه‌نشانی لایه روی داخلی و III حل شدن غشا و خروج میکروموتورهای لوله‌ای)، (پ) تصویر SEM (سمت چپ) و تصویر نقشه عنصری روی، حاصل از طیف‌سنجی پرتو ایکس انرژی پاشنده (سمت راست)، مقیاس ۵ μm و (ت) تصاویر گذشت زمان (فواصل زمانی ۱ s، I تا IV) حرکت میکروموتورها در گاستریک اسید در دمای بدن (37°C)، مقیاس ۲۰ μm [۲۳].

به وسیله نیروی رشد حباب به طرف جلو حرکت می‌کند. در حالی که، به خاطر کاهش هم‌زمان فشار محلی در حین ترکیدن حباب به عقب کشیده می‌شود. بر این اساس، مدلی برپایه جداشدن اکسیژن ساخته شد. بر طبق این مدل، سرعت میکروموتور ژانوس با افزایش کشش سطحی و غلظت هیدروژن پراکسید افزایش یافت. با این حال، سرعت میکروموتورهای ژانوس به سادگی از طریق تغییر شکل آن‌ها در حال بهبود است. تغییر شکل میکروموتورهای ژانوس به کپسول‌های توخالی چندلایه، که به وسیله خودگردایش ساختارهای لایه‌به‌لایه با کمک قالب ساخته شدند، نوع جدیدی از میکروموتور خودبه‌خود پیش‌رونده را ایجاد کرد. موتور کپسولی ژانوسی که ساخته شد، می‌توانست 125 length/s با سرعتی بیش از ۱ ms حرکت کند. نوع جدیدی از میکروموتورهای ژانوس، از طریق ترکیب با پروتئین‌های زیست‌مولکولی ساخته شد که از یک کپسول چندلایه کیتوسان و آلژینات تشکیل شده بود [۲۷]. میکروموتورهای کپسولی، با روش مرسوم خودگردایش ساختارهای لایه‌به‌لایه با کمک قالب تولید می‌شوند. میکروموتوری با قطر ۵ μm ، توانست به سرعتی معادل ۲۳/۲۷ μs دست یابد.



شکل ۶- (الف) طرحواره تهیه و اصلاح میکروموتورهای مخروطی PEDOT/MnO₂ و سازوکار دارورسانی آن‌ها و (ب) تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی پویشی از میکروموتورهای مخروطی PEDOT/MnO₂ [۲۴].

براساس محیطی که در آن قرار دارند، نشان می دهند [۳۰].

غلظت و نوع سوخت

میکروموتورهای حباب رانشی در محلول هیدروژن پراکسید با انجام واکنش های شیمیایی حرکت می کنند. آن ها در غلظت های مختلف سوخت هیدروژن پراکسید، به کمک حباب ها حرکت می کنند. غلظت زیاد هیدروژن پراکسید، سبب سرعت زیاد میکروموتورها می شود. نوعی از میکروموتور لوله ای کاتالیزی با استفاده از دو لایه پلی آنیلین و پلاتین، با بیشینه سرعت 3 mm/s ، طراحی شد. افزون بر این، ارتباط مستقیمی بین سرعت موتورهاى میکرولوله ای کاتالیزی کارآمد و غلظت سوخت هیدروژن پراکسید پیشنهاد شده است. این رابطه نشان می دهد، عوامل اصلی که سرعت میکروموتورها

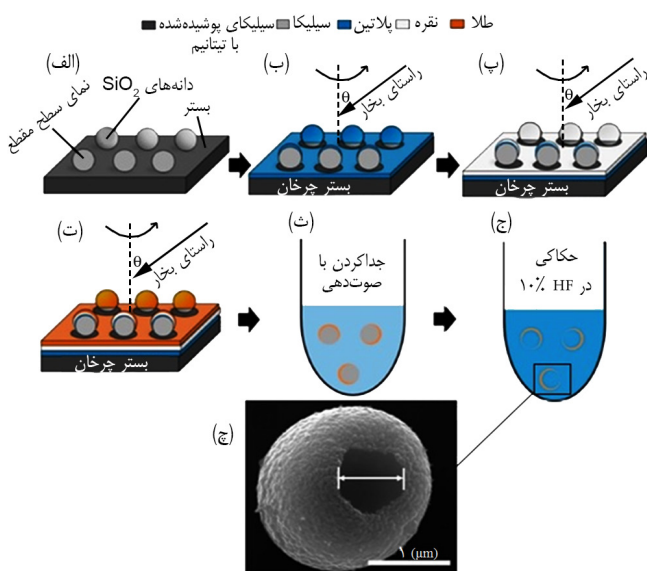
میکروموتورهای پوسته ای

به منظور کاهش جرم و ایجاد حفره، میکروموتور نانوپوسته ای ساخته شده است. با توجه به سرعت $100 \text{ } \mu\text{m/s}$ میکروموتور نانوپوسته ای، این موتورها بهتر از موتورهاى ژانوس کروی جامد عمل می کنند. با توسعه میکروموتور نانوپوسته ای، موتور کاتالیزی پوسته ای چندلایه پلیمری با ضخامتی در ابعاد نانومتر نیز تولید شد. در موتور پوسته ای چندلایه جدید، روش خودگردایش لایه به لایه به منظور لایه نشانی پلاتین بر سطح قالب های سیلیکا به کار گرفته شده است [۲۸]. این موتور توانست به سرعتی معادل $260 \text{ } \mu\text{m/s}$ ، یعنی 13 length/s دست یابد. در مطالعات بیشتری گزارش شد، زبرکردن سطح میکروموتورهای ژانوس به بهترشدن واکنش و در نتیجه سریع ترشدن میکروموتور منجر شده است.

در سال ۲۰۱۳ Huang و همکاران، با استفاده از ترکیب دو روش لایه نشانی بخار فیزیکی و حکاکی شیمیایی محلول، موتورهاى کاتالیزی نانوپوسته ای را طراحی کردند، که سطح داخلی پوسته با فلزات پلاتین، نقره و طلا، به ترتیب از داخل به بیرون، به عنوان کاتالیزگر پوشانده شده بود. بدین ترتیب که ذرات سیلیکا روی بستر سیلیکونی پوشیده شده از تیتانیم قرار داده شدند (شکل ۷-الف) پس از آن، فیلمی از پلاتین به ضخامت 50 nm ، لایه ای از نقره به ضخامت 400 nm ، فیلمی از طلا با ضخامت 100 nm ، به ترتیب روی سطح آن ها نشانداده شدند (شکل ۷-ب تا ت). سپس، ذرات حاصل با استفاده از امواج فراصوت از بستر جدا شدند (شکل ۷-ث). هسته سیلیکایی ذرات در محلول 10% هیدروفلوئوریک اسید به مدت 2 h شسته شد (شکل ۷-ج). میکروموتورهای نانوپوسته ای حاصل، دارای سطح داخلی پوشیده شده از پلاتین بودند که تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) آن در شکل ۷-چ، نشان داده شده است [۲۹]. این موتورهاى پوسته ای با خروج حباب در محلول هیدروژن پراکسید حرکت کردند و در غلظت 5% آن، به سرعتی معادل $100 \text{ } \mu\text{m/s}$ دست یافتند.

عامل های محیطی

سوخت های مختلف، شامل هیدروژن پراکسید، آب، اسیدها و هیدرازین، برای حرکت میکروموتورها به کار گرفته می شوند. افزون بر این، تعدادی از میکروموتورها وجود دارند که با انرژی خارجی، از جمله انرژی های نور، مغناطیسی و سایر اشکال انرژی محرک، حرکت می کنند. بنابراین، تغییرات محلول، شامل دما، گرانش و غلظت محلول، می توانند رفتار مکانیکی موتورها را تحت تاثیر قرار دهند. میکروموتورهای مختلف، رفتارهای دینامیکی مختلفی را

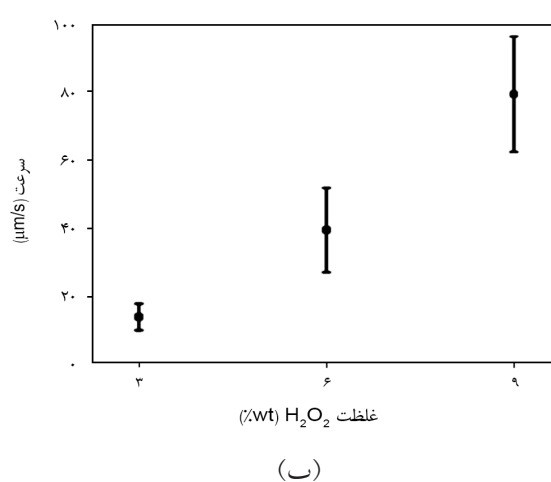
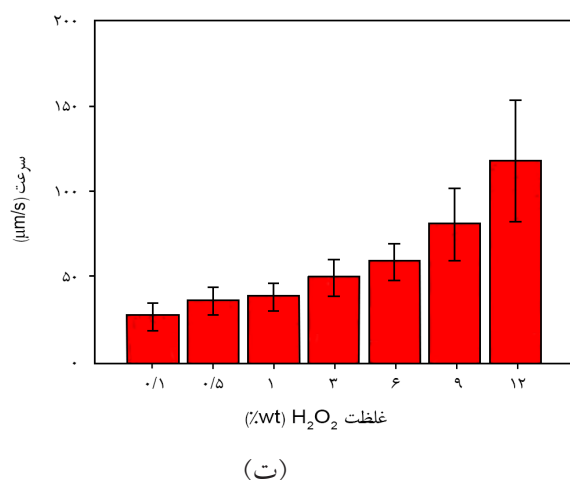
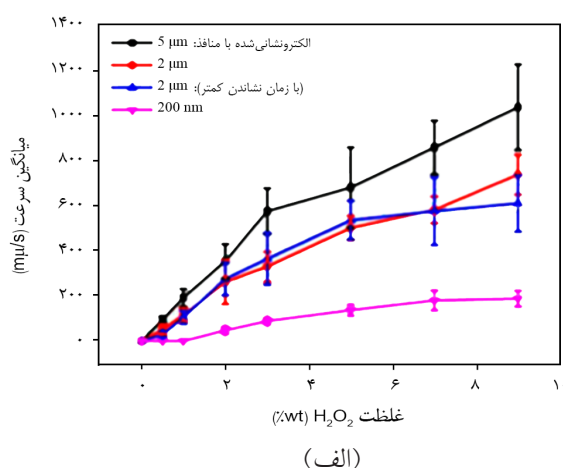
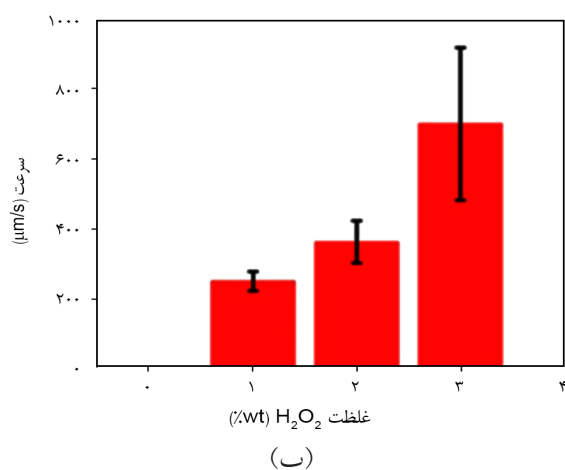


شکل ۷- مراحل سنتز موتورهاى پوسته ای پلاتین، نقره و طلا: (الف) توزیع ذرات سیلیکا روی بستر سیلیکونی پوشیده شده با تیتانیم، (ب) ابتدا لایه ای از پلاتین، به صورت فیلمی به ضخامت 50 nm روی ذرات سیلیکا، با زاویه لایه نشانی 70° نشانداده شد. بستر با سرعت ثابت در چرخش بود، (پ) لایه ای از نقره به ضخامت 400 nm با همان شرایط (ب) نشانداده شد، (ت) فیلمی از طلا با ضخامت 100 nm با همان شرایط نشانداده شد، (ث) ذرات پوشیده شده با لایه سه فلزی، با فراصوت دهی در محیط مایع به مدت 30 s از بستر جدا شدند، (ج) هسته سیلیکایی با فرایند حکاکی با محلول 10% هیدروفلوئوریک اسید به مدت 2 h ، شسته شد و (چ) تصویر SEM از محصول نهایی میکروموتور نانوپوسته ای با سطح داخلی پلاتینی [۲۹].

را تحت تاثیر قرار می‌دهند، شعاع حباب و بسامد تولید آن بوده که هر دو به غلظت سوخت هیدروژن پراکسید وابسته هستند. با افزایش غلظت هیدروژن پراکسید، از ۰/۳٪ تا ۰/۵٪، بسامد تولید حباب افزایش یافت، در حالی که اندازه حباب کاهش پیدا کرد. در نتیجه، سرعت میکروموتورها به خاطر حباب‌های کوچک‌تر با بسامد بیشتر، افزایش یافت. همچنین، مشخص شد، سرعت میکروموتورها به کشش سطحی، اندازه حباب و بسامد تولید حباب مربوط بوده که هر یک به غلظت محلول وابسته‌اند. به عنوان مثال، با افزایش غلظت هیدروژن پراکسید، میکروموتورهای ژانوس $\text{SiO}_2@\text{rGO-Pt}$ ، با سرعت بیشتری در محلول حرکت می‌کنند. بیشینه سرعت در غلظت ۱۰٪ هیدروژن پراکسید، می‌تواند به $725 \mu\text{m/s}$ برسد. در غلظت‌های مختلف هیدروژن پراکسید، روند افزایش سرعت، در غلظت در حال افزایش هیدروژن پراکسید، مستقل از هندسه میکروموتورها بود. افزون بر این، مقدار افزایش سرعت با افزایش غلظت هیدروژن

پراکسید کاهش می‌یابد (شکل ۸) [۳۰].

پژوهشگران از محلول‌های اسیدی به جای هیدروژن پراکسید استفاده کرده‌اند. Wang و همکاران نوع جدیدی از میکروموتورها را تحت عنوان میکرووراکت‌های برپایه روی ایجاد کردند. ساختار دولایه، به افزایش عمر این میکرووراکت‌ها کمک می‌کرد. میکروموتورهای برپایه روی می‌توانستند حرکت خودبه‌خودی را به مدت ۱۰ min، در محیط گاستریک اسید با اسیدیته حدود ۲، ادامه دهند. اما غلظت‌های زیاد هیدروژن پراکسید و محلول‌های اسیدی، به خاطر قدرت اکسندگی زیاد، کاربردی نیستند. پژوهش‌های بیشتر، میکروموتورهایی با حرکت خودبه‌خود کاربردی‌تر در محیط زیستی را ایجاد کرد. موتورهای میکروجت دوفلزی هم‌مرکز پلاتین-مس، سرعت‌های حرکت زیادی، حدود 7 length/s در غلظت‌های کم هیدروژن پراکسید (۰/۲٪) نشان می‌دهند. به خاطر اکسندگی زیاد و اثرهای خوردندگی بیشتر سوخت‌ها، سوخت تمیز بسیار ضروری



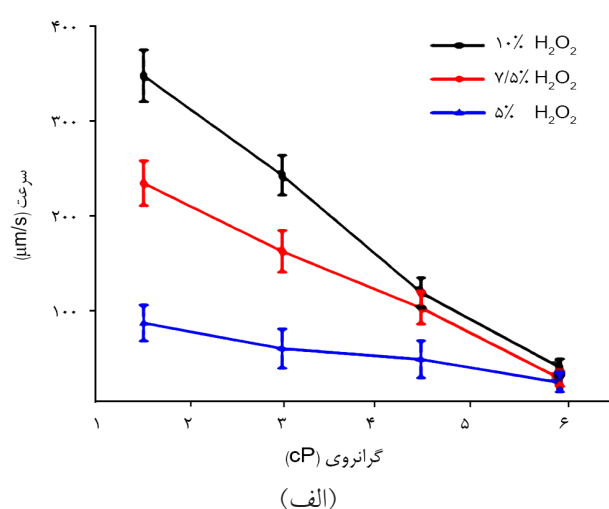
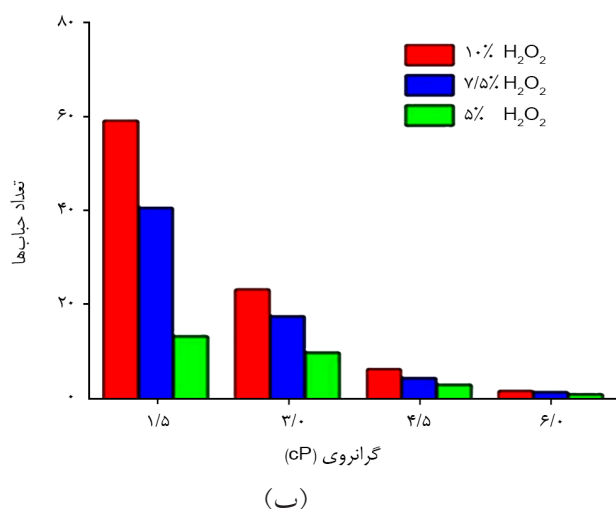
شکل ۸- رابطه غلظت H_2O_2 و میکروموتورها با شکل‌های مختلف: (الف) وابستگی سرعت متوسط چهار نوع میکروموتور لوله‌ای به غلظت H_2O_2 ، (ب) رابطه سرعت‌های متوسط میکروجت‌ها و غلظت سوخت، (پ) وابستگی سرعت میکروموتورهای ژانوس نقره به غلظت H_2O_2 و (ت) رابطه سرعت متوسط میکروموتورهای کاتالیزی نقره با غلظت H_2O_2 در 23°C [۳۰].

درباره مواد و سوخت در حال گسترش است [۳۰].

گرانروی

با توجه به محیط‌های متفاوتی که برای میکروموتورها می‌توان متصور شد، در فضاهای کاربردی که اغلب دربردارنده خون یا روغن بوده، گرانروی بسیار متفاوت‌تر از آب است. افزون بر این، اثر گرانروی سیال به‌خاطر عدد رینولدز کوچک بر حرکت میکروموتور، آشکار است. در نتیجه، با افزایش گرانروی محلول، نیروی پسار میکروموتورها افزایش می‌یابد که به کاهش سرعت حرکت منجر می‌شود. با استفاده از روش‌های نظری و تجربی، بین سرعت میکروراکت و گرانروی محلول، یک رابطه خطی نشان داده شده است (شکل ۹). طبق این رابطه، با افزایش گرانروی، قطر حباب‌ها بزرگ‌تر و تعدادشان کاهش می‌یابد. مجموعه دیگری از اطلاعات آزمایشگاهی نشان داد، افزایش گرانروی زیست‌محیطی، باعث کاهش سرعت حرکت میکروموتورها می‌شود. همچنین Pumeria رابطه‌ای بین عدد رینولدز و رفتار دینامیکی ارائه کرد. عدد رینولدز به‌شدت به گرانروی محلول و سرعت میکروموتور وابسته است. حرکت میکروموتورها در گرانروی بیشتر با رینولدز کمتر، خطی بود، در حالی که حرکت در گرانروی کمتر با رینولدز بیشتر، دایره‌وار بود. شکل ۹ نشان می‌دهد که حرکت میکروموتورها، به‌شدت به گرانروی و عدد رینولدز وابسته است. با توجه به نظریه پسار استوک (Stokes' drag theory) در مکانیک سیالات می‌توان گفت، نیروی پسار میکروموتور، با افزایش گرانروی محلول افزایش می‌یابد. بنابراین، سرعت میکروموتور با افزایش گرانروی کاهش می‌یابد [۳۰].

است. به‌منظور دستیابی به هدف تولید حباب‌های فراهم‌کننده نیروی حرکت، واکنش بین فلزات فعال و آب، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. آب تمیزترین سوخت موجود است و به سادگی می‌توان گفت، برای زندگی ضروری است. از این رو، نسل جدیدی از میکروموتورهای حباب‌رانشی ساخته شد که از طریق آب حرکت می‌کردند. این میکروموتور، از میکروکره آلایژ دوتایی آلومینیم-گالیم، با استفاده از مخلوط میکروذرات آلومینیم و گالیم مایع تهیه شد که از طریق حباب‌های حاصل از واکنش بین آلومینیم و آب، حرکت می‌کردند. اولین نمونه از میکروموتورهای با آب، می‌توانستند به سرعتی معادل 3 mm/s دست یابند. پس از آن، نوع دیگری از میکروموتور برپایه آب طراحی شد، که با واکنش‌های بین آب و منیزیم حرکت می‌کرد. یک میکروموتور ژانوس منیزیم-پلاتین، با متوسط سرعت $75/7 \text{ } \mu\text{m/s}$ ساخته شد. براساس واکنش الکتروشیمیایی منیزیم با آب، میکروکره‌های تیتانیم دی‌اکسید-طلا-منیزیم ابداع شدند. میکروموتور برپایه آب تیتانیم دی‌اکسید-طلا-منیزیم، به اندازه $20 \text{ } \mu\text{m}$ ، می‌توانست با سرعتی معادل $110 \text{ } \mu\text{m/s}$ حرکت کند. به‌منظور توسعه قابلیت جداسازی طیف وسیعی از آلودگی‌ها از آب، نوع جدیدی از میکروموتورها طراحی شدند. براساس قابلیت میکروذرات کربن فعال در جداسازی فلزات سنگین سمی، میکروموتورهای ژانوس کربن فعال با حرکت خودبه‌خود، پدید آمدند. میکروموتورهای ژانوس کربن فعال می‌توانستند با سرعتی بیش از $500 \text{ } \mu\text{m/s}$ حرکت کنند. با توجه به محیط‌های زیست‌پزشکی میکروموتورها، غلظت‌های مختلف سرم آلبومین گاوی (BSA)، برای میکروموتور PEDOT/MnO_2 به کار گرفته شد. به‌منظور بهبود قابلیت کاربردی میکروموتورها، پژوهش



شکل ۹- اثر گرانروی محلول بر رفتار دینامیکی میکروموتورها: (الف) افزایش سرعت میکروموتورها با ازدیاد گرانروی محلول و (ب) رابطه بین بسامد تولید حباب و گرانروی سوخت [۳۰].

بیشتر کاهش یابد، سرعت حرکت میکروموتورها بیشتر افزایش پیدا می‌کند. با استفاده از نتایج تجربی مشخص شد، حرکت میکروموتور در دمای کمتر و گرانیوی بیشتر، خطی است. در حالی که در دمای بیشتر و گرانیوی کمتر، دایره‌وار است. یک مدل تجربی از حرکت‌های دینامیکی وابسته به دما در میکروموتورها، به منظور توصیف رفتار دینامیکی میکروموتورهای حباب‌رانشی ساخته شد. بنابراین، دمای محلول می‌توانست در بهبود کنترل کارآمدی میکروموتور به کار گرفته شود و میکروموتورهای دارای حرکت خودبه‌خود در سرعت‌های زیاد را با محیط زیستی درون‌تنی و سلول‌ها سازگارتر کند [۳۰].

نتیجه‌گیری

میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، میکرو-نانوذراتی هستند که دارای قابلیت حرکت خودبه‌خود کاتالیزی را از راه تجزیه سوخت هیدروژن پراکسید در سطح پلاتینی هستند. این میکرو-نانوموتورها، در علوم پزشکی و محیط زیست کاربرد دارند. با وجود اینکه در کاربرد دارورسانی به سلول‌های سرطانی، غلظت سوخت هیدروژن پراکسید، به عنوان فراورده سوخت و ساز سمی این سلول‌ها، نسبت به غلظت آن در نزدیکی سلول‌های سالم به مراتب بیشتر است، امروزه تلاش‌های زیادی برای کاهش غلظت سوخت مورد نیاز و همچنین جایگزین سایر سوخت‌های طبیعی، مثل اوره، اسید معده و غیره شده است. با این حال، سرعت و کارآمدی میکرو-نانوموتورهای پلاتینی، بیش از سایرین است. بدین سبب، میکرو-نانوموتورهای پلاتینی جزو رایج‌ترین انواع میکرو-نانوموتورها هستند، در حالی که راه طولانی در رسیدن به استفاده درون‌تنی در درمان بیماری‌هایی مثل سرطان را در پیش دارند.

مراجع

- Peng F., Men Y., Tu T., Chen Y., and Wilson D.A., Nanomotor-based Strategy for Enhanced Penetration across Vasculature Model, *Adv. Funct. Mater.*, 1-8, 28, **2018**.
- Liu L., Gao J., Wilson D.A., Tu Y., and Peng F., Fuel-free Micro-/nanomotors as Intelligent Therapeutic Agents, *Chem. Asian J.*, **14**, 2325-2335, 2019.
- Wang J., Dong R., Wu H., Cai Y., and Ren B., A Review on Artificial Micro/nanomotors for Cancer-Targeted Delivery, Diagnosis, and Therapy, *Nano-Micro Lett.*, **12**, 11-30, 2020.
- Pacheco M., López M.Á., Jurado-Sánchez B., and Escarpa A., Self-propelled Micromachines for Analytical Sensing: A Critical Review, *Anal. Bioanal. Chem.*, **411**, 6561-6573, 2019.

در برخی مطالعات، سرعت میکروموتورها مستقل از گرانیوی بود. با استفاده از محاسبات نظری و نتایج آزمایشگاهی، برخی مدل‌های هیدرودینامیکی از میکروموتورهای با حرکت خودبه‌خود که رشد حباب را توصیف می‌کردند، با استفاده از محاسبات نظری و نتایج آزمایشگاهی، پیشنهاد شدند. در این مدل‌ها، از نیروی کشش سطحی، نیروی داخلی و نیروی تکانه گاز صرف نظر شده که سبب حذف جمله مربوط به گرانیوی شد. در حرکت‌های واقعی، به ویژه در حرکت‌های تحت عدد رینولدز کمتر، نمی‌توان از نیروی کشش سطحی در ابعاد میکرو-نانو چشم‌پوشی کرد.

مطالعات بعدی درباره سازوکارهای حرکت میکروموتورهای حباب‌رانشی، به منظور کنترل حرکت، انجام گرفته‌اند. همچنین، موتور شیمیایی پلیمری ساخته شد که با استفاده از هیدروژن پراکسید به عنوان سوخت شیمیایی حرکت می‌کرد. سپس، رابطه بین سرعت عمودی موتور و گرانیوی سوخت‌ها به دست آمد. افزون بر این، با توجه به نسبت سرعت موتور و گرانیوی محیط، سرعت عمودی موتور با تغییر گرانیوی، می‌توانست کنترل شود [۳۰].

دما

دما، به عنوان یکی از عامل‌های اصلی محیطی، کمتر توسط پژوهشگران بررسی شده است. بیشتر واکنش‌های شیمیایی تحت تاثیر دما هستند. سرعت حرکت میکروموتورها با افزایش دما افزایش می‌یابد. Sanchez به این موضوع اشاره داشت، دما می‌تواند برای کنترل کارآمدی میکروموتورها به کار گرفته شود. رفتار دینامیکی با تغییر دما مدل شد. ثابت شد، بین ۵ و ۲۰ °C، سرعت میکروموتورها افزایش می‌یابد. وقتی دما بیش از ۲۰ °C است، رابطه بین دما و سرعت، خطی است. هم‌زمان، گرانیوی دینامیکی محلول، با افزایش دما از ۵ °C به ۳۷ °C، از ۱/۷ MPa.s به ۰/۹ MPa.s، کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، هر چه گرانیوی

5. Xu D., Zhan C., Sun Y., Dong Z., Wang G.P., and Ma X., Turn-number-dependent Motion Behavior of Catalytic Helical Carbon Micro/Nanomotors, *Chem. Asian J.*, **14**, 2497-2502, 2019.
6. Medina-Sánchez M., Xu H., and Schmidt O.G., Micro-and Nano-motors: The New Generation of Drug Carriers, *Ther. Deliv.*, **9**, 303-316, 2018.
7. *Robotic Systems and Autonomous Platforms: Advances in Materials and Manufacturing*, Walsh S.M., and Strano M.S. (Eds.), Elsevier, Texas, 3-28, 2019.
8. Sonntag L., Simmchen J., and Magdanz V., Nano-and Micromotors Designed for Cancer Therapy, *Molecules*, **24**, 10-44, 2019.
9. Kagan D., Laocharoensuk R., Zimmerman M., Clawson C., Balasubramanian S., Kang D., Bishop D. et al., Rapid Delivery of Drug Carriers Propelled and Navigated by Catalytic Nanoshuttles, *Small*, **6**, 2741-2747, 2010.
10. Golestanian R., Liverpool T.B., and Ajdari A., Propulsion of a Molecular Machine by Asymmetric Distribution of Reaction Products, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 220-224, 2005.
11. Howse J.R., Jones R.A.L., Ryan A.J., Gough T., Vafabakhsh R., and Golestanian R., Self-motile Colloidal Particles: From Directed Propulsion to Random Walk, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 102-106, 2007.
12. Wu Y., Lin X., Wu Z., Möhwald H., and He Q., Self-propelled Polymer Multilayer Janus Capsules for Effective Drug Delivery and Light-triggered Release, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 10476-10481, 2014.
13. Zhao L., Liu Y., Xie S., Ran P., Wei J., Liu Q., and Li X., Janus Micromotors for Motion-capture-ratiometric Fluorescence Detection of Circulating Tumor Cells, *Chem. Eng. J.*, **382**, 123-135, 2020.
14. Safdar M., Khan S.U., and Jänis J., Progress Toward Catalytic Micro-and Nanomotors for Biomedical and Environmental Applications, *Adv. Mater.*, **30**, 170360-170378, 2018.
15. Wilson D.A., Nolte R.J.M., and van Hest J.C.M., Autonomous Movement of Platinum-loaded Stomatocytes, *Nat. Chem.*, **4**, 268-274, 2012.
16. Yi D., Zhang Q., Liu Y., Song J., Tang Y., Caruso F., and Wang Y., Synthesis of Chemically Asymmetric Silica Nanobottles and Their Application for Cargo Loading and as Nanoreactors and Nanomotors, *Angew. Chem. Int. Edit.*, **55**, 14733-14737, 2016.
17. Zhao G. and Pumera M., Geometric Asymmetry Driven Janus Micromotors, *Nanoscale*, **6**, 11177-11180, 2014.
18. Yamamoto D., Takada T., Tachibana M., Iijima Y., Shioi A., and Yoshikawa K., Micromotors Working in Water through Artificial Aerobic Metabolism, *Nanoscale*, **7**, 13186-13190, 2015.
19. Ozin G.A., Manners I., Fournier-Bidoz S., and Arsenault A., Dream Nanomachines, *Adv. Mater.*, **17**, 3011-3018, 2005.
20. Paxton W.F., Sen A., and Mallouk T.E., Motility of Catalytic Nanoparticles through Self-generated Forces, *Chemistry*, **11**, 6462-6470, 2005.
21. Wang Z., Chi Q., Liu L., Liu Q., Bai T., and Wang Q., A Viscosity-based Model for Bubble-propelled Catalytic Micromotors, *Micromachines*, **8**, 185-198, 2017.
22. Li L., Wang J., Li T., Song W., and Zhang G., Hydrodynamics and Propulsion Mechanism of Self-propelled Catalytic Micromotors: Model and Experiment, *Soft Matter*, **10**, 7511-7518, 2014.
23. Gao W., Dong R., Thamphiwatana S., Li J., Gao W., Zhang L., and Wang J., Artificial Micromotors in the Mouse's Stomach: A Step Toward In Vivo Use of Synthetic Motors, *ACS Nano*, **9**, 117-123, 2014.
24. Wang L., Chen J., Feng X., Zeng W., Liu R., Xiuqing L., Ma Y. et al., Self-propelled Manganese Oxide-based Catalytic Micromotors for Drug Delivery, *RSC Adv.*, **6**, 65624-65630, 2016.
25. Xu D., Wang Y., Liang C., You Y., Sanchez S., and Ma X., Self-propelled Micro/Nanomotors for On-demand Biomedical Cargo Transportation, *Small*, 190246, 1-22, 2019. DOI: /10.1002/sml.201902464
26. Shklyaev S., Janus Droplet As a Catalytic Micromotor, *Europhys. Lett.*, **110**, 54-59, 2015.
27. Xuan M., Shao J., Lin X., Dai L., and He Q., Light-activated Janus Self-assembled Capsule Micromotors, *Colloids Surf. A*, **482**, 92-97, 2015.
28. Lin Z., Wu Z., Lin X., and He Q., Catalytic Polymer Multilayer Shell Motors for Separation of Organics, *Chemistry*, **22**, 1587-1591, 2016.
29. Huang W., Manjare M., and Zhao Y., Catalytic Nanoshell Micromotors, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 21590-21596, 2013.
30. Liu L., Bai T., Chi Q., Wang Z., Xu S., Liu Q., and Wang Q., How to Make A Fast, Efficient Bubble-driven Micromotor: A Mechanical View, *Micromachines*, **8**, 20-36, 2017.