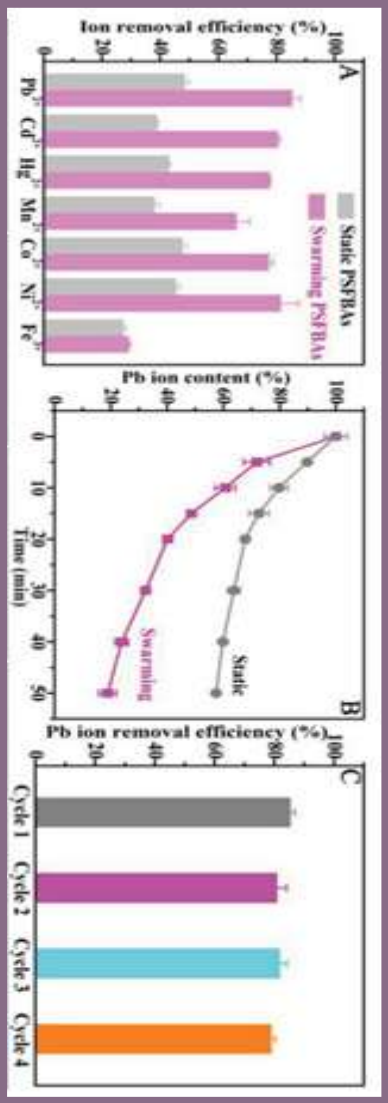


بررسی کاربردهای سیستم‌های میکروروباتیک در حوزه صنایع غذایی، پاک‌سازی محیطی و کشاورزی

عمار صالحی [۱]
سلیمان حسین‌پور [۲]

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم،دانشگاه تهران [۱]
دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی،دانشگاه تهران [۲]

amar.salehi@ut.ac.ir
shosseinpour@ut.ac.ir

چکیده

در چند سال گذشته جهش چشم‌گیری در فناوری میکروروباتیک وجود داشته است که باعث شده این رشته جدید به‌سرعت در حال رشد باشد. باوجودی که میکروربات‌ها به‌صورت گسترده برای کاربردهای مختلف به‌خصوص در پزشکی و سلامت مورداستفاده قرارگرفته‌اند اما کاربردهای میکروربات‌ها در کشاورزی و صنایع غذایی کمتر موردتوجه قرارگرفته است. در این پژوهش پتانسیل‌سنجی کاربردهای فناوری میکروروباتیک در حوزه کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، فرآیندها و کاربردهای متنوعی نظیر نظارت و از بین بردن آلودگی‌های ناشی از رشد باکتری‌ها و مخمرها در نوشیدنی‌ها، تصفیه و پالایش آب، استخراج مواد شیمیایی با ارزش از سلول‌های گیاهی، تولید زیست‌سوختی به روش غیرمخرب، انتقال ژن‌های ارزشمند در کشاورزی و غیره با فناوری میکروروباتیک قابل‌اجرا خواهند بود.

کلمات کلیدی

میکروروباتیک، کشاورزی، صنایع غذایی، فناوری‌های نوین، میکروربات مغناطیسی.

مقدمه

میکروروباتیک یک حوزه بین‌رشته‌ای رو به رشد است که حوزه‌های مختلفی از علوم نظیر علم مواد، میکروساخت، رباتیک، کنترل و موارد دیگر را ترکیب می‌کند و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Wang et al., 2022; Yang et al., 2019). موید این گزاره، میزان تحقیقات صورت گرفته است؛ چنان که جستجوی کلمه «microrobotics» (تا لحظه نگارش این مقاله) در گوگل اسکالر ۲۲۷۰۰ رفرنس را در پی دارد.

تاکنون تعریفی جامع، استاندارد و مورد توافق از «میکروربات» ارائه نشده است، با این حال با ترکیب تعاریف ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف، می‌توان میکروربات‌ها را رباتی‌هایی با ابعاد مشخص از ۱ میکرومتر تا ۱ میلی‌متر تعریف کرد که در آن نیروهای مبتنی بر حجم مثل نیروهای اینرسی، جاذبه و شناوری بر حرکت میکروربات تقریباً ناچیز هستند. (N Chaillet & Régnier, 2013; Sitti, 2017).

بسته به چیدمان اجزاء میکروربات‌ها (مثل سنسورها، فعال‌سازها، واحد کنترل و منبع انرژی) می‌توان آن‌ها را بر اساس شاخص‌های مختلفی دسته‌بندی کرد؛ مانند وظیفه یا اندازه، عملکرد، حرکت و موقعیت‌یابی، امکان دستکاری، نوع کنترل و فعال‌سازی، منبع تأمین توان و خودگردانی. با ظهور اولین میکروربات‌ها 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 نظیر شبکه‌های سنسور متحرک، میکروسیال‌ها، سیستم بهداشت و درمان، بیومهندسی و ساخت و تولید در ابعاد میکرو به سرعت و به طرز چشمگیری افزایش یافت. مزایای بی شمار میکروربات‌ها 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 با وجودی که میکروربات‌ها به صورت گسترده برای کاربردهای فوق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما استفاده از آن‌ها به عنوان ابزاری نوظهور در کشاورزی و صنایع غذایی و نوشیدنی، فرصت‌های جدیدی را در جهت گسترش افق دانش در این زمینه به ارمغان خواهد آورد. با بررسی منابع در این حوزه، به نظر می‌رسد توجه بیش از حد دانشمندان به کاربردهای ذکر شده موجب مغفول ماندن کاربردهای وسیع میکروربات‌ها در کشاورزی و صنایع غذایی شده است.

بر خلاف ربات‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر، تجهیز میکروربات‌های کنونی به حسگرها و فعال‌سازها بسیار دشوار است، بنابراین اغلب آن‌ها دارای ساختار بسیار ساده‌ای هستند و در حقیقت تنها از چند نوع ماده اولیه ساخته می‌شوند. از طرف دیگر کنترل دقیق بر روی حرکت میکروربات و فعال‌سازی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این چالش، نتیجه‌ی محدودیت‌های مربوط به ابعاد داخلی میکروربات‌هاست که اجازه حمل هیچ‌گونه سیستم الکترونیکی یا تأمین توان را نمی‌دهد. در نتیجه، استراتژی‌های فعال‌سازی و کنترل مرسوم که در ابعاد بزرگ‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند برای میکروربات‌ها پاسخگو نیست و در نتیجه میکروربات‌ها نیازمند استراتژی‌های فعال‌سازی و کنترل جدیدی هستند.

برای حل این چالش، یعنی تأمین توان و فعال‌سازی میکروربات‌ها، تحقیقات و آزمایش‌های گسترده‌ای انجام شده است. روش‌های شیمیایی (Mirkovic et al., 2010; Moo & Pumera, 2015; Sanchez et al., 2011) میدان مغناطیسی (Khalil et al., 2014) پیزوالکتریک (Kosa et al., 2007) میدان الکتریکی (Donald et al., 2006) نور (Palagi et al., 2016) و فراصوت (Qiu et al., 2016) و یا ترکیبی از آن‌ها (Ahmed et al., 2017; Carlsen & Sitti, 2014; Felfoul et al., 2016) توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده‌اند. انتخاب مناسب سیستم میکروروباتیک که وابسته به مکانیزم‌های فعال‌سازی زیست‌سازگار باشد از اهمیت بسیاری برخودار است (Fischer & Ghosh, 2011).

از این رو، کنترل و فعال‌سازی مغناطیسی به دلیل تأثیر حداقلی بر سلامت، زمان پاسخ سریع و کنترل دقیق، یک انتخاب .برجسته و امیدبخش به حساب می‌آید از ویژگی‌های مثبت میدان مغناطیسی، غیرقابل لمس بودن و امن بودن آن برای بسیاری از مواد بیولوژیکی است. از طرف دیگر هیچ‌گونه گرمایی در طول انجام فرآیندها توسط ذرات مغناطیسی تولید نمی‌شود. مزیت دیگر استفاده از میدان‌های مغناطیسی برای کنترل میکروربات‌ها، داشتن قدرت کم و فرکانس پایین است که تولید و دستکاری آن‌ها را ساده‌تر می‌کند؛ بنابراین در سال‌های اخیر، استفاده از روش فعال‌سازی و کنترل مغناطیسی در میان پژوهشگران این حوزه، به دلیل قابلیت کار در فضای کاری با اندازه‌ها و درجات آزادی .مختلف، محبوبیت بسیاری کسب کرده است

انتخاب رویکرد مناسب و نوع میکروربات که در آن ساختار فعال‌ساز مشخص می‌شود از اهمیتی زیادی برخوردار است؛ زیرا پس از انتخاب رویکرد، نوع و کاربرد میکروربات، می‌توان معادلات دینامیکی آن را فرمول‌بندی کرد. در این پژوهش پتانسیل‌های استفاده از سیستم فعال‌سازی برای کنترل میکروربات‌های مغناطیسی در کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سیستم‌های مغناطیسی دائمی دورانی یا آهنرباهای دائمی، پارامترهای میدان مغناطیسی در فضای کاری با تغییر موقعیت یا جهت آهنربای فعال‌ساز (و یا هر دو به صورت هم‌زمان) کنترل می‌شود، در حالی که در سیستم‌های الکترومغناطیسی با سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی تولید شده از طریق جریان‌های سیم‌پیچ کنترل می‌گردد.

پیش‌نیازهای تئوری

در یک سیال، دو نوع نیرو و گشتاور بر حرکت میکروربات‌های مغناطیسی غالب است: مغناطیسی و سیالات. اگر میکروربات‌ها در نزدیک یک مرز حرکت کنند، اثر دیوار و نیروهای مرزی نیز حرکت آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در میکروربات‌های مغناطیسی، نیروها و گشتاور مغناطیسی اغلب تنها ورودی‌های کنترلی آن سیستم میکروروباتیک هستند که کنترل دینامیکی آن منجر به فعال کردن تغییرات نیروها و گشتاورهای دیگر می‌شود به طوری که نیرو و گشتاور برآیند حرکت مورد نظر را تأمین می‌کند.

میکروربات‌های مغناطیسی معمولا از فلزات با ویژگی پارامغناطیسی همچون آلیاژهای کبالت، نیکل و آهن ساخته می‌شوند تا از پاسخ سریع و بالای مغناطیسی آن‌ها برای کنترل و فعال‌سازی میکروربات‌ها استفاده شود. قاعده کلی فعال‌سازی مغناطیسی، به حرکت در آوردن میکروربات با استفاده از میدان و/ یا گشتاور مغناطیسی است. نیروی مغناطیسی که از آن برای به حرکت در آوردن میکروربات استفاده می‌شود با گرادیان میدان مغناطیسی متناسب است در حالی که گشتاور مغناطیسی به میدان مغناطیسی مرتبط است که وظیفه‌ی هم‌تراز کردن مغناطش میکروربات با میدان را به عهده دارد. میدان مغناطیسی دورانی به دلیل اثر نسبتاً طولانی مدت بر قدرت میدان ضعیف، بر میدان‌های گرادیان ارجحیت دارد. (Abbott et al., 2009).

در فعال‌سازی مغناطیسی با استفاده از سیم‌پیچ‌ها، میدان ایجاد شده معمولا متناسب با جریان الکتریکی درون سیم‌پیچ‌ها در نظر گرفته می‌شود. این فرض در صورتی صحیح است که هیچ‌گونه ماده‌ای با ویژگی‌های پسماند مغناطیسی غیر خطی در نزدیکی آن نباشد. میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک سیم‌پیچ دایره‌ای با اعمال قانون بیو-ساوار برای هر دور سیم‌پیچ بیان می شود که با رابطه ۱ بیان می‌گردد:

$$\vec{B}_{ec}(x,y,z) = \frac{\mu_0 N_t I}{4\pi} \int \frac{\overrightarrow{dl} \times \vec{a}_R}{|\vec{r}|^2}$$

که در آن جریان I رنده از سیم برحسب آمپر ، $\vec{B}_{ec}(xyz)$ میدان مغناطیسی ناشی از الکترومغناطیس در موقعیت میکروربات بر حسب تسلا، N_t تعداد سیم های دور سیم پیچ، $\overrightarrow{dl}$ یک قطعه خط بی نهایت کوچک در جهت انتگرال بر حسب متر ، μ_0 ضریب گذردهی خلا بر حسب تسلا در متر بر آمپر ، $\vec{a}_R$ واحد بردار از قطعه خط $\overrightarrow{dl}$ تا نقطه مورد نظر در فضا و $|\vec{r}|$ نیز فاصله ی قطعه خط تا نقطه مورد نظر است. این رابطه بیان میکند که میدان مغناطیسی $\vec{B}_{ec}(xyz)$ از یک سیم به طول $\mathbf{dl}$ حامل جریان ثابت $\mathbf{I}$ است. این معادله امکان محاسبه میدان های مغناطیسی را برای توزیع دلخواه جریان هم چون حلقه های دایروی یا مستطیلی را فراهم می سازد.

برای چند منبع میدان، اصل برهم‌نهی صادق است؛ یعنی برای تعیین میدان کل، میدان موجود در هر یک از سیم‌پیچ‌ها با هم جمع می‌شوند. میدان مغناطیسی یکنواخت می‌تواند توسط یک جفت سیم‌پیچ هلمهولتز ایجاد شود. سیم‌پیچ هلمهولتز از دو سیم‌پیچ دایره‌ای شکل با شعاع و تعداد دور سیم‌پیچی یکسان که به صورت هم‌محور قرار گرفته‌اند تشکیل شده است و با فاصله‌ای برابر با شعاع سیم‌پیچ با جریان‌های یکسانی که در یک جهت همسان می‌گذرند از هم جدا شده‌اند. با عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها، برآیند میدان I الکتریکی مغناطیسی آن‌ها در حوالی نقطه میانی به صورت یک میدان تقریباً یکنواخت و موازی با محور این سیم‌پیچ‌ها خواهد بود. به منظور افزایش بهره وری انرژی و افزایش درجات آزادی کنترل موقعیت و جهت‌گیری میکروربات‌ها، ترکیبی از هر دو سیستم الکترومغناطیسی و مغناطیسی دائمی را می توان در نظر گرفت.

هدایت و حرکت دقیق میکروربات‌ها در حضور اغتشاشات خارجی ناشی از نویزهای محیط اطراف، نیازمند یک سیستم کنترل حلقه-بسته قوی و کارآمد است. در حقیقت، ماهیت سیستم‌های فعال‌سازی مغناطیسی ذاتاً ناپایدار است، بنابراین لازم است یک سیستم کنترلی دارای بازخورد برای سیستم‌های میکروروباتیک فراهم گردد. از آن‌جا که میکروروباتهای مغناطیسی باید در یک فضای کاری، یک یا چند وظیفه مشخص را انجام دهند، سیستم‌های ماشین بینایی نقش بسیار مهمی در ارائه بازخورد بر عهده دارند. از طرف دیگر به منظور جمع‌آوری اطلاعات مربوط به موقعیت و جهت میکروربات‌ها و ارائه بازخورد از بالا و کنار فضای کاری به سیستم کنترل حلقه بسته، تکنیک ماشین بینایی و تصویربرداری در زمان واقعی مورد نیاز است؛ بنابراین استفاده از روش ماشین بینایی به عنوان یک عنصر بازخورد فعال به سیستم کنترل، انعطاف‌پذیری بیشتری را به سیستم اضافه می‌کند. وظیفه اصلی آن تعیین موقعیت میکروربات با استفاده از یک یا چند دوربین در فضای دو بعدی و سه بعدی و به صورت بلادرنگ است.

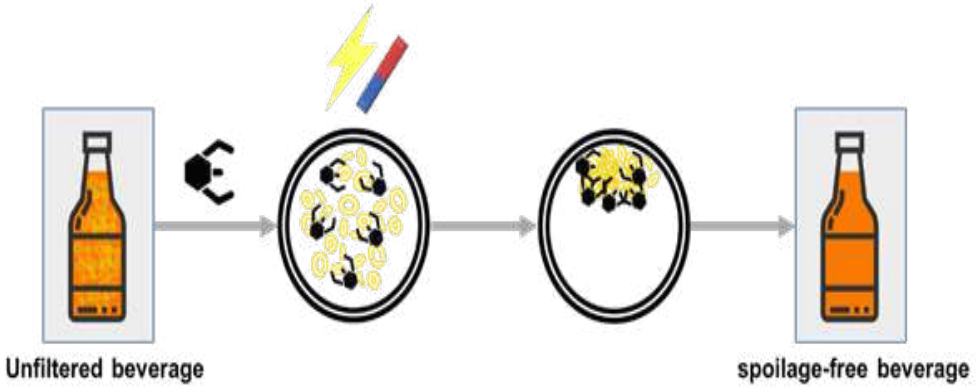
کاربردهای عملی و بالقوه

همان‌گونه که پیشتر نیز عنوان شد کاربرد میکروروباتیک در صنایع غذایی و کشاورزی بسیار محدود گزارش شده است. نمونه‌هایی از کاربرد میکروروباتیک در این دو حوزه در .این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است گروهی از دانشمندان در سال ۲۰۲۰ از میکروربات‌های خودران دوگانه‌ی حساس به نور و مغناطیس استفاده کردند که به صورت فعال در داخل نوشیدنی‌ها حرکت کرده و

می‌توانند سلول‌های مخمر را گیر بیاندازد فرآیند فعال‌سازی این میکروربا‌تها و حذف مخمرها به ترتیب از طریق نانوذرات مغناطیسی قرارداده شده روی رباتها و تابش نور مرئی روی سطح آن انجام می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان داد که میکروربات‌ها توانستند تقریبا ۱۰۰٪ از مخمرهای باقی‌مانده در نوشیدنی‌های فیلترنشده را حذف کنند. (Villa et al., 2020)

در حوزه کشاورزی نیز اخیرا برخی از پژوهشگران توانستند از میکروربات‌ها برای برداشت مواد شیمیایی با ارزش از سلول های گیاهی استفاده کنند. به این منظور از یک سوزن میکروسکوپی برای حذف شکل خالص .ماده از طریق هوش مصنوعی استفاده کردند در این پژوهش، تشخیص سلول‌های غنی از متابولیک گیاه با استفاده از شبکه عصبی انجام می‌شود و سپس با استفاده از میکروربات این سلول‌های غنی را استخراج می‌کنند به صورتی که بقیه گیاه دست نخورده باقی می‌ماند (Bae et al., 2021).

سیستم فعال‌سازی برای کنترل میکروربات‌ها برای کاربرد در صنایع غذایی و نوشیدنی نظیر نظارت و از بین بردن آلودگی‌های ناشی از رشد باکتری‌ها، مخمرهایی نظیر Zygosaccharomyces bailii که در مواد متراکم (کنسانتره) و شربت‌ها رایج است و قارچ‌هایی مانند Candida davenportii که در نوشابه های حاوی میوه، نوشابه‌های کولا و نوشابه‌های مصنوعی به صورت زیادی رشد می‌کنند، به صورت بالقوه قابل کاربرد است.



شکل -۱ تصویر شماتیک از از بین بردن و جداسازی آلودگی‌ها از نوشیدنی بدون فیلتر در حضور میکروربا‌تها

بر اساس یک مطالعه انجام شده در سال ۲۰۱۲ میکروربات‌ها (Campuzano et al., 2012) می توانند به طور موثر در آب سیب به حرکت درآیند و وظایف پیچیده ای مانند گرفتن، جمع آوری و رهاسازی دسته ای از میکروارگانیسم ها (مانند باکتری ها) را انجام دهند.

در پژوهشی دیگر ترکیبی از نیسین که یکی از معمولترین باکتریوسینها دارای ساختار پپتیدی است وبه صورت طبیعی دارای ساختار ضدباکتریایی است، و یک میکروربات برای کشتن انتخابی باکتری های گرم مثبت استفاده از این میکروربات .(Yuan et al., 2021) شد برای غلبه بر مشکل رو به رشد مقاومت آنتی بیوتیکی در صنایع غذایی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از میکروربات‌ها در گرفتن یا کشتن باکتری‌های مضر تقریباً دارای راندمان ۸۵

.درصد در آبمیوه، شربت و آب لوله کشی بود
میکروربات‌ها را می‌توان برای استحصال قند از درختان و برداشت مواد شیمیایی با ارزش از سلول های گیاهی مورد استفاده قرار داد و هم‌چنین می‌تواند سوخت زیستی را بدون نیاز به قطع کردن یا آسیب رساندن به درختان تولید نماید. یکی دیگر از پتانسیل‌های این طرح انتقال ژن به ذرت با استفاده از ریزنمونه جوانه کامل و مریستم راسی ساقه و همچنین انتقال ژن به برنج به منظور تغییر ساختار ریشه و تحمل به خشکی و یا به طور کلی انتقال ژن در گیاهان مختلف برای فراهم کردن زمینه لازم جهت انتقال ژن‌های ارزشمند است. هم‌چنین برای کشف و تجزیه عملکرد ژن ها و پروتئین ها قابل استفاده می‌باشد. پژوهش‌های مشابهی برای کاربرد انتقال ژن توسط میکروربات‌ها در سال‌های اخیر انجام شده‌اند که دارای قابلیت اجرای بسیار زیادی هستند. (Pedram & Pishkenari, 2017; Terrazas Armendáriz et al., 2021)

از دیگر کاربردهای بالقوه سیستم فعال‌سازی مغناطیسی برای کنترل میکروربات‌ها در اصلاح و نظارت بر کیفیت آب است. به عنوان نمونه تسهیل در تشخیص آلاینده‌های اصلی و از بین بردن آن‌ها از جمله کاربردهای قابل توجه فناوری میکروروباتیک در این حوزه است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. (Andreescu et al., 2009)

برای مثال اولین نمونه از استفاده از میکرو/نانوربات‌ها برای گرفتن، انتقال و حذف قطرات روغن در آب توسط گاکس و همکاران گزارش شده است. (Guix et al., 2012)

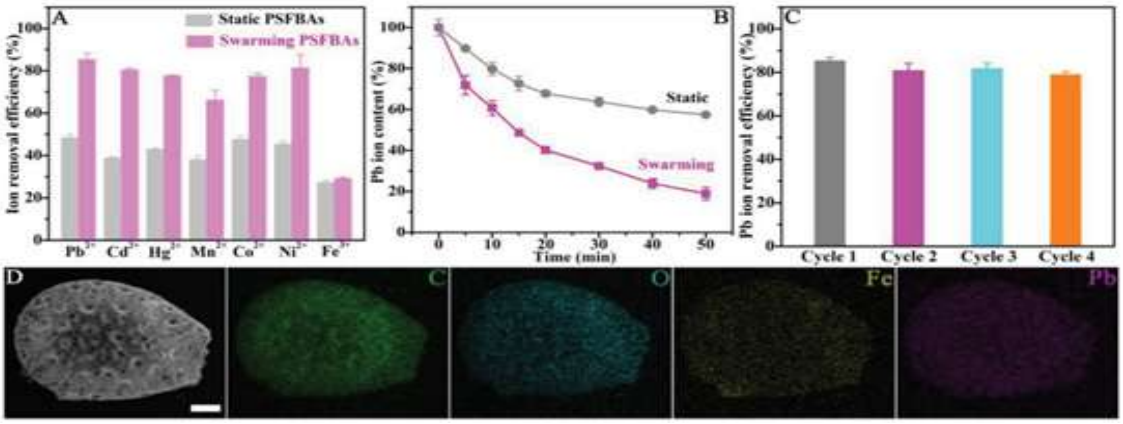
با تعمیم این روش می‌توان از سیستم توسعه داده شده در این پژوهش برای شناسایی و از بین بردن آلاینده‌های روغنی در نوشیدنی‌های کنسروی با پوشش پلیمری (Malecha et al., 2003) استفاده کرد. روش‌های مرسوم برای جداسازی و از بین بردن این آلودگی‌ها فاقد انتخاب‌پذیری و کارایی مطلوب هستند و از طرف دیگر نه تنها مقرون به صرفه نیستند بلکه سازگاری بسیار کمی با محیط زیست دارند (Guix et al., 2012).

از این رو میکروربات‌ها را می‌توان روشی موثر .و مقرون به صرفه در انجام این عملیات دانست مقاومت برخی از عوامل بیماری‌زا در برابر ضدعفونی‌کننده‌های معمولی با افزایش دوز ضدعفونی‌کننده و در نتیجه افزایش ضررهای جانبی به مایعات همراه است. برای مثال حذف باکتری Escherichia coli (E. coli) از آب آلوده بسیار چالش‌برانگیز است؛ از این رو استفاده از سیستم فعال‌سازی مغناطیسی و میکروربات‌های خود-پیشران که با نانوذرات نقره پوشش داده شده‌اند می‌تواند این عمل را با عملکرد بالاتری انجام داد. (Vilela et al., 2017)

پس از جمع‌آوری و نابودی باکتری‌ها، از ویژگی مغناطیسی میکروربات‌ها برای جمع‌آوری باکتری‌های مرده و خارج کردن آن‌ها از آب استفاده می‌شود. هم چنین میتوان از یک میکروربات استوانه‌ای که از طریق میدان مغناطیسی کنترل می‌شود برای از بین بردن آلاینده‌های آلی و کشتن باکتری‌های مضر در آب استفاده کرد. (Bernasconi et al., 2019).

این میکروربات دارای پوششی از خواص فوتوکاتالیستی و ضدباکتریایی است که برای انتقال بهینه عملکردهای حرکتی و تمیزکردن

آب به میکروربات‌ها موثر هستند.
علاوه بر کاربردهای ذکر شده می‌توان از سیستم میکروروباتیک برای تعیین کمیت مکانیک رشد سلول‌های گیاهی زنده در حال رشد استفاده کرد. رشد سلول‌های گیاهی فرآیندی اساسی در طول نمو گیاه است و جامعه زیست‌شناسی رشد با استفاده از رویکردهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، ژنتیکی، ریاضی و مدل‌سازی، رشد سلولی را از جنبه های مختلف مورد مطالعه قرار می‌دهند. سیستم میکروروباتیک توسعه داده شده قادر به تعیین خصوصیات مکانیکی خودکار سلول‌های گیاهی زنده در محیط آزمایشگاهی در هنگام تکثیر و رشد این سلول خواهد بود یکی از چالش‌ها در حوزه صنایع غذایی، وجود فلزات سنگین در زنجیره غذایی است. فلزات سنگین به آسانی زیست تخریب پذیر نیستند و می توانند وارد زنجیره غذایی و در نهایت وارد بدن انسان شوند و باعث ایجاد مسمومیت مزمن شوند. فرآیند موسوم به «جذب»، پرکاربردترین مکانیسم برای حذف یون های فلزات سنگین از آب آلوده است و برخی از بیومواد طبیعی با ساختار متخلخل جاذب بسیار خوبی هستند. به این منظور، گروهی از محققان از هاگ های Ganoderma lucidum طبیعی به عنوان الگوهایی برای سنتز میکروربات‌هایی استفاده کردند که توسط یک میدان مغناطیسی کنترل و بازیافت می شدند (Zhang et al., 2018).
میکروربات‌ها در حرکت جمعی توانستند تقریباً نیمی از سرب موجود در محلول آلوده را در عرض ۱۵ دقیقه حذف کنند و در ۵۰ دقیقه توانستند بیش از ۸۰ درصد از سرب را حذف کنند (شکل ۲)

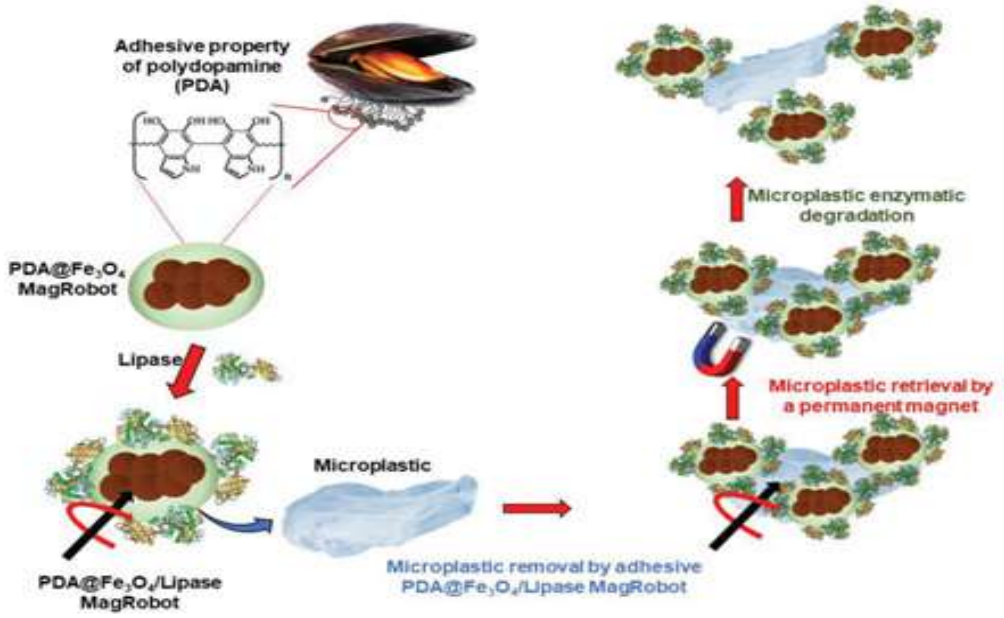


شکل -۲ استفاده از میکروربات‌های بیوهیبریدی به صورت استاتیک و جمعی برای عملیات پاکسازی یون‌های فلزات سنگین از محیط
(Zhang et al., 2018)

در فناوری میکروروباتیک می‌توان فرآیند «جذب» و فوتوکاتالیز را برای حذف همزمان آلاینده های آلی از آب ترکیب کرد. گزارش‌های متعددی وجود دارد که میکروپلاستیکها در غذا و آب آشامیدنی شناسایی شده است که ممکن است امنیت غذایی، ایمنی غذا و سلامت انسان را به خطر بیندازد. (Liu et al., 2021).
با الهام از خاصیت چسبندگی قوی پای صدف، گروهی از دانشمندان از پلی دوپامین خود پلیمریزه پوشیده شده بر روی سطوح نانوذرات Fe3O4 برای تولید میکروربات های مغناطیسی استفاده کردند که روشی مناسب برای جذب، انتقال و بازیافت آلاینده‌های میکروپلاستیک میکروپلاستیک تحت یک میدان مغناطیسی دوار خارجی ارائه می‌کنند.

(Zhou et al., 2021)

علاوه بر این، آنها نشان دادند که لیپاز تثبیت شده روی میکروربات‌ها می‌تواند میکروپلاستیک‌های پلی‌کاپرولاکتون را در حین گرفتن آنها تخریب کند. (شکل ۳)

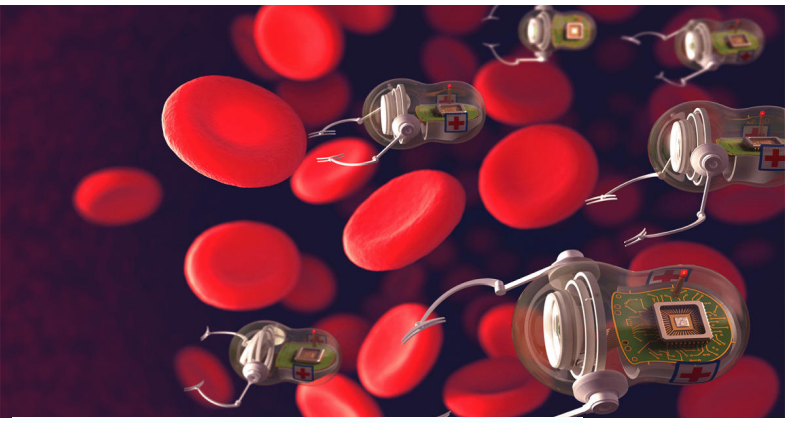


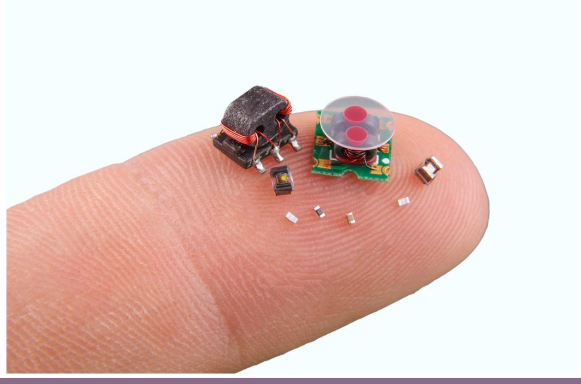
شکل -۳ تصویر شماتیک حذف میکروپلاستیک توسط میکروربات موسوم به Magrobot (Zhou et al., 2021).

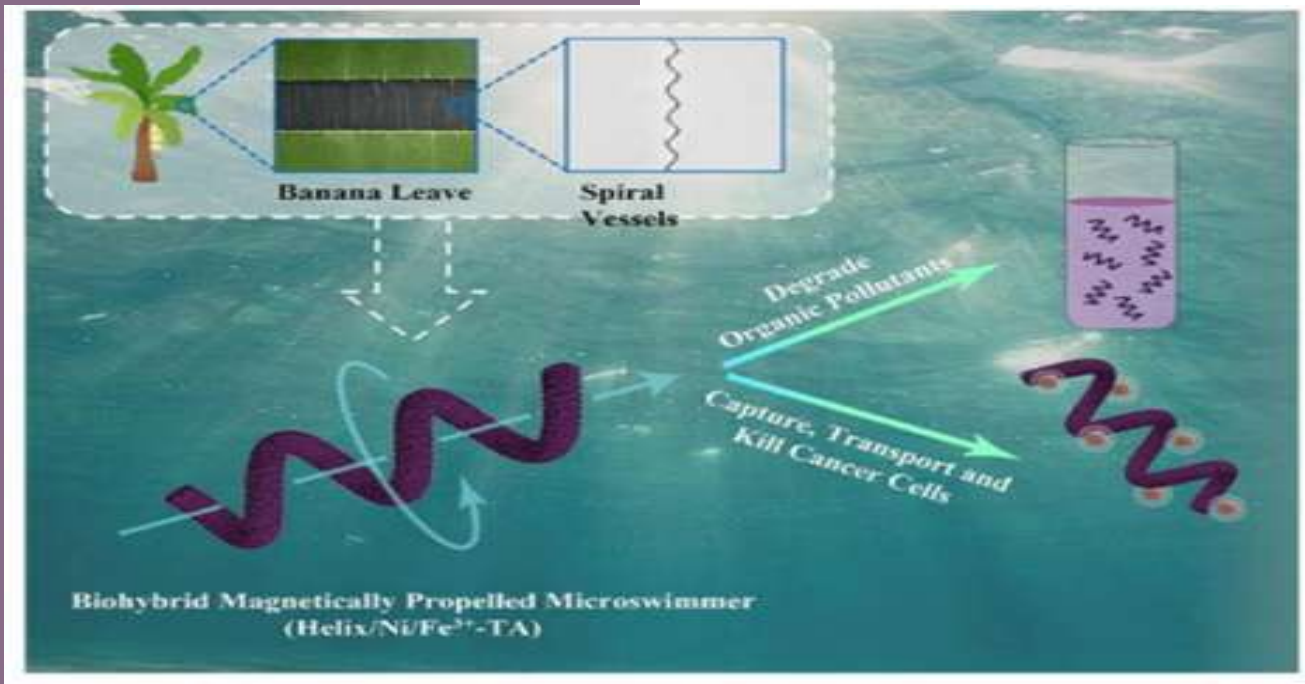
رنگ رودامین یکی از رایج ترین رنگ های مصنوعی است. قبلا از پودر فلفل، گوشت گاو و میوه های کنسرو شده به عنوان افزودنی های غذایی استفاده می شد، اما استفاده از آن به عنوان افزودنی غذایی یا رنگ پس از طبقه بندی سرطان زا در دسته سوم ممنوع بود. (Gusain et al., 2019)

چن و همکاران (۲۰۲۲) میکروربات‌های مغناطیسی را برای تخریب رودامین B (RhB) با استفاده از ساختار مارپیچ ذاتی برگ های موز به عنوان یک الگوی بیولوژیکی معرفی کردند. (Chen et al., 2022)

لایه های نیکل مغناطیسی اصلاح شده بر روی الگو با روش های شیمیایی ساده برای به دست آوردن توان و هدایت جهت در یک میدان مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت. این میکروربات در نهایت توانست RhB را تا ۹۰ درصد در محلول 0.03 میلی مولار آلوده به RhBتجزیه کند. (شکل 4)







شکل -۴ میکروربات‌های مارپیچی از آماده سازی قالب گیاهی برای تخریب rhB (Chen et al., 2022).

نتیجه‌گیری

میکروربات‌ها به عنوان یک ابزار نوظهور در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. کاربردهای گسترده میکروربا‌تیک، حوزه‌های مختلفی از علوم نظیر علم مواد، میکروساخت، رباتیک، کنترل و موارد دیگر را ترکیب می‌کند. اگرچه کاربردهای متنوع میکروربا‌تیک در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است اما در حوزه‌های کشاورزی و صنایع غذایی، بسیار نوپا است. با بررسی پتانسیل‌های کاربردی میکروربا‌تیک در این دو حوزه، نیاز به استفاده و به کارگیری بسیار گسترده‌تر از این فناوری بیش از پیش احساس می‌شود. پیشرفت گسترده در این حوزه می‌تواند با تخصص، توجه، خلاقیت و علاقه پژوهشگران به فناوری‌های نوینی چون میکروربا‌تیک در آینده نزدیک در دسترس باشد.

مراجع

1.Abbott, J. J., Peyer, K. E., Lagomarsino, M. C., Zhang, L., Dong, L., Kaliakatsos, I. K., & Nelson, B. J. (2009). How Should Microrobots Swim? The International Journal of Robotics Research, 28(11–12), 1434–1447. https://doi.org/10.1177/0278364909341658

2. Ahmed, D., Baasch, T., Blondel, N., Läubli, N., Dual, J., & Nelson, B. J. (2017). Neutrophil-inspired propulsion in a combined acoustic and magnetic field. Nature Communications, 8(1), 770. https://doi.org/10.1038/s41467-017-00845-5

3. Andreescu, S., Njagi, J., Ispas, C., & Ravalli, M. T. (2009). JEM Spotlight: Applications of advanced nanomaterials for environmental monitoring. J. Environ. Monit., 11(1), 27–40. https://doi.org/10.1039/B811063H