


اسپرمربات‌ها

دریچه‌ای نوین به بیوسیستم و
رباتیک در ابعاد کوچک

عمار صالحی 

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک 
بیوسیستم، دانشگاه تهران

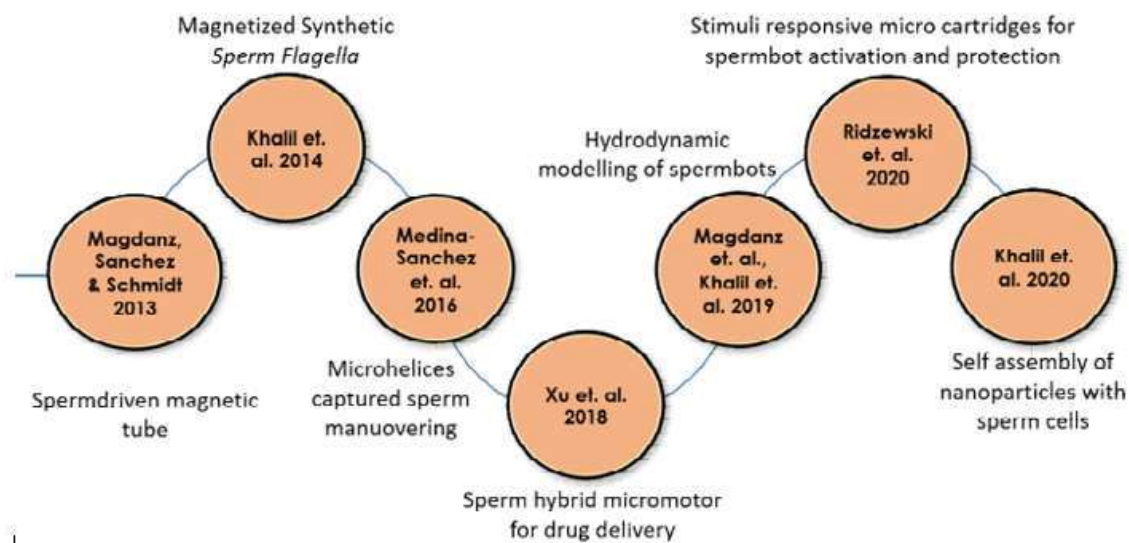
اسپرم و میکروساختارهای مصنوعی است که در اندازه نانو و میکرو هم برای کمک به سلول‌های اسپرم برای اجرای وظیفه و عملکرد ذاتی‌شان در محیط فیزیولوژیک و هم برای استفاده از نیروی پیشرانش آن‌ها برای به حرکت در آوردن میکروروبات ساخته می‌شوند [۱]. این نوع میکروروبات که به اسپرم‌ربات شناخته می‌شوند برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ توسط پروفیسور اشمیت و همکاران معرفی و توسعه داده شدند. [۲]

از این میکروروبات‌ها برای کاربردهایی متنوعی می‌توان استفاده کرد. از جمله کاربردهای آن در فرآیند تحویل نانوداروها به سلول‌هایی خاص نظیر سلول‌های سرطانی است. این میکروروبات‌ها می‌توانند با نانوداروهای خاصی بارگذاری شده و به نقاط مشخصی در بدن که رسیدن به آن‌ها با روش‌های مرسوم بسیار دشوار یا غیرممکن است هدایت شوند. این میکروروبات‌ها هم‌چنین در فرآیند لقاح مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند در این کاربرد یک میکروروبات مارپیچ شکل، سلول اسپرم را با خود حمل می‌کند. به این ترتیب با کنترل میکروروبات حامل سلول اسپرم و هدایت آن به داخل سلول تخمک به صورت مصنوعی عمل لقاح صورت می‌پذیرد. با هدایت اسپرم‌ربات‌ها به سمت سلول‌های تخمک داخل بدن موجود می‌توان فرآیندهای بارورسازی پرهزینه و زمان‌بر سنتی را به حداقل رساند. به این منظور تیم تحقیقاتی اشمیت و همکاران از یک میکرولوله به طول ۵۰ میکرومتر با غشای آهنی برای محصور کردن اسپرم گاو استفاده کرد [۲]. اسپرم‌ربات‌ها هم‌چنین برای درمان سرطان دهانه رحم نیز پیشنهاد شده‌اند [۳]. به طور سنتی، سرطان دهانه رحم یا

با ظهور اولین میکرو-نانو ربات‌ها و با توجه به ساختار بسیار ریز آن‌ها و اجازه دسترسی غیرتهاجمی به فضاهای کوچکی که پیش از این امکان دسترسی به آن‌ها فراهم نبود، کاربردهای آن‌ها نیز در زمینه‌های گوناگون شبکه‌های سنسور متحرک، میکروسیال‌ها، سیستم بهداشت و درمان، بیومهندسی و ساخت و تولید در ابعاد ریز به سرعت و به طرز چشمگیری افزایش یافت. مزایای بی‌شمار این ربات‌های بسیار کوچک در این زمینه‌ها موجب محبوبیت آن در بین پژوهشگران شد؛ مزایایی هم‌چون امکان ساخت انبوه و کم هزینه برای عملیات موازی گسترده و بستری نوین برای مطالعه فیزیک و دینامیک در مقیاس میکرو علی‌رغم کاربردهای بسیار زیاد و جذاب میکرو-نانو ربات‌ها در میان پژوهشگران، چالش‌هایی اساسی در این حوزه هم‌چنان محل بحث و پژوهش است؛ چالش‌هایی نظیر فعال‌سازی، کنترل، تأمین توان و غیره. در طبیعت فرآیند پیشرانش در ابعاد میکرو و در محیط‌هایی با اعداد رینولدز پایین (نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوزیته) روش‌های زیادی چون تاژک‌های همه‌کاره در میکرواورگانیسم‌هایی نظیر باکتری‌ها، ریزجلبک‌ها، اسپرم‌ها و غیره وجود دارد. پژوهشگران با الهام از طبیعت، میکرواورگانیسم‌های بیولوژیکی همچون باکتری‌ها، اسپرم‌ها و جلبک‌ها را با میکروروبات نوعی ترکیب کردند و دسته‌ی جدیدی از ربات‌ها در ابعاد کوچک را به نام میکروروبات‌های بیوهیبریدی ایجاد کردند یکی از این نوع میکروروبات‌ها، نوعی میکروموتور هیبریدی بر اساس ترکیب سلول‌های



با جراحی‌های تهاجمی یا با شیمی‌درمانی درمان می‌شود. هر کدام مجموعه‌ای از عوارض جانبی و معایب خاص خود را دارند. از آنجایی که اسپرم از قبل برای شنا در این محیط سازگار شده است، آنها می‌توانند به عنوان حاملی برای تحویل هدف مند دارو عمل کنند. از اسپرم ربات‌ها هم چنین می‌توان برای حمل ژن‌ها mRNA یا عوامل کنتراست تصویر برداری به صورت جداگانه یا به صورت دسته‌جمعی بهره برد. تایم لاین توسعه اسپرم ربات‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است



شکل ۱. تاریخچه و روند کلی توسعه اسپرم‌ربات‌ها

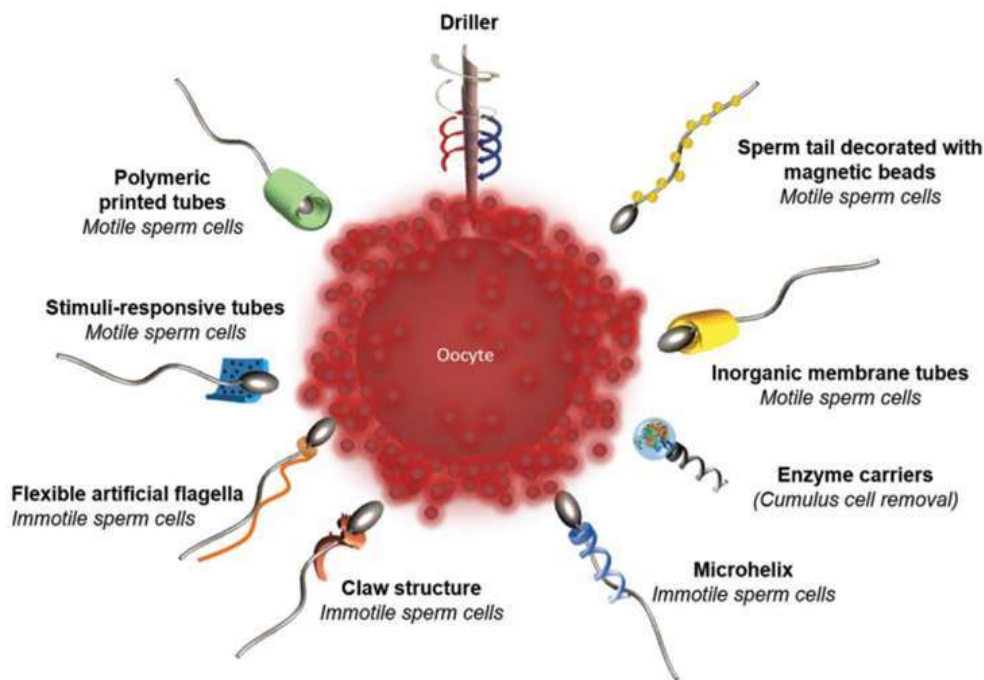
3- ربات مصنوعی با نیروی پیشران سلول اسپرم

برای این سه رویکرد، طراحی‌های مختلفی وجود دارد که برخی از آنها در شکل ۲ نمایش داده شده است [۵]

به صورت کلی سه رویکرد برای طراحی و توسعه اسپرم‌ربات‌ها وجود دارد [۴]

- 1- ربات کاملاً مصنوعی
- 2- ربات با ذرات اکسید آهن روی سلول اسپرم





شکل ۲. انواع مختلف اسپرم ربات ها

DLW یا Direct Laser Writing

سه بعدی و رسوب بخار فیزیکی (physical vapor deposition)

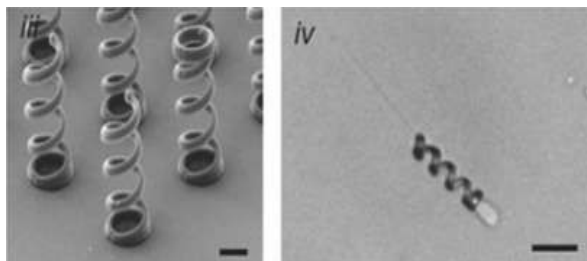
استفاده می شود که قابلیت طراحی و ساخت قطعات مارپیچی (هلیکال) با شکل دلخواه و نسبتاً ساده را فراهم می سازد. فرآیند ساخت این نوع میکروهلیکس در مقاله [توتوری و همکاران تشریح شده است [۶]

رویکرد اول: ربات کاملاً مصنوعی

این رویکرد زمانی کاربرد دارد که سلول های اسپرم بی حرکت هستند و یا آن قدر قوی نیستند که به سلول های تخمک برای باروری برسند. این رویکرد تاکنون با دو طراحی منحصر به فرد عرضه شده است: الف- میکروهلیکس های پلیمری و ب- اسپرم مغناطیسی (MagnetoSperm).

الف: میکروهلیکس های پلیمری

میکروهلیکس های پلیمری با روکش فلزی که با استفاده از لیتوگرافی لیزری دو فوتون سه بعدی ساخته می شوند برای انتقال سلول های اسپرم بدون تغییر در کیفیت زیستی آنها مناسب هستند (شکل ۳). به این منظور از تکنیک

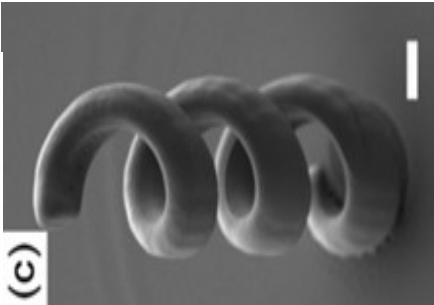


شکل ۳. میکروهلیکس های پلیمری


زمانی که یک پلیمر حساس به نور به عنوان پوشش روی یک لایه قرار گرفته و در معرض یک لیزر پالس با طول موج، مدت و شدت مناسب قرار می‌گیرد، به دلیل جذب دو فوتون، به صورت موضعی پیچ می‌خورد. زمانی که این فرآیند در فضای سه بعدی تکرار و از طریق یک رایانه کنترل می‌شود، می‌تواند ر به تولید ساختارهای سه بعدی با دقت بالا شود. برای اینکه این تاژک‌های مصنوعی نسبت به میدان‌های مغناطیسی حساس باشد، آن‌ها را با یک ماده مغناطیسی نظیر نیکل یا آهن پوشش‌دهی می‌کنند. برای اطمینان از سازگاری زیستی آن‌ها، یک لایه تیتانیوم نیز ممکن است پوشش‌دهی شود. مکانیزم حرکتی این نوع ربات، تبدیل حرکت دورانی به حرکت انتقالی با الهام از تاژک‌های باکتریایی است. قابلیت طراحی DLW پیشرفت‌های نوین در روش معماری‌های متنوعی را فراهم می‌کند. برای این نوع میکروهلکس‌ها نیز دو طراحی پیشنهاد شده است: نوع اول دارای شکلی کاملاً هلیکال و مارپیچی است و نوع دوم دارای بدنه هلیکال و یک میکروننگه‌دارنده در انتها است. (شکل ۴)

پارامترهای حائز اهمیت در طراحی این نوع میکروهلکس‌ها عبارتند از: مواد، طول، زاویه مارپیچ، قطر و ضخامت. این میکروهلکس‌ها نخستین بار توسط پروفیسور اشمیت و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای بارورسازی سلول تخمک مورد استفاده قرار گرفت [۷]. در این روش، میکروهلکس‌های تغییریافته به عنوان موتور برای انتقال سلول‌های اسپرمی که بی‌حرکت یا دارای نقص در حرکت هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند ساخت میکروهلکس‌های پلیمری در این تحقیق به DLW و پوشش‌دهی دولایه NiTi soft-magnetic انجام گرفته است. پس از آماده‌سازی، فرآیند کوپل کردن در این نوع اسپرم‌ربات‌ها به صورت دستی با استفاده از میدان مغناطیسی ناشی از مجموعه‌ای تغییریافته از سیم‌پیچ‌های موسوم به هلمهولتز (Helmholtz coils) انجام می‌شود. میکروهلکس‌ها با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی به سمت اسپرم بی‌حرکت، برده می‌شوند و تاژک سلول را می‌گیرند و آن را به سوی سلول تخمک هدایت می‌کنند. زمانی که اسپرم به داخل تخمک وارد شد، پوشش فلزی به وسیله میدان مغناطیسی کنترل شده خارجی برای لغزاندن اسپرم‌ربات در جهت برعکس می‌چرخد. [۸]

نوع اول



نوع دوم



شکل ۴. انواع میکروهلکس‌های پلیمری

کرده و به ساختار انعطاف پذیر اجازه می‌دهد خود. را با خطوط میدان مغناطیسی نوسانی ضعیف تنظیم کرده و در نتیجه باعث تولید نیروی رانشی شود. از این نوع میکروروبات برای کاربردهای پزشکی نظیر تحویل دارو و غیره استفاده می‌شود. خلیل و همکاران در مقاله‌های زیر به توسعه این نوع ربات پرداخته‌اند: [۱۰]-[۱۲]

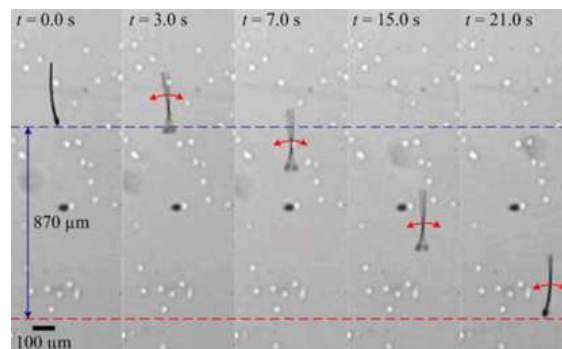
رویکرد دوم: IRONSperm

این رویکرد نیز برای اسپرم‌های غیرمتحرک کاربرد دارد. رویکرد کلی این روش مبتنی بر چسباندن ذرات اکسید آهن ۱ میکرومتری روی سطح اسپرم گاو بر اساس روش خود مونتاژی بر پایه نیروی الکترواستاتیک است. سلول‌های اسپرم از طریق میدان مغناطیسی صفحه‌ای یکنواخت در طول جهت حرکت با اجزاء متعامدی که به صورت سینوسی تغییر می‌کنند فعالسازی می‌شوند که به علت انعطاف محدود سلول ۱ منجر به سرعت‌های نسبتاً کم می‌شوند. سلول‌ها به صورت کامل به وسیله ذرات اکسید آهن ۱ میکرومتری پوشانده می‌شوند که منجر به دامنه خم شدن نسبتاً کوچکی در طول تاژک می‌شود. کلید اصلی حفظ انعطاف ذاتی سلول اسپرم، استفاده از ذرات در ابعاد نانو و عدم پوشاندن کامل اسپرم توسط ذرات است. به جای پوشاندن کامل اسپرم با ذرات، باید المنت‌های مغناطیسی متفاوتی را در بعضی قسمت‌های اسپرم ایجاد کرد. یعنی از ذرات امتدادیافته در ابعاد نانو که کوچکتر هستند برای چسباندن روی بعضی از نقاط اسپرم گاو بر پایه توزیع بار الکتریکی آن استفاده می‌شود. روش ساخت این اسپرم‌ربات بر پایه بارهای الکتریکی سطحی متضاد در سلول‌های اسپرم گاو و نانوذرات مغناطیسی است تا میکروروبات را از طریق تعامل الکترواستاتیکی توسعه داد.

فرآیند کاپلینگ باید به گونه‌ای باشد که از صدمه زدن به سلول اسپرم و پاره کردن و نفوذ به آن و همچنین از گیرکردن سلول اسپرم در آن خودداری شود. تکنیک‌های مختلفی برای تصویربرداری و تعقیب اسپرم‌ربات معرفی شده است که از آن جمله می‌توان به فلورسانس نوری، تابش مادون قرمز، آنالیز اشعه ایکس، تشدید (رزونانس) مغناطیسی و تصویر برداری التراسونیک (سونوگرافی) اشاره کرد.

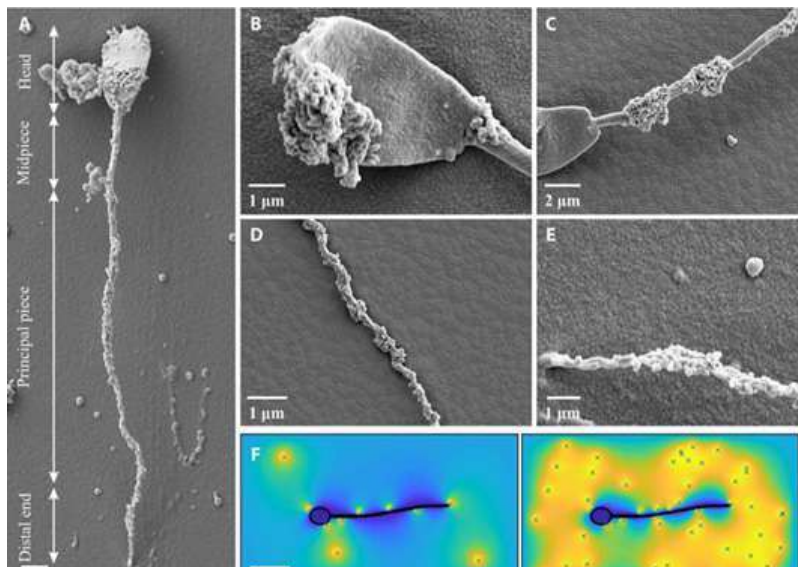
ب: اسپرم مغناطیسی (MagnetoSperm)

در این حالت از کل سلول اسپرم (سر و دم) برای ایجاد نیروی محرکه تقلید شده است که از میدان‌های نوسانی صفحه‌ای مغناطیسی استفاده می‌کند و ظاهری شبیه [به سلول اسپرم دارد (شکل ۵) [۹]



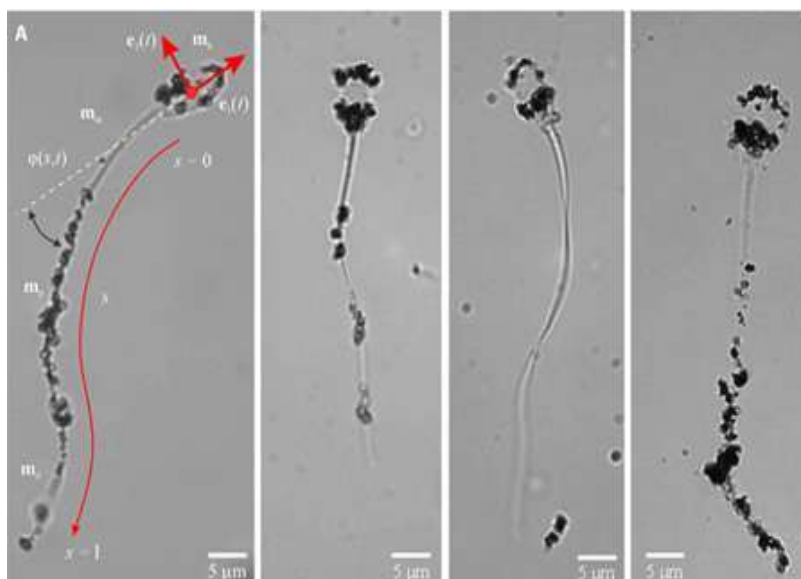
شکل ۵. اسپرم مغناطیسی

ساختار دم، گردن و سر این ربات با استفاده از فوتولیتوگرافی از پلیمر SU-8 ساخته می‌شود. این ربات دارای یک سر مغناطیسی و یک دم قابل انعطاف است سر مغناطیسی از یک لایه کبالت-نیکل ساخته می‌شود. لایه کبالت-نیکل، یک مومنت دوقطبی ایجاد



شکل ۶. یک میکروگراف از IronSperm

شکل ۶ یک میکروگراف الکترون پویشی از IronSperm را نشان می‌دهد اتصال ذرات اکسید آهن ۱۰۰ نانومتری کشیده شده روی قسمت سر (بی ۱) قسمت میانی (سی ۱)، قسمت اصلی (دی ۱) و قسمت انتهایی (ای ۱) سلول اسپرم گاو در میکروگراف الکترون نشان داده شده است. این میکروروبات شامل یک سلول اسپرم غیرمتحرک گاو است که با نانوذرات پوشانده (یا روکش) شده است.



شکل ۷. پیکربندی‌های مختلف IronSperm

فرآیند خود مونتاژ به یک تعادل می‌رسد به طوری که بارهای الکتریکی بین ذرات نانو و غشای اسپرم، بالانس می‌شوند. اسپرم دارای توزیع یکنواخت بار الکتریکی نیست، بنابراین پیکربندی‌های مختلفی برای IronSperm معرفی شده است. (شکل ۷)

همه این IRONSperm ها از طریق قسمت هایی با پوشش نانوذرات و قسمت های بدون پوشش مشخص شده اند که انعطاف پذیری را در زمان مهیا کردن گشتاور مغناطیسی برای فعالسازی مغناطیسی و نیروی محرکه تاژی کنترل شده، تضمین می کند. نیروی محرکه تاژی مارپیچی در عددهای رینولدز پایین تحت اثر میدان های مغناطیسی یکنواخت با یک جزء بی ثبات متناوب حاصل می شود. فرآیند پوشش دهی نانوذرات، پژمردگی بدنه ارگانیک را بهبود می بخشد و امکان موقعیت یابی از طریق تصاویر التراسوند را فراهم می سازد در حالی که بدنه ارگانیک با یک دارو بارگذاری شده و به صورت قابل کنترل با استفاده از میدان های مغناطیسی در طول مسیرهای مرجع هدایت می شود. این نوع اسپرمربات با استفاده از سوسپانسیون نانوذرات مغناطیسی با قطر ۱۰۰ نانومتر و سلول های اسپرم گاو (با طول تقریبی ۶۰ میکرومتر) ساخته می شوند. ذرات داخل سوسپانسیون تحت تأثیر نیروهای الکترواستاتیک (وان در والس و کلمب) قرار می گیرند. مواد تشکیل دهنده و سلول های اسپرم به صورت متضاد شارژ می شوند. [۴]

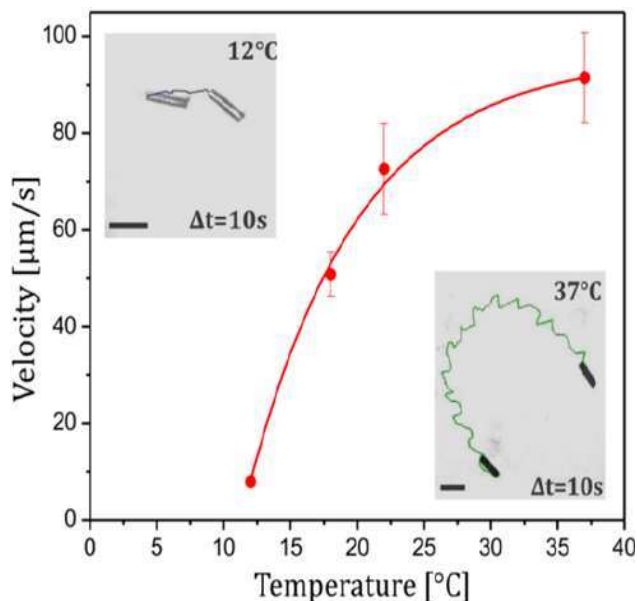
رویکرد سوم: اسپرمربات میکروتیوبی

این نوع میکروتیوب ها با استفاده از تکنیک های میکروساخت و به وسیله نانو تکنولوژی مقاوم نوری (حساس به نور) rolled-up ساخته می شود. ساختار حساس به نور (sacrificial layer) که آن را لایه موقت می نامند روی یک اسلاید شیشه به صورت مربعی با ضلع ۵۰ میکرومتر طراحی می شود روی این پترن لایه ای نازک نانومتری

از دو فلز متفاوت به وسیله تبخیر پرتو الکترونی (electron-beam evaporation) در یک در یک زاویه ته نشین می شود. گفته می شود که تفاوت در نرخ های ته نشینی و زاویه «شیب موجب ایجاد یک «دولایه کشیده می شود. زمانی که لایه موقت (strained bilayer) حل می شود این «دولایه کشیده» به صورت طبیعی در میکروتیوب های با طول ۵۰ میکرومتر و دیواره های نازک در ابعاد نانو ترکیب می شود. زمانی که این میکروتیوب ها - با قطری که اندکی بزرگتر از سر اسپرم است - در درون محلول اسپرما توزوئید غوطه ور می شوند، سلول های اسپرم وارد میکروتیوب می شوند و در آن به دام می افتند و میکروتیوب ها را با خود به حرکت در می آورند. این فرآیند جفت شدن و کوپلینگ کاملاً به صورت فیزیکی و تصادفی است، بنابراین بازده جفت شدن چندان زیاد نیست. برای افزایش بازده، چسباننده لکولی خاصی مورد استفاده قرار می گیرد. بیومولکول های مختلفی برای چسباندن سلول های اسپرم به سطح داخلی تیوب وجود دارد [۸]. جهت بهتر کردن گیرافتادن سلول های اسپرم درون سطح داخلی میکروتیوب ها، دو روش الصاق و اتصال مورد استفاده قرار می گیرد: شیمی پیوند دهنده سطح (surface linker chemistry) و تکنولوژی چاپ میکروتماس (microcontact printing technology). هرچند هر دو روش، گیرافتادن سلول های اسپرم را بهتر می کند اما فرآیند جفت شدن همچنان تصادفی و کنترل نشده است. بنابراین توسعه روشی که سلول های تک اسپرمی انتخاب شده را به صورت کنترل شده به میکروتیوب ها متصل کند می تواند بسیار سودمند باشد [۱۳]



است. پاسخ سلول‌های اسپرم به تغییرات دما می‌تواند برای کنترل سرعت اسپرم‌ربات‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش دما از ۱۲ درجه سانتی‌گراد تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد، اسپرم‌ربات دارای شتاب می‌شود (شکل ۸). زمانی که دما مجدداً کاهش می‌یابد، سرعت اسپرم‌ربات می‌تواند کاهش یابد و در نهایت حرکت سلول اسپرم آنقدر کند می‌شود که اسپرم‌ربات از حرکت باز می‌ایستد. این عمل می‌تواند برعکس شود و با افزایش دما سلول اسپرم شروع به حرکت کرده و میکروتیوب را به سمت جلو هل می‌دهد. بنابراین کنترل حرکت اسپرم‌ربات به صورت «توقف و حرکت» قابل اجرا خواهد بود. سرعت لحظه‌ای اسپرم‌ربات در محدوده ۲ تا ۴۷ میکرومتر بر ثانیه متغیر است و سرعت متوسط آن ۱۵ میکرومتر بر ثانیه در دمای ۳۰ درجه است.



شکل ۸. اثر دما بر سرعت اسپرم‌ربات‌ها

اسپرم‌ربات‌های مصنوعی می‌توانند با استفاده از لیتوگرافی دوفوتون (Nanoscribe GmbH, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany)

اخته شوند (چاپ لیزری ۳ بعدی موسوم به لیتوگرافی دو فوتونی به روش مستقیم نوشتن لیزر است با افزودن یک رزین حساس به نور فرابنفش به چند لایه، این ماده در نقاطی که دو فوتون با هم ملاقات می‌کنند، به یک پلیمر جامد تبدیل می‌شود). زمانی که یک پلیمر حساس به نور روی یک لایه، پوشش داده می‌شود و در معرض یک لیزر پالس با طول موج، مدت زمان و شدت مناسب قرار داده می‌شود، به صورت موضعی به دلیل جذب دو فوتون خمیده می‌شود. زمانی که این فرآیند در فضای سه بعدی در حالی که توسط کامپیوتر کنترل می‌شود مرتباً تکرار می‌گردد، می‌تواند ساختارهای سه بعدی با دقت بسیار بالا (۱۰۰ نانومتر) تولید کند.

اثر دما روی اسپرم‌ربات‌ها

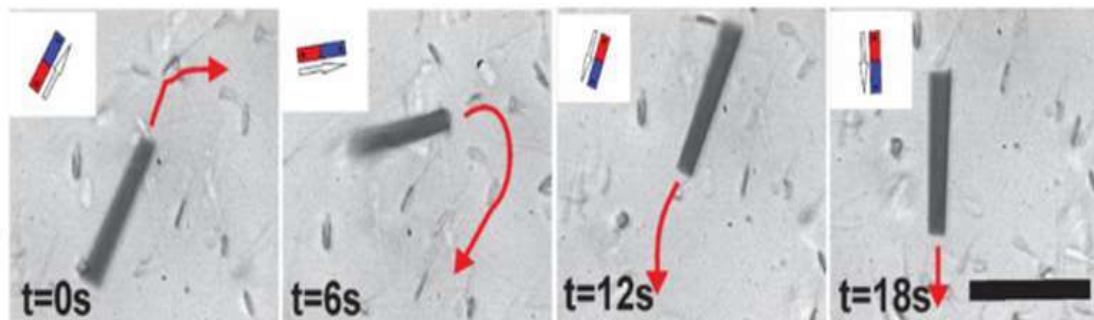
اسپرم‌ربات‌ها نسبت به تغییرات دما حساس هستند. سلول‌های اسپرم بدون توجه به اینکه آیا گرفته شده‌اند یا نه، در دماهای مختلف، فعالیت متابولیک متفاوتی را نشان می‌دهند که در نتیجه میزان تحرک آن‌ها تغییر می‌کند. برای بررسی اثر دما، نمونه‌ها را گرم و سرد ضبط می‌کنند. دما در محدوده ۴۰-۵ درجه سانتی‌گراد که محدوده دمایی قابل تحمل کرده و همزمان حرکت میکروتیوب‌ها را توسط سلول‌های اسپرم گاو است، نگه داشته می‌شود. افزایش دما منجر به افزایش سرعت می‌شود. دلیل این موضوع تغییرات فیزیولوژیکی در متابولیسم سلول اسپرم



کنترل مغناطیسی

گرد (شکل ۹). در تمام این آزمایش‌ها، یک آهنربای نئودیمیوم با شدت میدان مغناطیسی ۵۴۰ میلی تسلا مورد استفاده قرار گرفته اند که در فاصله ۲ سانتی متری روی نمونه اعمال شده است که منجر به یک شدت میدان مغناطیسی ۲۲ میلی تسلا می‌شود. این شدت میدان برای تنظیم و هدایت میکروتیوب‌ها در طول خطوط میدان مغناطیسی خارجی مناسب است

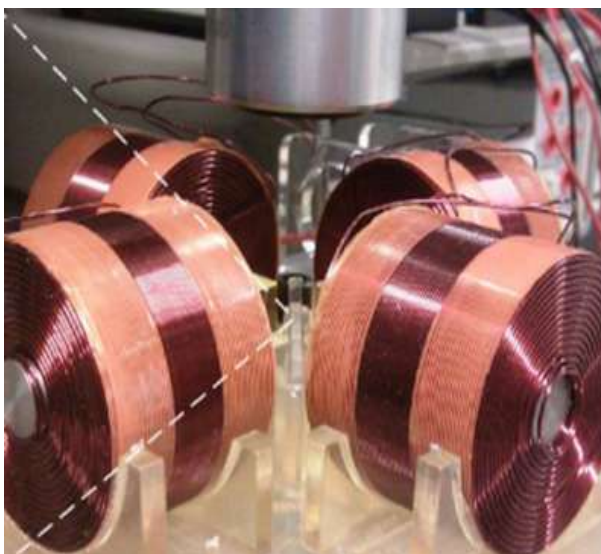
به دام انداختن سلول اسپرم درون یک میکروتیوب فرومغناطیسی روشی مناسب برای کنترل آن بدون ایجاد تغییر در سلول است. پس از اینکه سلول اسپرم و میکروتیوب کوپل و جفت شدند، اسپرم‌ربات می‌تواند با هماهنگی و تنظیم شدن با میدان مغناطیسی خارجی به روشی مشابه با آنچه که در گذشته با نانوذرات، باکتری مغناطیسی و میکروجت‌های خود پیشران انجام شده است [۱۴]، هدایت



شکل ۹. نحوه هدایت اسپرم‌ربات‌ها با میدان مغناطیسی خارجی

خودکار میکروتیوب متصل است، انجام می‌شود. (شکل ۱۰)

سرعت سلول اسپرم پیش از جفت شدن، به صورت لحظه‌ای به ۱۰۰ میکرومتر بر ثانیه می‌رسد در حالی که وقتی سلول اسپرم با میکروتیوب جفت می‌شود، سرعت به میزان میانگین ۱۰ میکرومتر بر ثانیه کاهش می‌یابد. زمانی که فرآیند جفت شدن انجام شود، سلول درون تیوب با فاکتور جهت بالایی نزدیک به (۱) حرکت می‌کند. این مقدار حتی زمانی که یک آهنربای خارجی اعمال شود نیز کمتر خواهد شد؛ زیرا تنظیم تیوب به وسیله خطوط میدان مغناطیسی القا می‌شود. کنترل مغناطیسی اسپرم‌ربات‌ها از طریق استفاده از مجموعه‌ای از چهار سیم‌پیچ الکترومغناطیسی و یک میکروسکوپ که به (یک نرم‌افزار تشخیص تصویر برای ردیابی

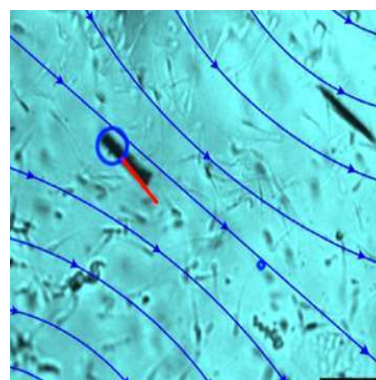


شکل ۱۰. فعال‌سازی و کنترل اسپرم‌ربات‌ها با استفاده از سیستم الکترومغناطیسی

برای PNIPAM-(stimuli-responsive) ساخت یک ساختار دینامیکی برای آزادسازی سلول تک اسپرم به صورت کنترل از راه دور با تغییرات PNIPAM استفاده می‌شود. پلیمر کوچک د متورم و جمع می‌شود و می‌تواند برای القای تغییرات ساختاری میکروساختارهای پلیمری مورد استفاده قرار گیرد. در مبحث اسپرم‌ربات‌ها از بهومی مشابه با میکروجره‌های تیوبی محرک-پاسخگو استفاده می‌شود که باز و بسته می‌شوند و هم‌چنین مطابق با آن سرعتشان نیز تغییر می‌کند. فیلم‌های پلیمری نازک وله‌ای بر اساس مواد واکنشی-حرارتی پلی (Nisopropylacrylamide-co-acryloylbenzophenone-co-acrylic acid) (PNIPAM - co - ABP - AAC)

و لایه‌های نازک تیتانیوم و آهن به عنوان عناصر غیرفعال فرومغناطیسی برای گرفتن و آزاد کردن سلول ای اسپرم در محدوده دمای فیزیولوژیکی با یک محرک دمایی خارجی ساخته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است آزادسازی سلول‌های اسپرم از درون میکروتیوب‌ها با استفاده از افزایش دما از یک دمای کاری ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد (دمای بهینه سلول‌های اسپرم) انجام شود. بنابراین لایه پلیمر از هم پاشیده شده و منجر به افزایش شعاع و در نهایت باز شدن تیوب می‌شود.

این سیستم کنترلی چرخه-بسته از اسپرم‌ربات در دو بُعد را تأمین می‌کند. جزئیات این کار در پژوهش خلیل و همکاران تشریح شده است. [۱۵] همانگونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، میکروتیوب در طول خطوط میدان مغناطیسی تراز می‌شود. با استفاده از مجموعه سیم‌پیچی الکترومغناطیسی، قدرت میدان مغناطیسی لازم برای هدایت اسپرم ربات، تواند د قطر و با تقریب ۱.۳۹ mT تعیین شود. ناحیه همگرایی به دست آمده برای کنترل حرکت اسپرم‌ربات که با این سیستم کنترل بازخوردی (فیدبک) به دست آمده است برابر با به دست آمده است برابر با $90 \pm 40 \mu\text{m}$ است.

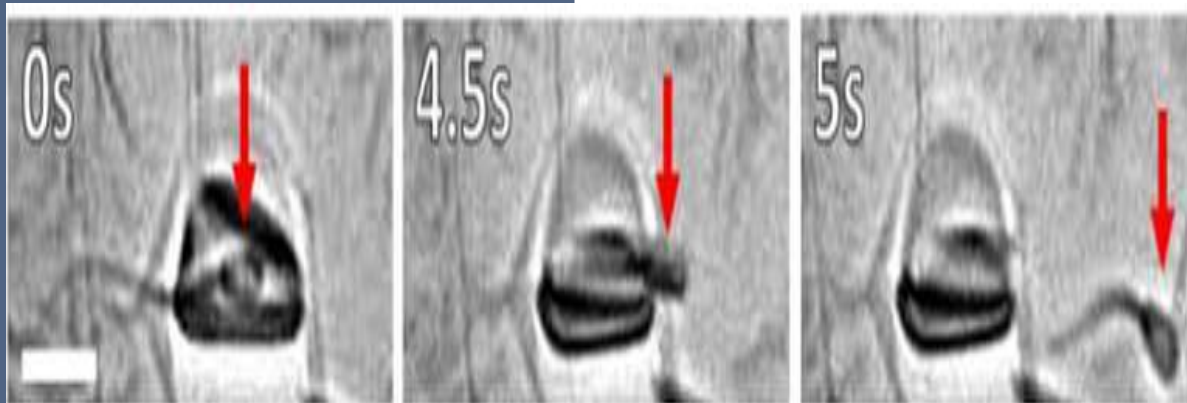


شکل ۱۱. نحوه کنترل اسپرم‌ربات با میدان مغناطیسی خارجی

میکروتیوب‌های پلیمری واکنشی حرارتی (واکنش دهنده نسبت به حرارت) برای آزادسازی سلول

اگرچه سلول‌های تک اسپرمی می‌تواند به وسیله میکروتیوب‌های فزی لوله‌شونده (rolled-up) گرفته و هدایت شود، اما این میکروساختارها امکان رهاسازی سلول به صورت کنترل شده را فراهم نمی‌سازند به این منظور پلیمر محرک-پاسخگو





شکل ۱۲. فرآیند آزادسازی سلول اسپرم از میکروتیوبها

نتیجه گیری

اسپرم‌ربات‌ها به عنوان نوعی از میکروروبات‌های بیوهیبریدی زیست سازگار، نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه بارورسازی، درمان سرطان و فرآیند تحویل دارو از خود نشان می‌دهد. با این حال چالش‌های زیادی در این حوزه وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نداشتن نیروی پیش‌رانش و تحرک یکسان در سلول‌های اسپرم، نگرانی از صدمه دیدن سلول‌های اسپرم در زمان کوپل شدن با میکروتیوب‌های میکروولهیکس‌ها، دشواری‌های زیاد در تصویربرداری در زمان واقعی از اسپرم‌ربات‌ها، استراتژی و رویکرد کنترل پیچیده، درک مدل دینامیکی تعامل و رفتار اسپرم‌ربات‌ها در محیط بیولوژیکی پیرامون و پیچیده بودن درک رفتار معی اسپرم‌بات‌ها اشاره کرد. با این حال تا زمانی که پژوهشگران به درکی عمیق از عامل اسپرم‌ربات‌ها با محیط پیرامون، بارهای مصنوعی و مواد بیولوژی می‌رسند، حوزه‌های کاربرد بالقوه آنها نیز هم‌چنان گسترش خواهد یافت.

منابع

- [1] M. Medina-Sánchez, V. Magdanz, L. Schwarz, H. Xu, and O. G. Schmidt, "Spermbots: Concept and applications," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10384 LNAI, pp. 579–588.
- [2] V. Magdanz, S. Sanchez, and O. G. Schmidt, "Development of a Sperm-Flagella Driven Micro-Bio-Robot," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 45, pp. 6581–6588, Dec. 2013.
- [3] H. Xu, M. Medina-Sánchez, V. Magdanz, L. Schwarz, F. Hebenstreit, and O. G. Schmidt, "Sperm-Hybrid Micromotor for Targeted Drug Delivery," *ACS Nano*, vol. 12, no. 1, pp. 327–337, Jan. 2018.
- [4] V. Magdanz et al., "IRON-Sperm: Sperm-Templated soft magnetic microrobots," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 28, pp. 1–16, 2020.