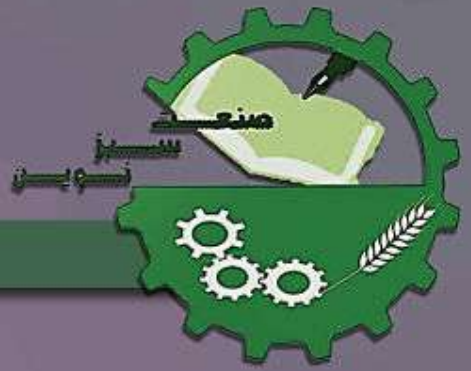


نشریه علمی - ترویجی

# صنعت سبز نوین

دوره ششم، شماره دوم



شماره مجوز: ۱۳۰۸۰۱/۱۳۲



در این شماره خواهیم خواند:

- مختصری درباره استاد دکتر علی محمد برقی
- اسپرم‌زات‌ها؛ دریچه‌ای نوین به بیوسیستم
- معرفی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما
- درک پیچیدگی هم‌بست آب-انرژی-غذا در توسعه پایدار
- بررسی کاربردهای میکروروباتیک در صنایع غذایی
- بررسی تأثیر زاویه تیغه، تعداد و چیدمان ساقه‌ها بر خواص برشی ساقه جعفری



مهندسی  
مکانیک بیوسیستم



مهندسی  
مکانیزاسیون کشاورزی



مهندسی  
ماشین‌های صنایع غذایی



دفتر نشر علمی و ترویجی



اداره نشر علمی و ترویجی



نشریه علمی ترویجی صنعت سبز نوین

Sanatsabz\_UT



sanatsabzsj.ut.ac.ir



انجمن علمی دانشجویان مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
دانشگاه تهران

SAAME\_UT

instagram.com/  
sanatsabz\_ut



lme/sanatsabz\_ut



نشریه علمی ترویجی صنعت سبز نوین

مهندسی مکانیک بیوسیستم، مهندسی مکانیزاسیون و مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی



Sanatsabz\_UT



انجمن علمی دانشجویان مهندسی ماشین‌های کشاورزی  
دانشگاه تهران

SAAME\_UT



مهندسی مکانیک بیوسیستم، مهندسی مکانیزاسیون و مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی



# شناسنامه

صنعت سبز نوین

نشریه علمی ترویجی مهندسی مکانیک بیوسیستم، مهندسی مکانیزاسیون و مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

دوره ششم، شماره دوم، زمستان ۱۴۰۰

شماره مجوز: ۱۳۰۸۰۱/۱۳۲

صاحب امتیاز: انجمن علمی دانشجویی مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

مدیر مسئول: محمد قوشچیان

سر دبیر: محمد قوشچیان، عمار صالحی

اساتید مشاور:

دکتر علی جعفری (مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش طراحی)، دکتر شاهین رفیعی (مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش انرژی‌های تجدیدپذیر)، دکتر سید سعید مختببی (مهندسی مکانیک بیوسیستم گرایش فناوری پس از برداشت) و دکتر اسداله اکرم (مهندسی مکانیزاسیون)

هیئت تحریریه تخصصی:

دکتر کامران خیرعلی‌پور (عضو هیئت علمی گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ایلام و رئیس موسسه فنی مهندسی و کشاورزی دهلران)، محمد قوشچیان (دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران)، عمار صالحی (دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران)، میثم امامیان (دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران)

همکاران این شماره:

دکتر سلیمان حسین‌پور (عضو هیئت علمی گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران)، دکتر سعید مینایی (عضو هیئت علمی گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس)، دکتر کامران خیرعلی‌پور (عضو هیئت علمی گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ایلام و رئیس موسسه فنی مهندسی و کشاورزی دهلران)، دکتر علیرضا مهدویان (عضو هیئت علمی گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس)، محمد هادی خوش تقاضا (عضو هیئت علمی گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس)، عمار صالحی (دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران)، محمدرسلول شعبانی شادانی (دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران)، محمد شادمانی (دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران)، محمد حسین‌پور (دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران)، پیام آموزگاری (دانشجوی دکتری آبخیزداری، احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران)

طراح جلد: عمار صالحی

صفحه آرایی: پریناز تقی‌پور

ویراستاران علمی و ادبی: میثم امامیان، پوریا شجاعی رنجبر، عمار صالحی، محمد قوشچیان

بر اساس مجوز شماره ۷۴۰۲۸۴۱ تاریخ ۲۰/۱۲/۱۳۹۸ با اعطای امتیاز نشریه حرفه‌ای به نشریه «صنعت سبز نوین» از سوی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران موافقت شد. بر این اساس، «نشریه صنعت سبز نوین» یک نشریه علمی-ترویجی یک امتیازی محسوب می‌شود.

این نشریه با حمایت بنیاد علمی آموزشی قلم‌چی منتشر شده است.



sanat.sabz.pub@gmail.com



http://sanatsabzs.ju.ut.ac.ir



09037025739



کانال تلگرام ایتا و سروش



@SanatSabz\_UT



پیج اینستاگرام

instagram.com/SanatSabz\_UT



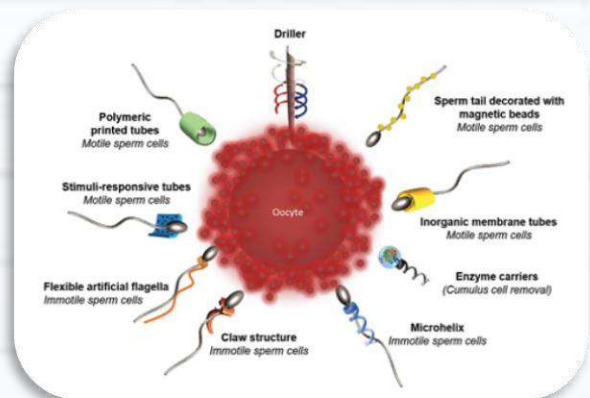


مختصری درباره استاد  
دکتر علی محمد برقی

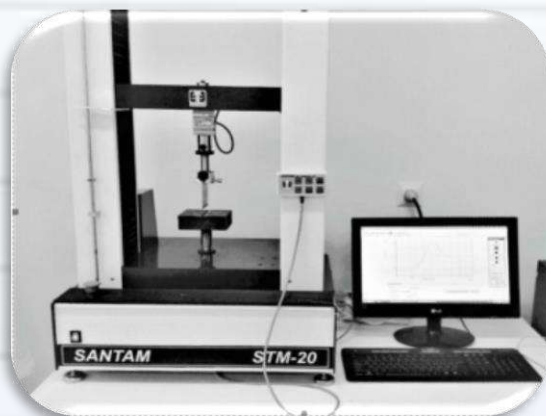
۶

اسپرم ربات‌ها، دریچه‌ای نوین به بیوسستم و رباتیک در ابعاد کوچک

۱۶



بررسی تاثیر زاویه تیغه، تعداد و چیدمان ساقه‌ها  
بر خواص برشی ساقه جعفري

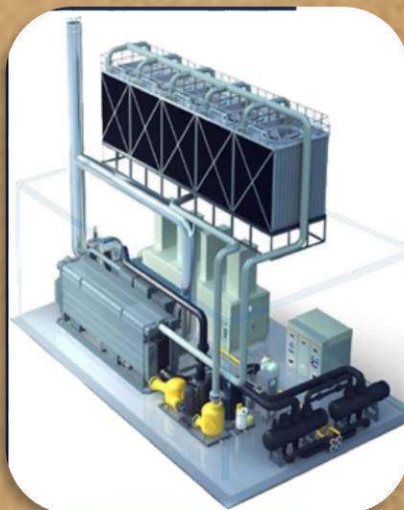


۲۸

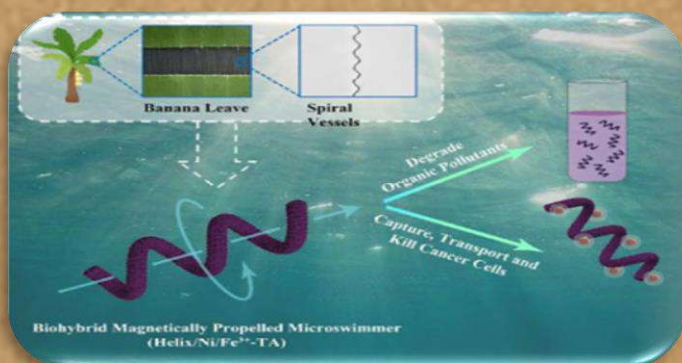


معرفی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، گرما  
و سرما با محرکه پیل سوختی در صنایع برودتی  
محصولات کشاورزی

۳۶



۵۰



درک پیچیدگی هم بست آب- انرژی- غذا  
در مسیر توسعه پایدار



۶۰

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

امام علی (علیه السلام) فرمودند:

الْعِلْمُ سُلْطَانٌ، مَنْ وَجَدَهُ صَالِحًا بِهِ، وَمَنْ لَمْ يَجِدْهُ  
صِلَ عَلَيْهِ

علم، اقتدار و قدرت است، هر کس آن را  
بیابد، به وسیله آن غلبه پیدامی کند و هر کس آن  
را نیابد، بر او غلبه پیدامی کند.





## سخن آغازین

گزیده‌ای از بیانات مقام معظم رهبری در دیدار جمعی از نخبگان علمی کشور

رمز پیشرفت یک کشور، یعنی آن محور اصلی برای اقتدار یک کشور، پیشرفت همراه با اقتدار، علم است. آماج بسیاری از توطئه‌های امروزی که علیه جمهوری اسلامی هست، علم و اهل علم و دانشجویان علم و محیط علمی است؛ این را توجه داشته باشید. نگذارید این تیر طبق آن هدفگیری دشمن، به هدفی که آنها گرفته‌اند، اصابت کند. کار علمی را نگذارید متوقف بشود. از همه‌ی این حرف‌هایی که گفته شد، مهم‌تر، مسئله‌ی علم و تحقیق و پژوهش است. دنیای غرب ثروتش از ناحیه‌ی علم است، اقتدارش از ناحیه‌ی علم است، زورگوئی‌ای که امروز می‌کند، به خاطر علمی است که دارد. **پول فی نفسه اقتدار نمی‌آورد. آنی که اقتدار می‌آورد، دانش است.** امروز اگر آمریکا پیشرفتگی علمی خودش را نمی‌داشت، نمی‌توانست در دنیا اینجور زورگوئی بکند و در همه‌ی مسائل عالم دخالت بکند. **ثروت هم اگر به دست می‌آید، از ناحیه‌ی علم به دست می‌آید.** علم را اهمیت بدهید. این که من سال‌هاست روی مسئله‌ی علم، تحقیق، پژوهش، پیشرفت، نوآوری، شکستن مرزهای علمی موجود تکیه می‌کنم، به خاطر این است. **بدون انواع دانش، اقتدار کشور امکانپذیر نیست. دانش اقتدار می‌آورد.**

گیرم نطنز را بمباران کردند، کارخانه‌ی اصفهان را بمباران کردند، علم را چه جوری بمباران می‌کنند؟ علم را که نمی‌شود بمباران کرد. ببینید، **علم مصونیت می‌آورد، اقتدار می‌آورد.** مراقب باشید در دانشگاه شما، در کلاس شما، در مرکز تحقیقات شما، در کار پژوهشی شما، اختلال ایجاد نکنند. اگر دیدید دستی دارد اختلال ایجاد می‌کند، به آن دست بدبین بشوید. اقتدار شما را، آینده‌ی شما را هدف گرفته‌اند.

حالا من با شما جوان‌ها به‌خصوص، خیلی حرف دارم. یکی از کارها همین است؛ کسانی بیایند طعم نیاز بازارهای غربی را، مثلاً فرض کنید به تابلو نقاشی، به دست بیاورند، بعد بیایند اینجا، پشتیبانی مالی کنند و نقاش ما را به سمت تأمین آن نیاز سوق بدهند. عین همین قضیه در کار علمی ماست؛ **در مقاله‌ای است که در آی.اس.آی منتشر می‌شود؛ در موضوع تحقیقی است که شما در پژوهشگاه خودتان دنبال می‌کنید.** به تعبیر متأسفانه رائج فرنگی امروز، اسپانسرها می‌آیند در بخش‌های مختلف، کمک‌های مالی، کمک‌های مادی، اعانه‌ها را می‌گذارند برای اینکه در آن جهت کار انجام بگیرد. به این توجه کنید. **استقلال علمی کشور یکی از لوازمش همین است: استقلال حرکت علمی، حرکت هنری و به طریق اولی، حرکت سیاسی.** بعضی از حرکات سیاسی هم از این قبیل است.



مختصری درباره استاد  
دکتر علی محمد برقی

استاد پیشکسوت گروه ماشین های  
کشاورزی دانشگاه تهران



دکتر علی محمد برقی، یکی از تأثیرگذارترین اساتید رشته ماشین‌های کشاورزی در ایران بودند که خدمات ارزنده‌ای در راستای تنظیم برنامه‌ریزی و حتی انتخاب نام رشته مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی داشتند.

ایشان در سال ۱۳۱۷ در قم دیده به جهان گشودند. خانواده استاد سید علی محمد برقی از سادات رضوی و پدر ایشان از فرهنگیان معروف قم بودند و اکثر افراد و بستگان نزدیک او روحانی و صاحب تالیفات و آثار فراوان بوده‌اند.

### تحصیلات

دکتر برقی تحصیلات ابتدایی را در دبستان سنایی قم و تحصیلات متوسطه را در دبیرستان حکیم نظامی قم به پایان رساندند و در سال ۱۳۳۶ وارد دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران شدند و در سال ۱۳۴۰ با رتبه ممتاز

مدرک کارشناسی ارشد را در رشته ماشین‌های کشاورزی کسب کردند و در سال ۱۳۴۱ عازم فرانسه شدند و تحصیلات تخصصی خود را در انستیتوی هانری پرانکاره دانشگاه سوربن پاریس ادامه دادند و در سال ۱۳۴۶ موفق به اخذ دکتری رشته مهندسی ماشین‌های کشاورزی از دانشگاه سوربن فرانسه گردیدند. پس از آن تحصیلات فوق دکتری خود را در مرکز تحقیقات و آزمایش‌های ماشین‌های کشاورزی آنتونی فرانسه ادامه دادند پس از اتمام تحصیلات در فرانسه، به ایران بازگشتند و به عنوان هیئت علمی در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی در دانشگاه تهران استخدام شدند. درجات علمی استادیاری را در سال ۱۳۴۷ و دانشیاری را در ۱۳۵۳ طی کردند



مدرک دکتری دکتر علی محمد برقی از دانشگاه سوربن فرانسه

استاندارد در زمینه تراکتور و ماشین‌های کشاورزی و نیز بیش از ۳۰ مقاله به زبان فارسی و بیش از ۵۰ مقاله به زبان‌های انگلیسی و فرانسوی و تعدادی ثبت اختراع در زمینه ماشین‌های کشاورزی می‌باشد. بعضی از این آثار به صورت خلاصه عبارتند از

الف- تألیفات

ب- ترجمه‌ها

ج- ویراستار علمی

د- ثبت اختراع

## سابقه شغلی

در سابقه شغلی دکتر برقی، مدیریت گروه ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، عضویت در فرهنگستان علوم ایران و رئیس شاخه ماشین‌های کشاورزی فرهنگستان علوم، عضویت در شورای مکانیزاسیون کشاورزی وزارت کشاورزی، عضویت در کمیته هیئت داوران جشواره خوارزمی، عضویت در شورای علمی کشاورزی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، عضویت در شورای پژوهش‌های علمی وزارت علوم، عضویت در کمیسیون تدوین استانداردهای ماشین‌های کشاورزی موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی، عضویت در کمیته هیئت داوران کتاب‌های درسی رشته ماشین‌های کشاورزی مرکز نشر دانشگاهی و عضویت در کمیته تخصصی برنامه‌ریزی و تالیف کتاب‌های درسی رشته کشاورزی وزارت آموزش و پرورش به چشم می‌خورد

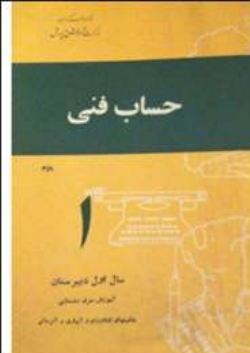
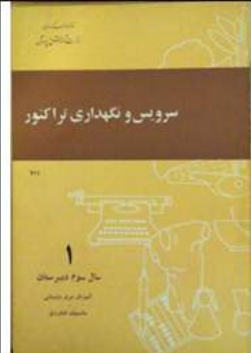
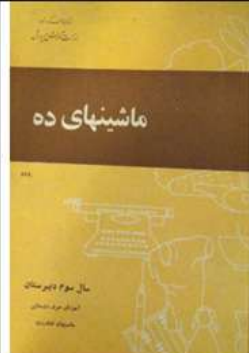
## آثار علمی

از استاد سید علی محمد تألیفات گرانبهای زیادی به یادگار مانده است. آثار علمی ایشان شامل ۵ کتاب دانشگاهی، ۱۲ کتاب هنرستان‌های فنی و حرفه‌ای و بیش از ۲۰۰ جزوه تدوین شده





## الف - تألیفات:

|                                                                                              |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |   |   |                                                    |
| درجه بندی، بسته بندی و نگهداری محصولات کشاورزی<br>سازمان آموزش وزارت کشاورزی و عمران روستایی | ماشینهای کشاورزی<br>سازمان آموزش وزارت کشاورزی و عمران روستایی                     | مکانیک موتور<br>شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران                                   | اجزای ماشین<br>شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران                                                                                      |
|            |  |  |                                                   |
| حساب فنی<br>سال اول سازمان کتابهای درسی ایران                                                | سرویس و نگهداری تراکتور<br>سال سوم سازمان کتابهای درسی ایران                       | ماشینهای ده<br>سال سوم سازمان کتابهای درسی ایران                                    | محاسبات فنی تخصصی<br>رشته ماشینهای کشاورزی<br>گروه تحصیلی کشاورزی<br>زمینه کشاورزی<br>فصل اول آموزش فنی و حرفه‌ای<br>شماره ۱، درس ۲۸۲ |
| حساب فنی<br>سال اول سازمان کتابهای درسی ایران                                                | سرویس و نگهداری تراکتور<br>سال سوم سازمان کتابهای درسی ایران                       | ماشینهای ده<br>سال سوم سازمان کتابهای درسی ایران                                    | محاسبات فنی تخصصی<br>نظام جدید آموزش متوسطه، وزارت آموزش و پرورش                                                                      |

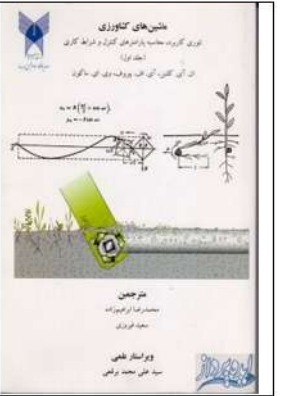
|                                                                                     |                                                                                                                           |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |                                        |  |
| تأسیسات و تجهیزات پرورش طیور<br>نظام جدید آموزش متوسطه                              | فرهنگ نوین کشاورزی و منابع طبیعی، جلد نهم، ماشینهای کشاورزی<br>گروه علوم کشاورزی و فرهنگستان علوم، انتشارات دانشگاه تهران | ماشینهای کشاورزی<br>سال سوم سازمان کتابهای درسی ایران                                |

کتاب برنامه ی پنج ساله توسعه کشاورزی ( کتاب هشتم مکانیزاسیون کشاورزی) سال ۶۶-۱۳۶۲  
وزارت جهاد کشاورزی

## ب- ترجمه‌ها:

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| ماشین‌ها و تاسیسات ثابت<br>واحد زراعی<br>انتشارات دانشگاه تهران                   | اجزای ماشین، جلد دوم<br>انتشارات دانشگاه تهران                                    | اجزاء ماشین، جلد اول<br>موسسه چاپ و انتشارات<br>دانشگاه تهران                      |

## ج- ویراستار علمی:

|                                                                                                                              |                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            |                                           |
| ماشین‌های کشاورزی:<br>تئوری کاربردی، محاسبات<br>پارامترهای کنترلی و<br>شرایط کاربردی-جلد دوم<br>انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی | ماشین‌های کشاورزی:<br>تئوری کاربردی، محاسبات<br>پارامترهای کنترلی و<br>شرایط کاربردی-جلد اول<br>انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی |

## د- ثبت اختراع:

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                                                    |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |                                |  |
| طراحی مکانیزم و سیستم<br>اندازه گیری عمق گاوآهن‌ها -<br>عمق سنج تراکتوری            | طراحی سامانه مکانیکی<br>تنظیم خودکار فشار باد تایر<br>خودرو                         | طراحی و ساخت دستگاه خود<br>تنظیم نبودکننده آفات انباری<br>با استفاده از امواج ماکروویو و<br>اختلاف ثابت دی الکتریک | دستگاه تشخیص درجه سبب<br>از لحاظ رنگ و اندازه با<br>استفاده از تکنیک منطق فازی        |



## دکتر علی محمد برقی از زبان خودشان

من علی محمد برقی هستم. در ۲۴ مهرماه ۱۳۱۷ در قم و در یک خانواده فرهنگی به دنیا آمدم. پدرم معلم و مادرم نیز فرهنگی بود. نسب ما به موسی مُبرِّق فرزند امام محمد تقی (امام نهم) می‌رسد. آرامگاه موسی مبرق در محله چهل‌اختران قم است. من در دوران قبل از دبستان به مکتب‌خانه می‌رفتم. در مکتب‌خانه، قرآن و مسائل دینی و الفبا و چیزهای مختلفی به ما یاد می‌دادند. البته مقررات سختی داشت و مجبور بودیم این مقررات را تحمل کنیم. در سال ۱۳۲۴ وارد دبستان سنائی شدم. اما پیش از دبستان و در سال پایانی مکتب‌خانه، مادرم فوت کرد و روحیه خیلی خوبی نداشتم. در سال اول دبستان به خاطر مشکلاتی که در اثر ضایعه فوت مادرم به وجود آمده بود وضعیت نامناسبی از نظر روحی داشتم و دوران بدی را گذراندم. ولی از سال دوم روی قلتک افتادم و با نمرات خیلی خوبی شروع به کار کردم. از ویژگی‌های دوران دبستان این بود که به دلیل داشتن نمرات بسیار خوب، در ایام تابستان برای شاگردهایی که ضعیف تر بودند به تدریس خصوصی می‌پرداختم و از این راه، هم علم خودم را تقویت میکردم و هم درآمدی به وجود می‌آوردم. در سال ۱۳۳۰ وارد دبیرستان حکمی نظامی قم شدم و تا سال ۱۳۳۶ که دیپلم گرفتم در این دبیرستان بودم. در این دوران هم به خاطر اینکه نمرات بالایی داشتم و جزو شاگردان ممتاز بودم در تابستان‌ها تدریس خصوصی انجام می‌دادم. از ویژگی‌های دوران دبیرستان حضور معلمین بسیار خوبی بود. که روحیه دانش‌آموزان را برای درس خواندن و فراگرفتن علم تقویت

می‌کرد و به آن‌ها یاد می‌دادند که در آینده بتوانند چه رشته و شغلی را انتخاب کنند. از آن‌جا که این معلمان، معلم‌های بسیار خوبی بودند، الگوی من شدند و من از همان‌جا تصمیم گرفتم که در آینده شغل معلمی را برگزینم. به همین خاطر تصمیم گرفتم که در کنکور شرکت کرده و وارد دانشگاه شوم و عضو هیئت علمی شوم تا شغل معلمی را بتوانم ادامه دهم.

## دکتر علی محمد برقی از زبان همکاران و اساتید

### دکتر حسین مبلی

عضو هیئت علمی گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

بنده از مرحوم دکتر برقی خاطرات زیادی دارم که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌کنم. من از سال ۱۳۶۱ با آقای دکتر برقی آشنا شدم. در سال ۱۳۶۵ توسط آقای دکتر توکلی برای استخدام به گروه ماشین‌های کشاورزی معرفی شدم. در آن زمان آقای دکتر برقی با رویی گشاده استخدام مرا پذیرفتند. اما نکته‌ی مهم برای من که (دارای مدرک) کارشناسی ارشد بودم این بود که این استاد بزرگوار برای استخدام بنده شخصاً نامه‌های (مربوطه) را می‌گرفتند و پیگیری می‌کردند. هنگامی که استخدام بنده در گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران انجام شد من از پیگیری‌های ایشان واقعا شرمند بودم پس از استخدام، ایشان فرمودند اگر شما بخواهید ترفیع سالیانه داشته باشید حتما باید مشاور دانشجویان کارشناسی ارشد باشید وگرنه ترفیع شما به مشکل برخورد خورد. لذا تنها کسی که حاضر شد مرا (برای پایان‌نامه‌های دانشجویی به عنوان) مشاور بگذارند



## دکتر سید احمد طباطبائی فر

استاد بازنشسته گروه ماشین های کشاورزی  
دانشگاه تهران

خاطرات بسیار خوب و دوران خیلی عالی با دکتر برقی داشتیم و من بیشتر افتخار داشتم که با ایشان دوستی و همراهی داشته باشیم. اولین باری که من به گروه آمدم در سال ۱۳۶۳ دکتر شفیع مدیرگروه وقت بودند و به من گفتند که ما تنها یک نفر استاد در ایران داریم. در حالی که درباره آن یک نفر استاد صحبت می کردیم که آقای دکتر علی محمد برقی با آن وجود مهربان شان وارد اتاق دکتر شدند و من عرض ادب کردم و معرفی شدم و خدا را شکر استقبال گرم و صمیمی ایشان از همان لحظات اول همراه من بود. بعدها که یک روز برای امتحان استخدامی مراجعه کردیم، در جلسه امتحان نیز ایشان حضور داشتند و از من سوالی پرسیدند و من واقعا از وجود ایشان لذت بردم. این لحظات هیچ گاه از خاطرم نمی روند چون آقای دکتر برقی با عشق، محبت، انسانیت فوق العاده و مهربانی خاصی با آدم ها برخورد می کردند. ما یک سفر خارجی و چند سفر داخلی با هم رفتیم. در یک کنفرانسی که چندین استاد دیگر هم حضور داشتند ایشان فوق العاده با هیجان، با احساس و خیلی صمیمی با ما برخورد کردند. ایشان به همراه انسان های خوبی مثل آقای دکتر مبلی، آقای دکتر شفیع و دکتر احسانی برای ساختن ساختمان جدید گروه زحمات زیادی کشیدند مثل پیگیری و رفت و آمدهای بسیار زیاد به تهران که آن موقع سخت تر هم بود. فقط یک جمله بگویم و آن هم این که دکتر برقی دوست داشتنی و مهربان بودند و نفس شان گیرا بود و از نظر پشتکار واقعا الگو بودند و از نظر تحمل مشکلات و بردباری و صبوری بی نظیر بودند.

خود ایشان بودند و این کار سبب شد بتوانم ترفیع های سالیانه را اخذ نمایم. برای ساختمان جدید گروه خاطرم هست که چقدر و با چه تلاش و پشتکاری پیگیری می کردند. مکان یابی ساختمان جدید در زمان مدیریت آقای دکتر شفیع انجام شد اما پیگیری ساخت و تأمین بودجه آن توسط آقای دکتر برقی و در زمان مدیریت ایشان انجام شد. ایشان بنده را به عنوان معاون (گروه) انتخاب کردند و خاطرم هست که ایشان پنجشنبه های شان را با من برای پیگیری کار در امور ساختمان های دانشگاه تهران و برنامه و بودجه تعیین کرده بودند. ما پنجشنبه ها با کارشناسان مربوطه تماس می گرفتیم و بنده شاهد بودم که با چه تلاش و پشتکاری بودجه ساختمانی تصویب کردند. ایشان عضو شورای عالی برنامه ریزی بودند و من هم از طرف جهاد دانشگاهی عضو آن شورا بودم. آقای دکتر شفیع و آقای دکتر توکلی هم حضور داشتند. در مورد برنامه ریزی رشته ماشین های کشاورزی، خاطرم هست که ایشان با چه اصرار و تلاشی مسائل و مطالب گروه ماشین های کشاورزی را پیگیری می کردند. ایشان آنقدر صحبت و استدلال می کردند تا افرادی نظیر دکتر شریفی تهرانی و دکتر یزدی صمدی مجاب شوند و مسائل منطقی گروه ماشین های کشاورزی تصویب شود. هم چنین به خاطر دارم که ایشان برای آنکه رشته ما اسم مکانیک را داشته باشد چه تلاشی انجام دادند و در کنار آقای دکتر توکلی چه اصراری کردند و چگونه با تلاش و کوشش این اسم مکانیک را بر سر رشته ماشین های کشاورزی مصوب کردند. در مجموع، بنده این صفات را برای آقای دکتر برقی واضح می بینم؛ ایشان بسیار خوشرو، مودب، مهربان، با گذشت، مردم دوست و خیر خواه بودند.



گل بود، گل زیست و حیف شد که از میان ما رفت. روحش شاد

## دکتر عباس شریفی تهرانی

عضو شورای علمی فرهنگستان علوم و استاد بازنشسته  
دانشگاه تهران

آشنایی بنده با آقای دکتر برقی در زمان دانشجویی ما در سال ۱۳۳۷ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران آغاز شد. ایشان پس از اتمام تحصیلات، با بورس شاگرد اولی عازم فرانسه شد. البته من هم یکسال بعد از او به فرانسه رفتم و ملاقات ما در خانه‌ی آقای دکتر تیمور توکلی بود.

دکتر برقی پس از اتمام تحصیلات، به وطن بازگشت و در دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران در گروه ماشین‌های کشاورزی به عنوان استادیار مشغول به کار شد. مدارج دانشگاهی و استادی را طی کرد و در سال ۱۳۶۲ استاد تمام شدند. در سال ۱۳۷۰ با آغاز به کار فرهنگستان علوم ایشان نیز علاوه بر استادی دانشگاه در فرهنگستان علوم به عنوان عضو وابسته و رئیس شاخه ماشین‌های کشاورزی مشغول به فعالیت‌های علمی شود. فعالیت‌های علمی دکتر برقی در فرهنگستان علوم در طی این ۳۰ سال و به عنوان رئیس شاخه ماشین‌های کشاورزی بسیار ارزنده بود. ایشان در اجرای ۱۲ طرح کلان گروه همکاری داشتند و علاوه بر آن طرح «بررسی شاخص‌های بنیادی توسعه مکانیزاسیون کشاورزی موجود و ارائه گزینه‌های مناسب» را با همکاری آقایان دکتر الماسی و دکتر توکلی اجرا کردند. انتشارات ایشان در فرهنگستان نیز چشمگیر بود. ایشان در انتشار فرهنگ‌های کشاورزی و منابع طبیعی همکاری داشتند و جلد نهم این فرهنگ‌ها با عنوان ماشین‌های کشاورزی در سال ۱۳۷۹

شامل ۱۲۴۰ واژه علمی به چاپ رسید و در سال ۱۳۸۹ نیز فرهنگ‌نویین ماشین‌های کشاورزی را با ۵۶۰۰ واژه علمی با همکاری آقایان دکتر الماسی و دکتر توکلی منتشر کردند که توسط فرهنگستان منتشر شد و کل مجموعه این فرهنگ‌ها به عنوان کتاب سال شناخته شد. آخرین فعالیت علمی ایشان در فرهنگستان، شرکت در طرح بررسی فناوری‌های نوین بوم‌سازگار کشاورزی و منابع طبیعی بود که شاخه مکانیک ماشین‌های کشاورزی را ایشان به عهده داشتند

## دکتر علی‌رضا کیهانی

استاد بازنشسته گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه  
تهران

من افتخار شاگردی ایشان را در سال ۱۳۶۲ و افتخار همکاری با ایشان را در ۱۳۷۶ داشتم و در این مدت مطالب بسیاری را از ایشان فرا گرفتم. شاید سایر همکاران بدانند، من همیشه موقع جذب اساتید بر روی قاعده ۷۰ درصد-۳۰ درصد تأکید داشته‌ام و می‌گفتم که ما باید ۷۰ درصد به شخصیت و اخلاق افراد توجه کنیم و ۳۰ درصد به پرونده علمی او؛ چرا که شخصیت افراد فرم گرفته است و وقتی وارد گروه می‌شوند این که چگونه با سایر همکاران تعامل داشته باشند چیزی است که از پیش تعیین شده است اما پرونده علمی را می‌توانند ارتقا دهند من باید اقرار کنم که این دیدگاه را از رفتار و منش جناب آقای دکتر برقی وام گرفته بودم چرا که ایشان فرد با اخلاق و با شخصیت و بزرگوار و با گذشتی بودند که همیشه برای من این مسأله جالب بود و حتی با این که شاهد بعضی مواردی بودم که توهین‌هایی به ایشان می‌شد، اما ایشان بسیار بسیار بزرگوارانه (رفتار می‌کردند)





## دکتر مرتضی الماسی

عضو هیئت علمی دانشگاه تهران

ما بیش از ۳۵ سال همکار و همراه هم بودیم. در زمان مدیریت استاد برقی در گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران در کرج، در اواسط دهه ۱۳۶۰ و شروع آشنایی و همکاری من با ایشان، از نزدیک شاهد تلاش‌ها و پیگیری‌های مجدانه ایشان برای ساخت و ایجاد ساختمان و تجهیز گروه فعلی رشته ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون (که در آن زمان ساختمانی قدیمی و نسبتاً متروکه و مانده از دوران پیش نبود) در گروه، در دانشکده، در دانشگاه، در وزارت علوم و سازمان برنامه و بودجه بودم. استاد برقی در برنامه‌ریزی‌های کمیته تخصصی ستاد انقلاب فرهنگی برای رشته‌های مهندسی زراعی، مکانیک ماشین‌ها و مکانیزاسیون، در بازگشایی و شروع مجدد دوره‌ها پس از تعطیلی دانشگاه‌ها، در ایجاد دوره‌های جدید کارشناسی ارشد و دکتری مکانیزاسیون در دانشگاه تهران و واحد علوم و تحقیقات و همچنین در کمک به شروع آن‌ها در سایر دانشکده‌های کشور و در گروه کشاورزی فرهنگستان علوم بسیار پیگیر و در تلاش بودند.

از جمله فعالیت‌های ایشان در می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- همکاری در تالیف کتاب فرهنگ تخصصی واژگان رشته مکانیک ماشین‌ها و مکانیزاسیون اجرای چندین پروژه تحقیقاتی
- ۲- ارزیابی رساله‌ها و رشته‌ها و نشریات علمی
- ۳- عضویت در انجمن مهندسی ماشین‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی ایران
- ۴- هدایت و راهنمایی بسیاری از دانش‌آموخته و دانشجوی ارشد و دکتری در رشته‌های
- ۵- مکانیزاسیون و مکانیک ماشین‌های کشاورزی

و هرگز مقابله به مثل نمی‌کردند و عفت کلام را حفظ کرده و بسیار سریع هم فراموش می‌کردند و این برای من درس بزرگی بود که همواره با خودم این درس را در طول زندگی یادآوری می‌کردم و مورد استفاده قرار می‌دادم. در سال ۱۳۹۲ در دفتر کارم نشسته بودم و دکتر برقی وارد اتاق شدند و یک گزارش دستنویس را به من دادند و دیدم که یکی از پروژه‌های درسی بود که در سال ۱۳۶۲-۱۳۶۳ در یکی از کلاس‌ها تحویل داده بودم و ایشان این را به من برگرداندم و من هم با تعجب پرسیدم که دکتر شما این را ۳۰ سال است که نگه داشته‌اید. ایشان با بزرگواری فرمودند که من پروژه‌های دانشجویان خوبم را به عنوان یادگاری نگه می‌دارم و این افتخاری برای من بود که نزد استاد برقی به عنوان یک دانشجوی خوب محسوب می‌شدم. ایشان هرچند که از لحاظ فیزیکی از جمع ما رفته‌اند اما یاد و خاطره‌شان برای ما همیشه زنده است و امیدوار هستم که راه ایشان هم پر رهرو باشد.



استاد برقی بسیار شکیبا و خستگی‌ناپذیر، پیشرو، بردبار بودند و در تحمل ناملایمتی‌ها و گلایه‌ها و نامهربانی‌های معدودی از افراد چه بسیار زبانزد بودند. این‌ها تنها اشاره‌ای بود به خصلت‌های ارزنده و گوشه‌ای از خدمات علمی، فرهنگی و آموزشی و پژوهشی آن بزرگوار بودند. مطمئناً استاد با توجه به بیش از ۶۰ سال خدمت علمی فرهنگی در بخش‌های دیگری نیز فعال و مثمر ثمر بودند.



## دکتر سید علی محمد برقی

• با نهایت تأسف و تأثر درگذشت استاد برجسته مکانیک ماشین‌های کشاورزی و بیوسیستم و استاد پیشکسوت گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و رئیس پیشین شاخه ماشین‌های کشاورزی فرهنگستان علوم جناب آقای دکتر سید علی محمد برقی گرانقدر را به جامعه علمی کشور و خانواده محترم ایشان تسلیت عرض می‌کنیم.

• به صورت زنده در بستر ادوپی کانکت: //

vroom.ut.ac.ir/aet9

و صفحه مجازی انجمن علمی در آپارات: //

Aparat.com/Saame\_ut

• برگزار کنندگان: //

انجمن علمی دانشجویی گروه مهندسی

ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران

گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی

دانشگاه تهران



با همکاری روابط عمومی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی و حوزه ریاست دانشگاه تهران

• مراسم یادبود مرحوم

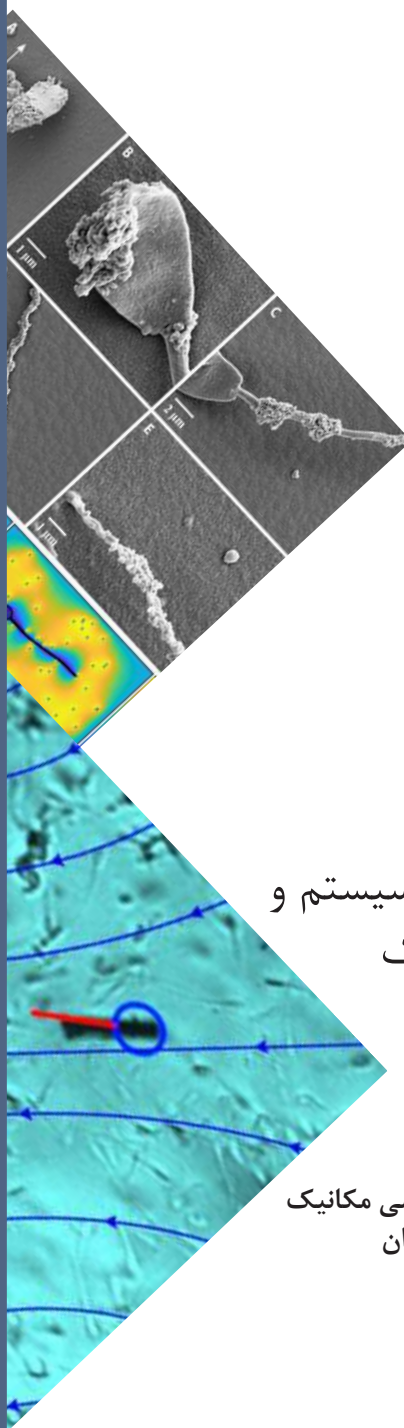
دکتر سید علی محمد برقی

در فضایی مجازی

• زمان: روز پنجشنبه

۱۴ مردادماه ۱۴۰۰، ساعت ۱۷





## اسپر مربات‌ها

دریچه‌ای نوین به بیوسیستم و  
رباتیک در ابعاد کوچک

عمار صالحی



دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک  
بیوسیستم، دانشگاه تهران





## مقدمه

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 نظیر 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 بی شمار 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 همه کاره در میکرواورگانیسیم‌هایی نظیر باکتری‌ها، ریزجلبک‌ها، اسپرم‌ها و غیره وجود دارد. پژوهشگران با الهام از طبیعت، میکرواورگانیسیم‌های بیولوژیکی هم‌چون باکتری‌ها، اسپرم‌ها و جلبک‌ها را با میکروروبات‌های مصنوعی 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

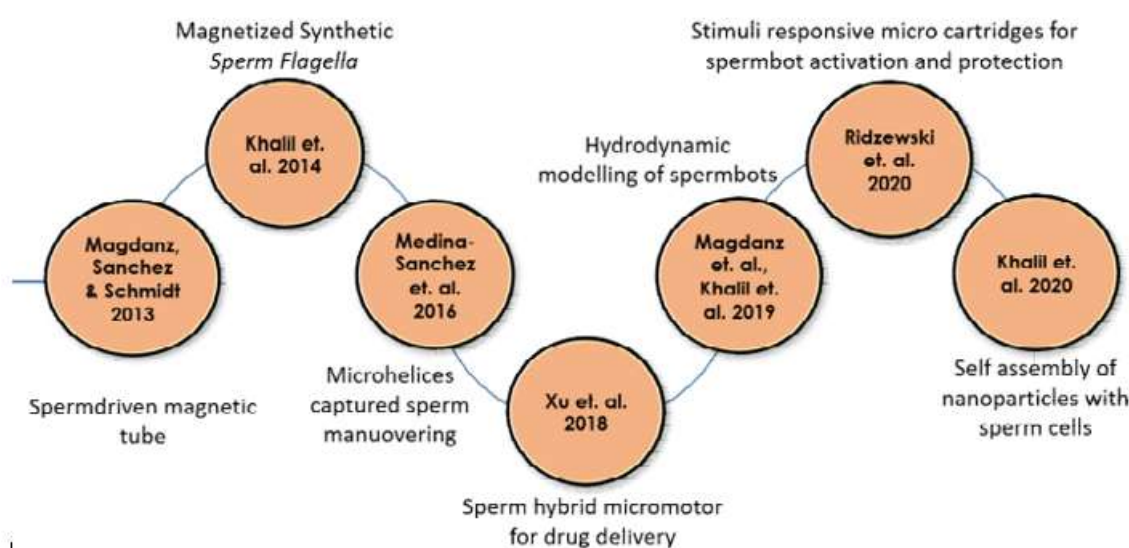
اسپرم و میکروساختارهای مصنوعی است که در اندازه نانو و میکرو هم برای کمک به سلول‌های اسپرم برای اجرای وظیفه و عملکرد ذاتی‌شان در محیط فیزیولوژیک و هم برای استفاده از نیروی پیش‌رانش آن‌ها برای به حرکت در آوردن میکروروبات ساخته می‌شوند [۱]. این نوع میکروروبات که به اسپرم‌ربات شناخته می‌شوند برای اولین بار 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



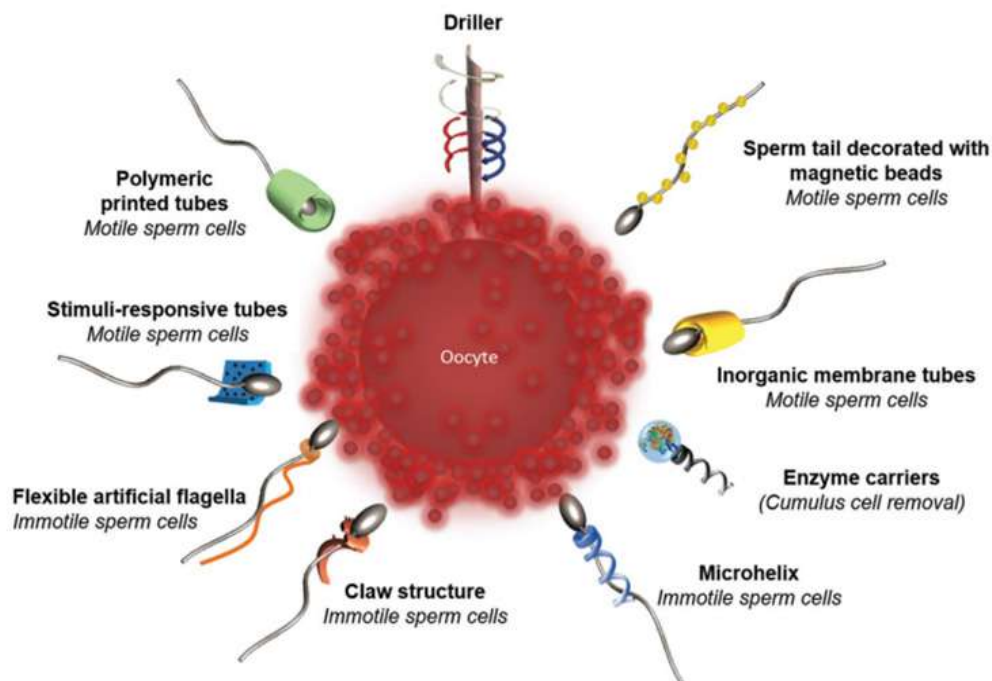
با جراحی‌های تهاجمی یا با شیمی‌درمانی درمان می‌شود. هر کدام مجموعه‌ای از عوارض جانبی و معایب خاص خود را دارند. از آنجایی که اسپرم از قبل برای شنا در این محیط سازگار شده است، آنها می‌توانند به عنوان حاملی برای تحویل هدفمند دارو عمل کنند. از اسپرم ربات‌ها

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 اسپرم ربات‌ها

- به صورت کلی سه رویکرد برای طراحی و توسعه اسپرم ربات‌ها وجود دارد [۴]
- 3- ربات مصنوعی با نیروی پیشران سلول اسپرم
- 1- ربات کاملاً مصنوعی
- 2- ربات با ذرات اکسید آهن روی سلول اسپرم
- برای این سه رویکرد، طراحی‌های مختلفی وجود دارد که برخی از آنها در شکل ۲ نمایش داده شده است [۵]



شکل ۲. انواع مختلف اسپرم ربات‌ها

## DLW یا Direct Laser Writing

سه بعدی و رسوب بخار فیزیکی (physical vapor deposition)

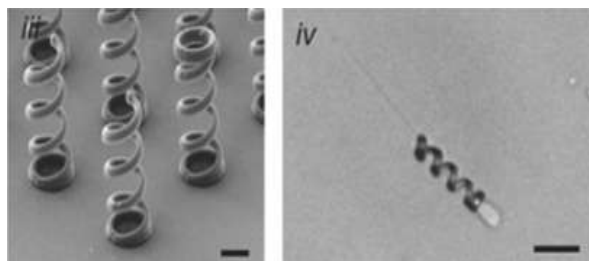
استفاده می‌شود که قابلیت طراحی و ساخت قطعات مارپیچی (هلیکال) با شکل دلخواه و نسبتاً ساده را فراهم می‌سازد. فرآیند ساخت این نوع میکروهلیکس در مقاله [۶] [توتوری و همکاران تشریح شده است]

## رویکرد اول: ربات کاملاً مصنوعی

این رویکرد زمانی کاربرد دارد که سلول‌های اسپرم بی‌حرکت هستند و یا آن‌قدر قوی نیستند که به سلول‌های تخمک برای باروری برسند. این رویکرد تاکنون با دو طراحی منحصر به فرد عرضه شده است: الف- میکروهلیکس‌های پلیمری و ب- اسپرم مغناطیسی (MagnetoSperm).

## الف: میکروهلیکس‌های پلیمری

میکروهلیکس‌های پلیمری با روکش فلزی که با استفاده از لیتوگرافی لیزری دو فوتون سه بعدی ساخته می‌شوند برای انتقال سلول‌های اسپرم بدون تغییر در قابلیت زیستی آن‌ها مناسب هستند (شکل ۳). به این منظور از تکنیک



شکل ۳. میکروهلیکس‌های پلیمری



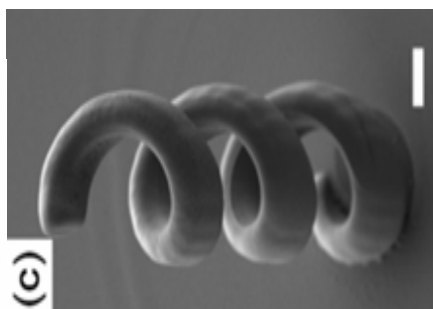
زمانی که یک پلیمر حساس به نور به عنوان پوشش روی یک لایه قرار گرفته و در معرض یک لیزر پالس با طول موج، مدت و شدت مناسب قرار می‌گیرد، به دلیل جذب دو فوتون، به صورت موضعی پیچ می‌خورد. زمانی که این فرآیند در فضای سه بعدی تکرار و از طریق یک رایانه کنترل می‌شود، می‌تواند منجر به تولید ساختارهای سه بعدی با 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 میکروهلیکس‌ها 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)

پس از آماده‌سازی، فرآیند کوپل کردن در این نوع اسپرم‌ربات‌ها به صورت دستی با استفاده از میدان مغناطیسی ناشی از مجموعه‌ای تغییر یافته از سیم‌پیچ‌های موسوم به هلمهولتز (Helmholtz coils) انجام می‌شود. میکروهلیکس‌ها 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 دوم



نوع اول

شکل ۴. انواع میکروهلیکس‌های پلیمری



کرده و به ساختار انعطاف پذیر اجازه می دهد 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 می شود. خلیل و همکاران در مقاله های زیر به توسعه این نوع ربات پرداخته اند: [۱۰] - [۱۲]

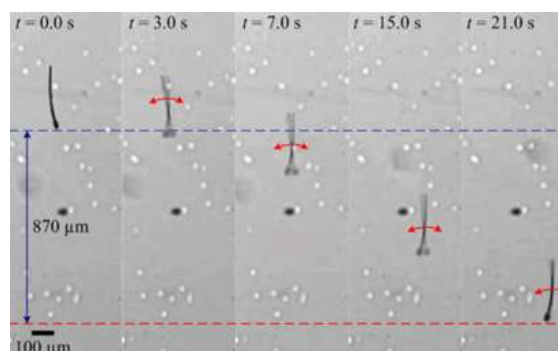
### رویکرد دوم: IRONSperm

این رویکرد نیز برای اسپرم های 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. سلول های اسپرم از طریق میدان های مغناطیسی صفحه ای یکنواخت در طول جهت حرکت با اجزاء متعامدی که به صورت سینوسی تغییر می کنند فعال سازی می شوند که به علت انعطاف محدود سلول ها منجر به سرعت های نسبتاً کم می شوند. سلول ها به صورت کامل به وسیله ذرات اکسید آهن ۱ میکرومتری پوشانده می شوند که منجر به دامنه خم شدن نسبتاً کوچکی در طول تاژک می شود. 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 المنت های مغناطیسی متفاوتی را در بعضی قسمت های اسپرم ایجاد کرد. یعنی از ذرات امتداد یافته در ابعاد نانو که کوچکتر هستند برای چسباندن روی بعضی از نقاط اسپرم گاو بر پایه توزیع بار الکتریکی آن استفاده می شود. روش ساخت این اسپرم ربات بر پایه بارهای الکتریکی سطحی متضاد در سلول های اسپرم گاو و نانوذرات مغناطیسی است تا میکروروبات را از طریق تعامل الکترواستاتیکی توسعه داد.

فرآیند کوپلینگ باید به گونه ای باشد که از صدمه زدن به سلول اسپرم و پاره کردن و نفوذ به آن و همچنین از گیر کردن سلول اسپرم در آن خودداری شود. تکنیک های مختلفی برای تصویربرداری و تعقیب اسپرم ربات معرفی شده است که از آن جمله می توان به فلورسانس نوری، تابش مادون قرمز، آنالیز اشعه ایکس، تشدید (رزونانس) مغناطیسی و تصویر برداری التراسونیک (سونوگرافی) اشاره کرد.

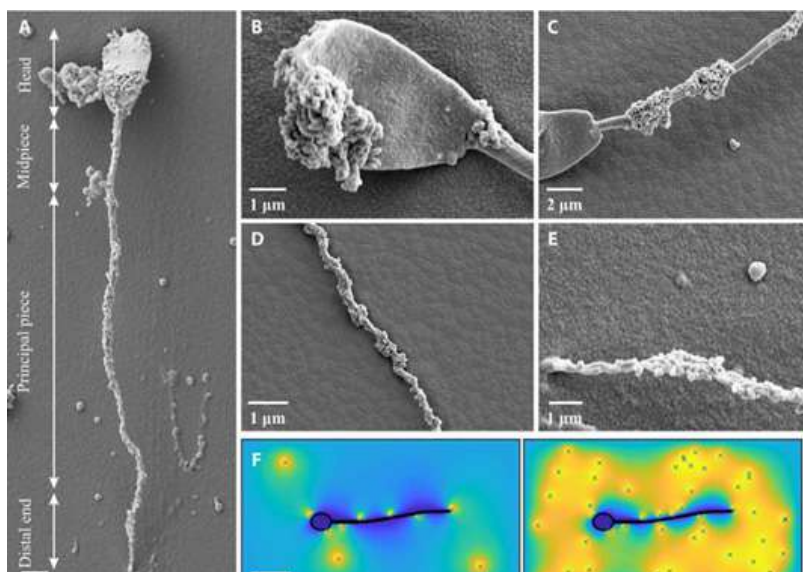
### ب: اسپرم مغناطیسی (MagnetoSperm)

در این حالت از کل سلول اسپرم (سر و دم) برای ایجاد نیروی محرکه تقلید شده است که از میدان های نوسانی صفحه ای مغناطیسی استفاده می کند و ظاهری شبیه [۹] به سلول اسپرم دارد (شکل ۵)



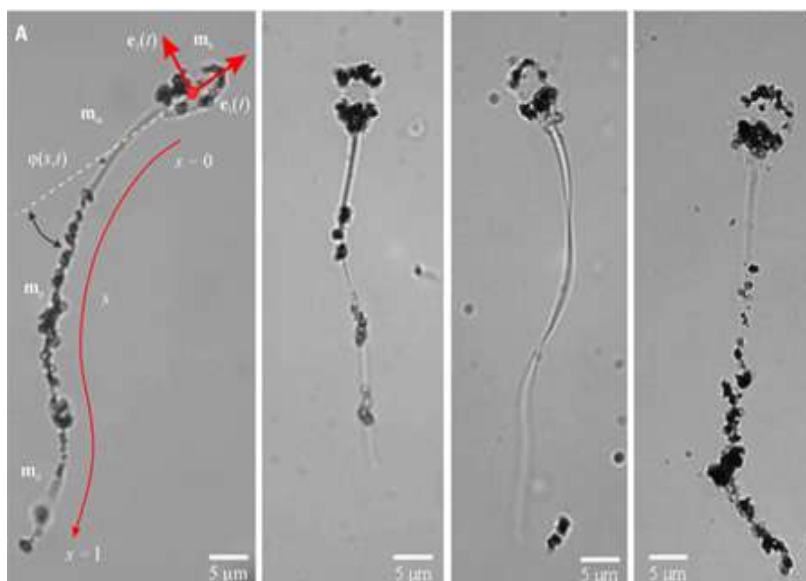
شکل ۵. اسپرم مغناطیسی

ساختار دم، گردن و سر این ربات با استفاده از فوتولیتوگرافی از پلیمر SU-8 ساخته می شود. این ربات دارای یک سر مغناطیسی و یک دم قابل انعطاف است سر مغناطیسی از یک لایه کبالت-نیکل ساخته می شود. 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 میکروربات 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)





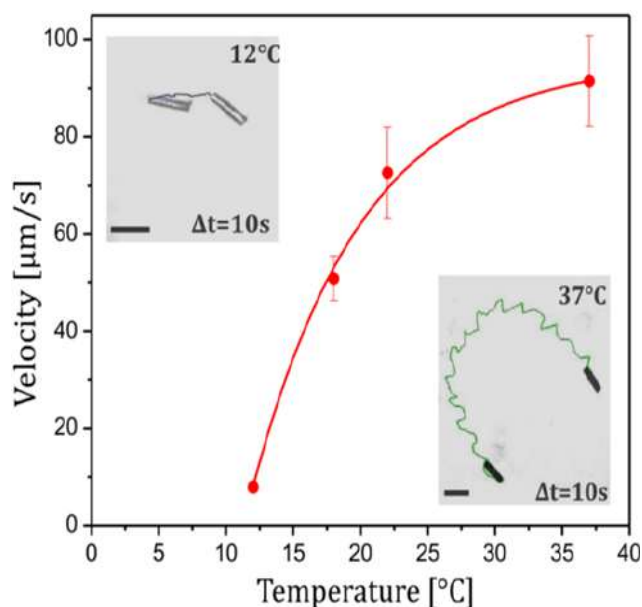
همه این IRONSperm ها از طریق قسمت هایی با پوشش نانوذرات و قسمت های بدون پوشش مشخص شده اند که انعطاف پذیری را در زمان مهیا کردن گشتاور مغناطیسی برای فعالسازی مغناطیسی و نیروی محرکه تاژکی کنترل شده، تضمین می کند. نیروی محرکه تاژکی مارپیچی در عددهای رینولدز پایین تحت اثر میدان های مغناطیسی یکنواخت با یک 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 های 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 دیوارهای 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 ها 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 چنانچه زیاد نیست. برای افزایش بازده، چسباننده های مولکولی 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 و 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)

ساخته 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

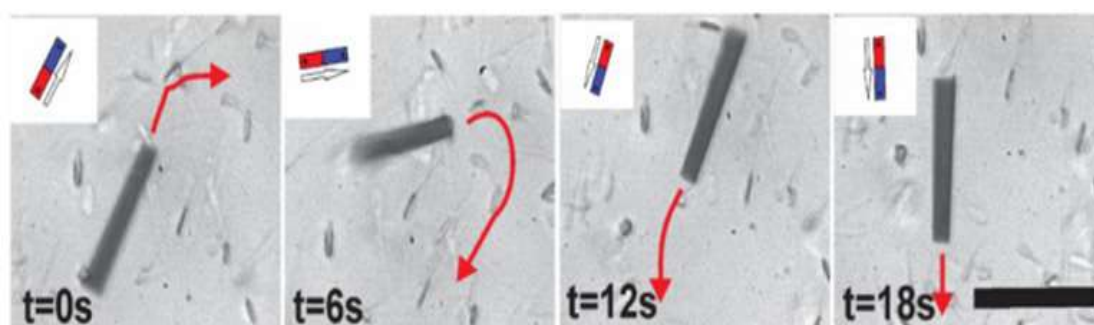
اسپرم‌ربات‌ها نسبت به تغییرات دما حساس هستند. سلول‌های اسپرم بدون توجه به اینکه آیا گرفته شده‌اند یا نه، در دماهای مختلف، فعالیت متابولیک متفاوتی را نشان می‌دهند که در نتیجه میزان تحرک آن‌ها تغییر می‌کند. برای بررسی اثر دما، نمونه‌ها را گرم و سرد ضبط می‌کنند. دما در محدوده ۴۰-۵ درجه سانتی‌گراد که محدوده 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

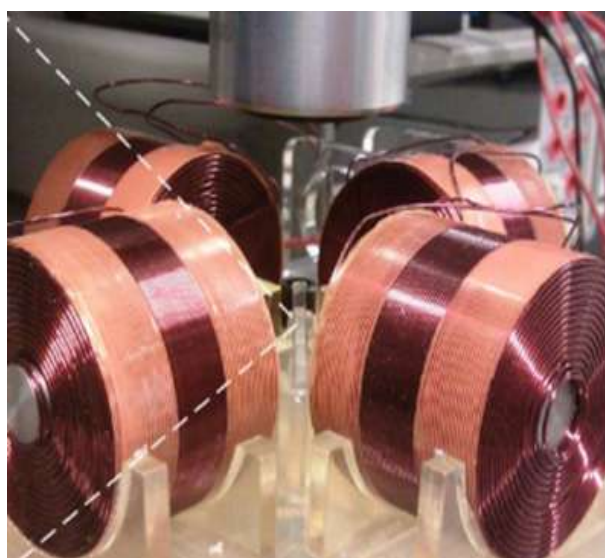
گردد (شکل ۹). در تمام این آزمایش‌ها، یک آهنربای نئودیمیوم با شدت میدان مغناطیسی ۵۴۰ میلی تسلا مورد استفاده قرار گرفته اند که در فاصله ۲ سانتی متری روی نمونه اعمال شده است که منجر به یک شدت میدان مغناطیسی ۲۲ میلی تسلا می‌شود. این شدت میدان برای تنظیم و هدایت میکروتیوب‌ها در طول خطوط میدان مغناطیسی خارجی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



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

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



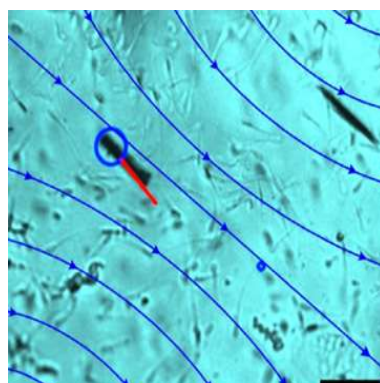
برای PNIPAM-(stimuli-responsive) ساخت یک ساختار دینامیکی برای آزادسازی سلول تک اسپرم به صورت کنترل از راه دور با تغییرات PNIPAM استفاده می‌شود. پلیمر کوچک دما متورم و جمع می‌شود و می‌تواند برای القای تغییرات ساختاری میکروساختارهای پلیمری مورد استفاده قرار گیرد.

در مبحث اسپرم‌ربات‌ها از مفهومی مشابه با میکرواجت‌های تیوبی محرک-پاسخگو استفاده می‌شود که باز و بسته می‌شوند و همچنین مطابق با آن سرعتشان نیز تغییر می‌کند. فیلم‌های پلیمری نازک لوله‌ای بر اساس مواد واکنشی-حرارتی پلی (Nisopropylacrylamide-co-acryloylbenzophenone-co-acrylic acid)

(PNIPAM - co - ABP - AAc )

و لایه‌های نازک تیتانیم و آهن به عنوان عناصر غیرفعال فرومغناطیسی برای گرفتن و آزادکردن سلول‌های 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 می‌شود. 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، می‌تواند دقیقتر 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.

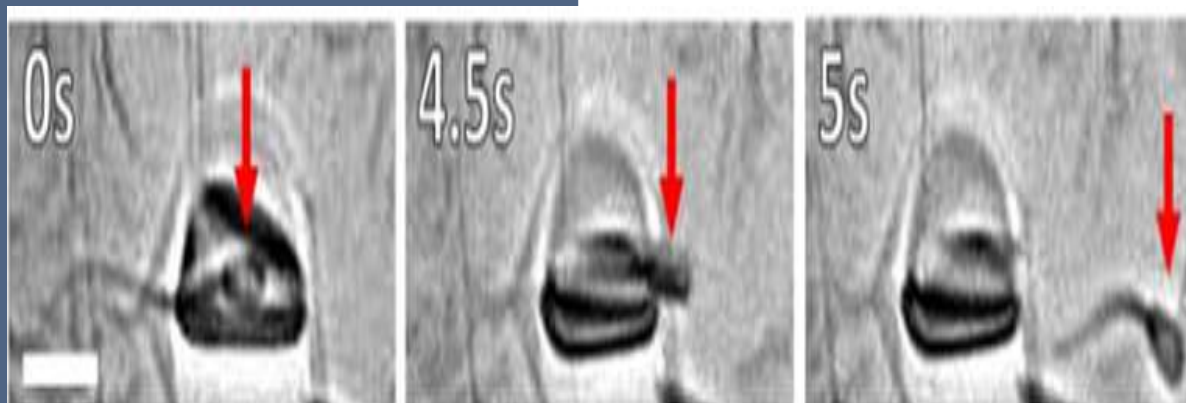


شکل ۱۱. نحوه کنترل اسپرم‌ربات با میدان مغناطیسی خارجی

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

اگرچه سلول‌های تک اسپرمی می‌تواند به وسیله میکروتیوب‌های فلزی 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

## نتیجه‌گیری

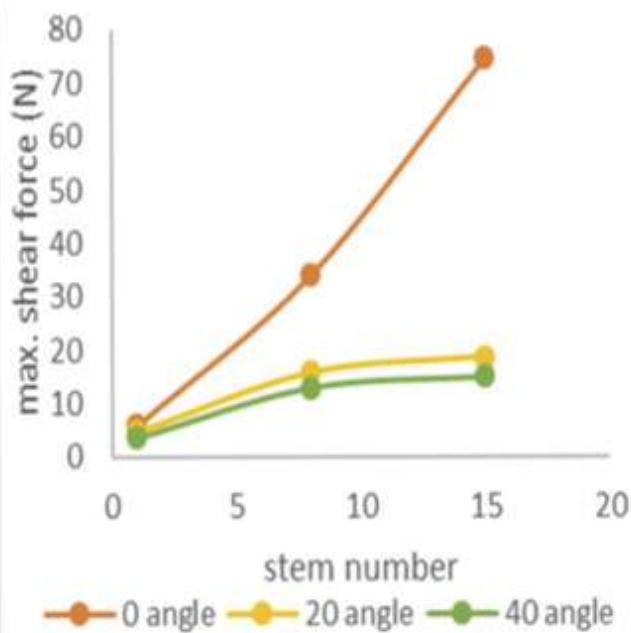
اسپرم‌ربات‌ها به عنوان نوعی از میکروربات‌های بیوهیبریدی زیست سازگار، نتایج امیدوارکننده‌ای در زمینه بارورسازی، درمان سرطان و فرآیند تحویل دارو از خود نشان می‌دهد. با این حال چالش‌های زیادی در این حوزه وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نداشتن نیروی پیشرانش و تحرک یکسان در سلول‌های اسپرم، نگرانی از صدمه دیدن سلول‌های اسپرم در زمان کوپل شدن با میکروتیوب‌ها یا میکروهلیکس‌ها، 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 جمعی اسپرم‌بات‌ها اشاره کرد. با این حال تا زمانی که پژوهشگران به درکی عمیق از تعامل اسپرم‌ربات‌ها با محیط پیرامون، بارهای مصنوعی و مواد بیولوژیکی 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.



## بررسی تاثیر زاویه تیغه، تعداد و چیدمان ساقه‌ها بر خواص برشی ساقه جعفری



محمد حسین پور<sup>۱</sup>

سعید مینایی<sup>۲</sup>

علیرضا مهدویان<sup>۳</sup>

محمد هادی خوش تقاضا<sup>۴</sup>

دانشجوی دکتری، گروه ماشین‌های  
کشاورزی، دانشگاه تهران<sup>۱</sup>

استاد، گروه مکانیک بیوسیستم،

دانشگاه تربیت مدرس<sup>۲</sup>

استادیار، گروه مکانیک

بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس<sup>۳</sup>

استاد، گروه مکانیک

بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس<sup>۴</sup>



ارتفاع بالا، میزان انرژی مصرفی نیز کاهش مییابد ولی اثر متقابل بین ارتفاع و رطوبت مشاهده نشد. (Azadbakht et al., 2015)

زاویه تیغه و صاف یا دندانه دار بودن آن بر میزان مقاومت برشی ساقه اثرگذار است. اسحاق بیگی و همکاران در سال ۲۰۰۹ در بررسی خواص برشی و خمشی ساقه گندم گزارش کردند که به ترتیب در زاویه صفر و ۱۵ و ۳۰ درجه، مقاومت برشی برابر ۹۲/۳، ۵۸/۳ و ۳۶/۳ مگاپاسکال میگردد و با استفاده از تیغه صاف میزان مقاومت برشی کمتر می شود (Esehaghbeygi et al. 2009).

مطالعه تاثیر زاویه تیغه و سرعت بارگزاری بر انرژی برشی مورد نیاز برای برش ساقه نشان داد که با افزایش سرعت *energycane* بارگزاری، میزان انرژی برشی افزایش مییابد با این حال به منظور داشتن ظرفیت مزرعه ای مناسب برای دستگاه های برداشت نمی توان سرعت حرکت تیغه را بیش از حد کاهش داد (Mathanker et al., 2015).

تحقیقی دیگر روی خواص برشی چند نوع علف مشخص کرد که مقدار مقاومت و انرژی برشی، مستقل از سرعت بارگزاری و زاویه کجی تیغه است (McRandal and McNulty, 1980).

گله دار و همکاران در سال ۲۰۰۸ در مطالعه خواص مکانیکی یونجه گزارش کردند که با کاهش رطوبت از برپایه، انرژی برشی و مقاومت برشی به ترتیب ۳ و ۲ برابر کمتر می شود (Galedar et al. 2008)

در رطوبت ۱۰٪ مقدار متوسط مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مدول یانگ، مقاومت پیچشی و مدول سختی بیشتر از رطوبت ۸۰٪ میباشد. برخی از پژوهشگران مقاومت خمشی آفتابگردان را به روش تیر یک سر درگیر به دست آوردند و گزارش کردند که با ویژه به تنش

سبزیجات از جمله محصولاتی هستند که به دلیل مصرف روزمره، در سطح وسیعی کشت می شوند. و انرژی زیادی از مرحله کاشت تا آماده کردن برای مصرف آنها صرف می گردد. بر این اساس، نیاز است دستگاه هایی برای مکانیزه کردن عملیات مختلف کاشت تا پس از برداشت آنها طراحی شود. به منظور طراحی دستگاهی برای برداشت، خرد کردن، آسیاب کردن محصولات کشاورزی نیاز است تا خواص مکانیکی و فیزیکی محصول مشخص باشد. همچنین کاهش توان مصرفی نیز از پارامترهای مهم طراحی ماشین آلات میباشد به همین علت مطالعه فرآیند برش محصول ضروری است. مهم ترین خواص مکانیکی که نیاز است برای بررسی برش علوفه در نظر گرفت عبارتند از: مقاومت برشی، خمشی، کششی، چگالی و اصطکاک. مقدار این خواص در ارتفاعهای متفاوت از ساقه متفاوت میباشد و نوع، گونه، سن، رطوبت و ساختار فیبری گیاه بر این خواص اثرگذار هستند (Chattopadhyay and Pandey, 1999).

زمان برداشت گیاه بر خواص مکانیکی اثر گذار است، که این امر به دلیل کاهش رطوبت و خشک شدن گیاه در طی رشد گیاه است. در مراحل اول رسیدگی گیاه میزان مقاومت برشی بیشتر از مراحل بعدی است و مدول یانگ بصورت پیوسته تا مرحله نهایی برداشت افزایش مییابد. حال آنکه مدول سختی وابسته به مرحله رسیدگی نیست (O'Dogherty et al., 1995).

در تحقیقی اثر رطوبت و ارتفاع برش در برش ضربه ای ساقه کلزا بررسی شد. نتایج نشان داد که با کاهش رطوبت، میزان انرژی برشی کاهش مییابد و به دلیل کاهش قطر ساقه در

## مواد و روش ها

هدف از این تحقیق برآورد مقاومت برشی، انرژی برشی و بیشینه نیروی برشی ساقه جعفری و بررسی اثر زاویه تیغه و چیدمان ساقه ها روی آن ها می باشد. طرح آزمایشی فاکتوریل کاملاً تصادفی برای بررسی اثر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آنها (جدول ۱) استفاده شد.

هر آزمون ۶ بار تکرار شد و داده ها با آزمون ANOVA در نرم افزار SPSS تحلیل شد.

جدول ۱: متغیرهای مستقل و وابسته مطالعه شده در تحقیق

| متغیرهای مستقل                                 | سطوح             |
|------------------------------------------------|------------------|
| زاویه تیغه                                     | 0 و 20 و 40 درجه |
| نوع قرار گیری ساقه ها                          | ردیفی و دسته ای  |
| متغیرهای وابسته: مقاومت برشی و انرژی برشی ویژه |                  |

مواد آزمایشی، جعفری تازه تجاری بود. پس از خریداری، قطر نمونه ها با استفاده از کولیس دیجیتالی (دقت ۰.۰۱ میلی متر) اندازه گیری شد. به دلیل اینکه ارتفاع برش بر خواص برشی اثرگذار است، تمامی آزمایش ها در بازه ۴ تا ۸ سانتی متری انجام گرفت (شکل ۱). رطوبت اولیه ساقه ها با قرار دادن آن ها در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت به دست آمد. جدول ۲ مقادیر میانگین دو ویژگی فیزیکی جعفری را نشان می دهد.

جدول ۲: خواص فیزیکی ساقه های جعفری استفاده شده در تحقیق

| ارتفاع برش | رطوبت ساقه (بر پایه تر) | قطر متوسط | مساحت سطح مقطع متوسط |
|------------|-------------------------|-----------|----------------------|
| 4-8 cm     | 92%                     | 4.1 mm    | 13.1 mm <sup>2</sup> |

افزایش رطوبت ساقه، میزان مقاومت خمشی کمتر شده و بیشترین مقاومت و انرژی برشی ویژه به ترتیب و 07/1 MPa گزارش شد 08/10 mm<sup>2</sup> mJ (Ince et al. 2005).

بررسی خواص مکانیکی ساقه کتان به منظور سرزنی آن نشان داد که در قسمتهای بالاتر گیاه (15-0 cm ارتفاع)

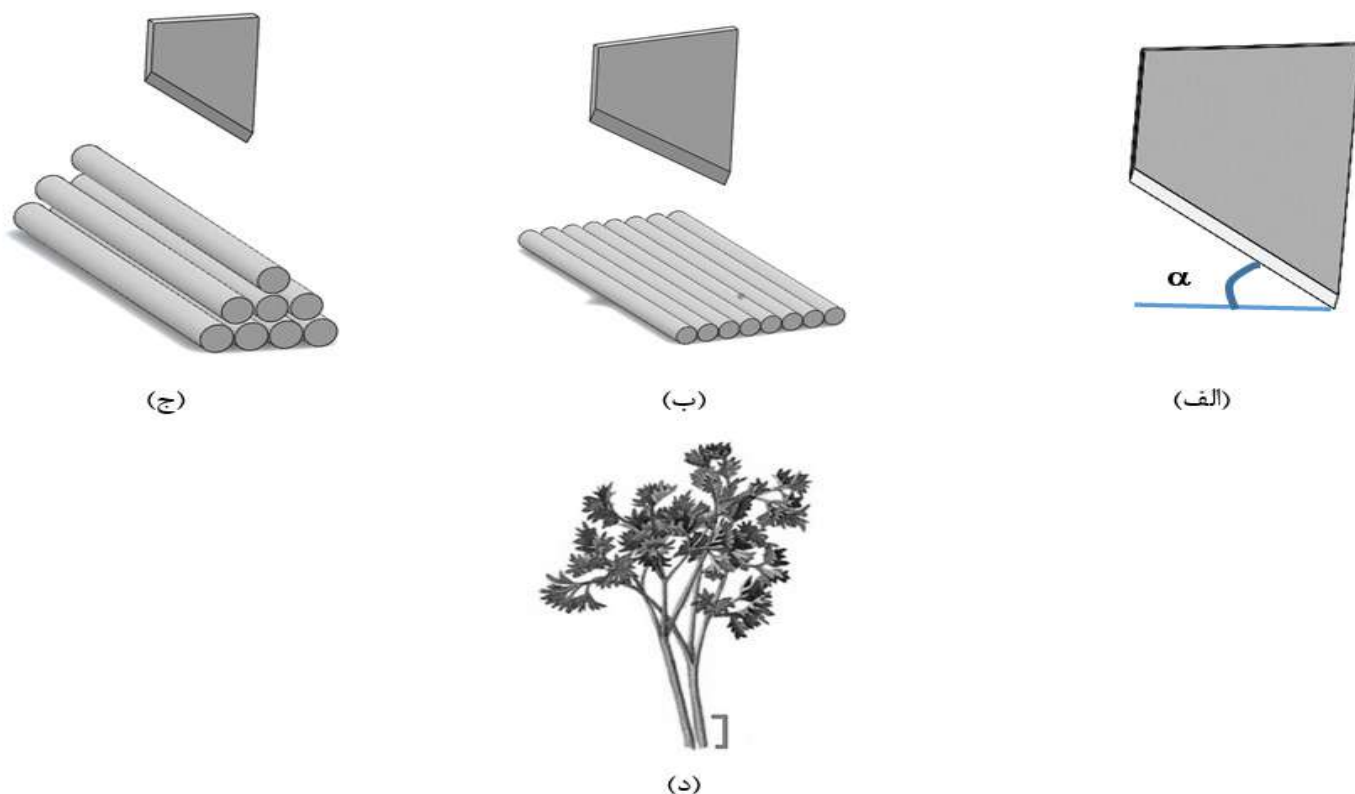
مقدار قطر، نیروی برشی، رطوبت، تنش برشی و انرژی برشی ویژه به ترتیب 4.94 MPa، 72%، 73 N، 4.35 mm و 0.069 mJ mm<sup>2</sup> می باشد.

در قسمت های پایین (30-15 cm ارتفاع) تر به ترتیب 4.65 MPa، 64.8%، 121 N، 5.79 mm و 0.078 mJ mm<sup>2</sup> می باشد.

(Aydin and Arslan, 2018)

مطالعه ای در زمینه بررسی خواص مکانیکی و همچنین فرآیند برش جعفری مشاهده نشد. در این تحقیق فرآیند برش ساقه جعفری بررسی شده و اثر زاویه تیغه و نحوه چینش ساقه در زیر تیغه بر روی خواص مکانیکی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج برای طراحی یک دستگاه برش سبزیجات استفاده شد.



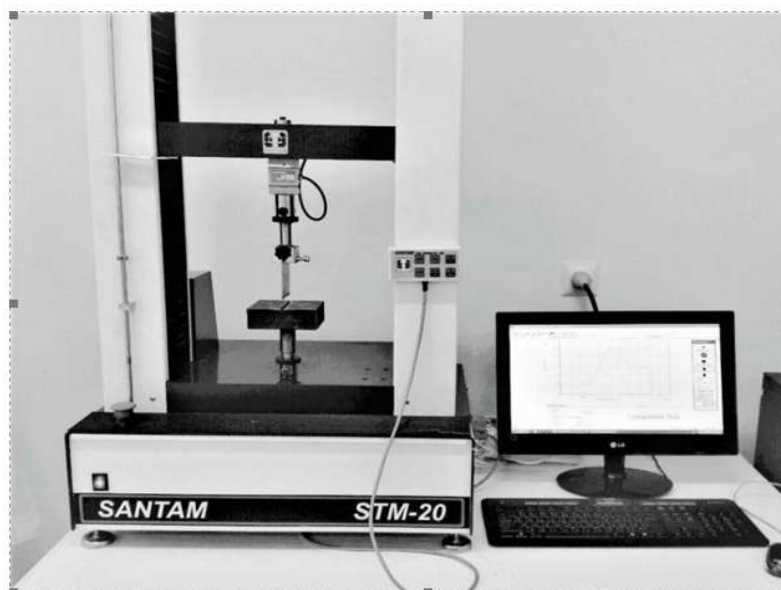


شکل ۱- الف) زاویه تیغه (۲۰ و ۴۰، =۰) ب) چیدمان ردیفی ساقه ها جلوی تیغه  
ج) چیدمان دسته ای و د) ارتفاع برش

تیغه های فولادی استفاده شده در تحقیق کاملاً تیز شدند (۲۰ زاویه لبه) تا برش خالص صورت گرفته و از لهیدگی جلوگیری شود. به منظور بررسی اثر چیدمان، ۸ ساقه به دو صورت ردیفی و دسته ای زیر تیغه قرار داده شدند. (شکل ۱)

تست های برش توسط دستگاه آزمون مواد ساخت شرکت سنتم انجام شد. (شکل ۲) (مدل STM 20)

و سرعت بارگذاری برابر  $1400 \text{ mm min}^{-1}$  انتخاب شد. نیروی برشی توسط دستگاه آزمون مواد محاسبه شد و مقدار تنش برشی از معادله ۱ بدست آمد که در آن  $F_{s \max}$  نیروی برشی ماکزیمم و مساحت سطح مقطع نمونه است. انرژی برشی از محاسبه مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی تا نقطه شکست حاصل شد (معادله ۲)



شکل ۲- دستگاه آزمون مواد استفاده شده در تحقیق



$$\tau_{\max} = F_{s,\max} / A \quad (1)$$

$$J = \int_0^{l_f} F \cdot dl = \sum_0^{l_f} (l_{n+1} - l_n) (F_{n+1} + F_n) / 2 \quad (2)$$

سطح مقطع  $A$  انرژی برشی و  $ES$  با استفاده از معادله ۳ بدست آمد که در آن (ESC) انرژی برش ویژه نمونه است.

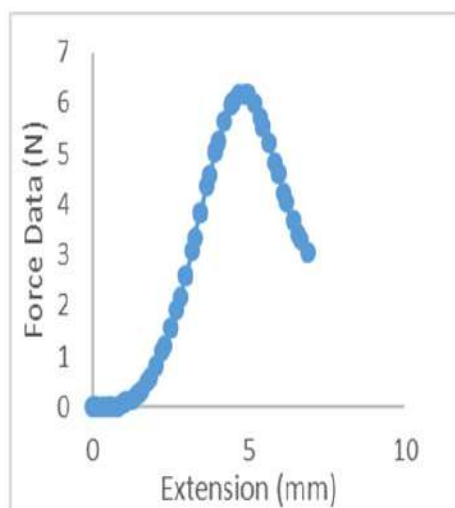
$$E_{sc} = E_s / A \quad (3)$$

## نتایج و بحث

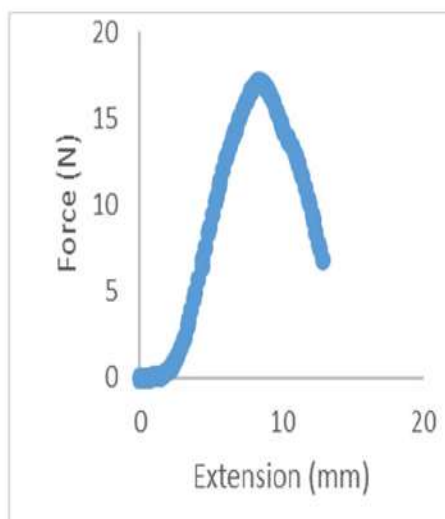
### خواص مکانیکی

این نقطه نصف یا بیشتر ساقه بریده شده است (سطح مقابل لبه تیغه کاهش می یابد). بعد از برش کامل و گذشتن تیغه از ساقه، نیرو به صفر می رسد. استفاده از تیغه با زاویه ۴۰ درجه باعث شده است که نمودار نیرو تغییر شکل کشیده تر شود. مقدار جابجایی مورد نیاز برای برش کامل افزایش یافته ولی بیشینه نیروی برشی نسبت به چیدمان دسته ای کمتر می شود

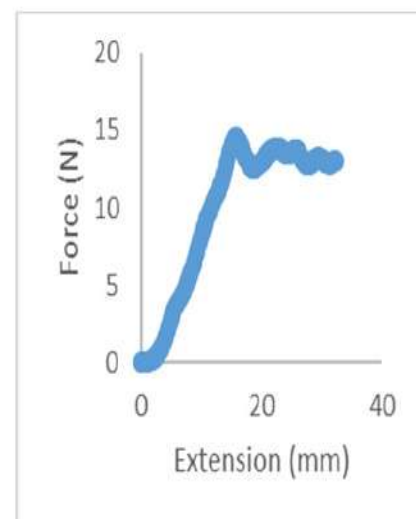
منحنی نیرو تغییر شکل در شکل ۳ آورده شده است. با افزایش حرکت تیغه و گذشتن آن از سطح مقطع ساقه، نیروی برشی مورد نیاز افزایش می یابد. به دلیل اینکه سرعت بارگزاری زیاد است نقطه تسلیم بیولوژیک که در آن برش بدون افزایش قابل ملاحظه نیرو صورت می گیرد مشاهده نشد. بعد از رسیدن نیرو به مقدار ماکزیمم، نیرو شروع به کاهش می کند زیرا در



ج) ۱ ساقه و زاویه صفر درجه تیغه



ب) ۸ ساقه و زاویه ۲۰ درجه تیغه



الف) ۱۵ ساقه و زاویه ۴۰ درجه تیغه

شکل ۳: جابجایی نیروی معمولی برای برش ساقه های جعفری در زوایای تیغه، آرایش ساقه و تعداد ساقه های مختلف

## اثر زاویه تیغه

استفاده از تیغه با زاویه برشی بزرگتر باعث می‌شود که ساقه‌ها به طور همزمان برش نخورند و سطح تماس ساقه مقابل لبه تیغه بیشتر باشد. به همین جهت بیشینه نیروی برشی ماکزیمم کمتر می‌شود و در نتیجه مقاومت برشی نیز کاهش یابد. با افزایش زاویه برش از صفر به ۴۰ درجه، مقدار متوسط مقاومت برشی کمتر می‌شود. بیشترین مقدار مقاومت برشی مربوط به برش ۱ ساقه در زاویه صفر درجه می‌باشد. نتایج این تحقیق همسو با نتایج اسحاق بیگی و همکاران (Esehaghbeygi et al. 2009) است که گزارش کردند در زوایای ۳۰ و ۱۵ و صفر درجه، مقاومت برشی ساقه گندم برابر ۳.۳۶، ۳.۵۸ و ۳.۹۲ مگاپاسکال می‌گردد. گروهی دیگر از پژوهشگران گزارش کردند که با افزایش زاویه تیغه انرژی برشی کمتر می‌شود (Mathanker et al. 2015).

## اثر تعداد و چیدمان ساقه‌ها

در برش چند ساقه، ساقه‌ها به طور همزمان برش نمی‌خورند. در نتیجه در برش یک ساقه انرژی برشی ویژه بیشتری نسبت به چند ساقه نیاز است. در زاویه صفر درجه نیروی برشی ماکزیمم و مقاومت برشی متوسط برای برش ۸ ساقه با چیدمان دسته‌ای به ترتیب برابر با ۰.۶۹ Mpa و ۳۰.۹۸ N بود که با تغییر زاویه به ۲۰ درجه ۰.۵۱ Mpa و ۲۰.۵۳ N گردید و در زاویه ۴۰ درجه به ۰.۴ Mpa و ۱۷.۴۳ N رسید. یور و همکاران (۲۰۰۰) نیز گزارش کردند که در برش چند ساقه‌ای انرژی برشی به ازای یک ساقه گندم بیشتر از انرژی لازم برای برش تکی آن است (Yore et al. 2000).

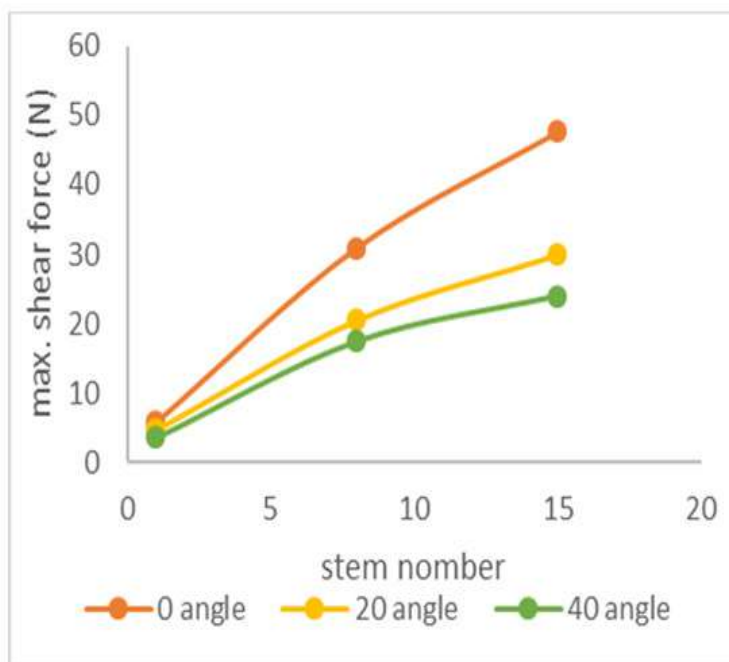
جدول ۳- خواص برشی ساقه جعفری به ازای زاویه برش و تعداد ساقه در چیدمان ردیفی

| Stems Number                 | 1    |      |      | 8    |      |      | 15   |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| angle                        | 0    | 20   | 40   | 0    | 20   | 40   | 0    | 20   | 40   |
| Shear stress (Mpa)           | .82  | 0.74 | 0.66 | 0.79 | 0.39 | 0.30 | 0.92 | 0.25 | 0.20 |
| Energy (mj/mm <sup>2</sup> ) | 2.65 | 2.41 | 2.38 | 2.04 | 2.32 | 2.47 | 2.67 | 2.19 | 2.08 |

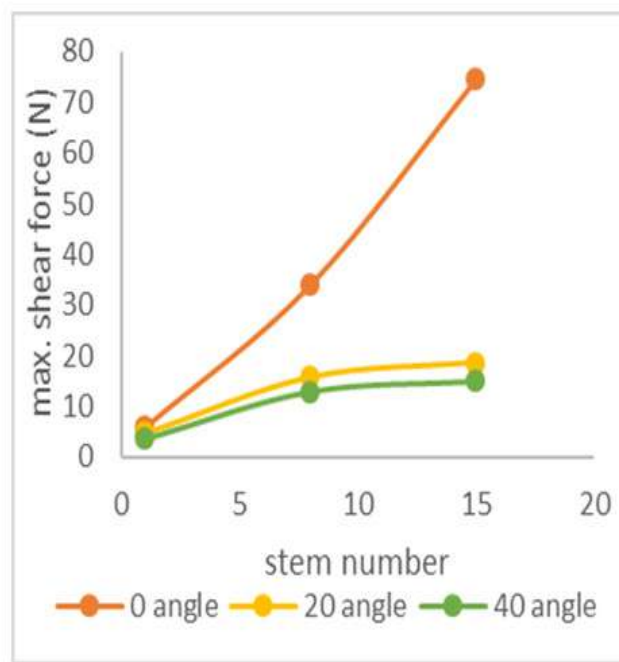
جدول ۴- خواص برشی ساقه جعفری به ازای زاویه برش و تعداد ساقه در چیدمان دسته‌ای

| Stems Number                 | 1    |      |      | 8    |      |      | 15   |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| angle                        | 0    | 20   | 40   | 0    | 20   | 40   | 0    | 20   | 40   |
| Shear stress (Mpa)           | .82  | 0.74 | 0.66 | 0.69 | 0.51 | 0.40 | 0.59 | 0.40 | 0.32 |
| Energy (mj/mm <sup>2</sup> ) | 2.65 | 2.41 | 2.38 | 3.53 | 2.69 | 2.10 | 3.36 | 2.58 | 2.08 |





(ب)



(الف)

شکل ۴- نمودار تغییرات نیروی برشی ماکزیمم در زاویه های برش صفر، ۲۰ و ۴۰ برای ۱، ۸ و ۱۵ ساقه در چیدمان ردیفی (الف) و دسته ای (ب)

۱۸.۷ و ۲.۶۵ J/mm<sup>2</sup> شد. عده دیگری از پژوهشگران گزارش کردند که با افزایش سرعت بارگذاری از ۱۰ به ۱۰۰ mm/min مقدار انرژی ۱۲.۲-۳۴.۱ J/mm<sup>2</sup> کاهش می یابد. (Chattopadhyay and Pandey 1999).

بطور کلی با افزایش زاویه برش مقدار انرژی برشی کمتر می شود به طوری که کمترین انرژی برشی مربوط به زاویه ۴۰ درجه می باشد که دلیل این امر کاهش شدید نیروی برشی در زاویه های بالا می باشد (شکل ۴). جانسون و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با افزایش زاویه برش از صفر به ۶۰ درجه مقدار انرژی لازم *Miscanthus x giganteus* برای برش ساقه از مقدار ۱۰.۱ J به ۷.۶ J کاهش می یابد (Johnson et al 2012).

بعضی دیگر از پژوهشگران در سال ۲۰۱۵ نیز گزارش کردند که با افزایش زاویه تیغه مقدار انرژی برشی کاهش می یابد (Mathanker et al 2015).

در چیدمان دسته ای، انرژی برش نسبت به حالت ردیفی بیشتر است. مقدار انرژی برشی و انرژی برش ویژه برای برش یک ساقه در زاویه صفر درجه تیغه برابر



در این تحقیق خواص برشی ساقه جعفری بررسی شد و نتایج نشان داد که زاویه تیغه و تعداد ساقه اثر معناداری بر میزان مقاومت و انرژی برشی داشت. بیشترین مقاومت و انرژی برشی در زاویه برش صفر درجه و برای برش ساقه تک بدست آمد. نتایج نشان می دهد زاویه تیغه باعث کاهش نیروی برشی ماکزیمم می شود که نهایتاً به کاهش مقاومت برشی منجر می گردد. بیشتر بودن انرژی برش برای زاویه ۴۰ درجه به این دلیل است که در زاویه های بیشتر میزان جابجایی بیشتری نیاز است و به عبارتی نمودار نیرو-جابجایی کشیده تر می شود

Annoussamy, M., Richard, G., Recous, S., & Guerif, J. (2000). Change in mechanical properties of wheat straw due to decomposition and moisture. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(6), 657.

Aydın, İ., & Arslan, S. (2018). Mechanical properties of cotton shoots for topping. *Industrial Crops and Products*, 112, 396-401.

Azadbakht, M., Esmailzadeh, E., & Esmaili-Shayan, M. (2015). Energy consumption during impact cutting of canola stalk as a function of moisture content and cutting height. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2), 147-152.

Chattopadhyay, P. S., & Pandey, K. P. (1999). Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi-static deformation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(2), 199-206

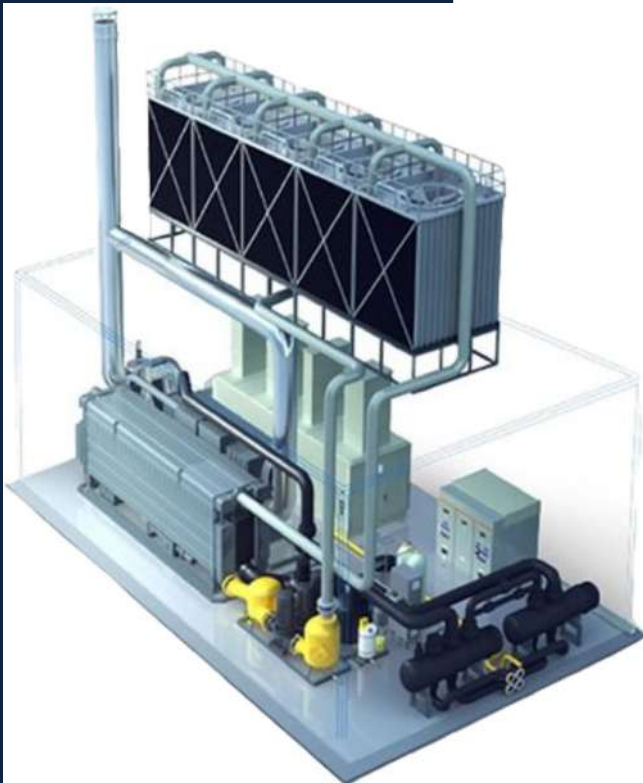
Esehaghbeygi, A., Hoseinzadeh, B., Khazaei, M., & Masoumi, A. (2009). Bending and shearing properties of wheat stem of alvand variety. *World Applied Sciences Journal*, 6(8), 1028-1032.





معرفی سیستم‌های  
تولید هم‌زمان برق، گرما  
و سرما (CCHP)  
با محرکه پیل سوختی  
در صنایع برودتی  
محصولات کشاورزی

محمد شادمانی 



امروزه با افزایش مصرف انرژی (گرمایی و الکتریسیته) در جهان به خصوص در بخش کشاورزی و هزینه بالای تبدیل و ذخیره سازی و انتقال آن باعث شده تا نیاز به استفاده از سیستم هایی که می توانند به طور هم زمان برق، گرما و سرما تولید نمایند احساس شود. این موضوع به خصوص در بخش کشاورزی و صنایع وابسته که مصرف درصد بالایی از انرژی را به خود اختصاص می دهد بیشتر مشهود است؛ بنابراین یکی از بهترین سیستم ها، سیستم تولید هم زمان برق، گرما و سرما (CCHP) هست.

مزایای عمده این سیستم کاهش تلفات در توزیع و انتقال، کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده می باشد. این سیستم از یک محرک اولیه، سیستم بازیافت گرما، مبدل های حرارتی، چیلر جذبی، تجهیزات کنترلی تشکیل می شود. محرک اولیه این سیستم می تواند توربین گازی و بخار، موتورهای احتراق داخلی، میکرو توربین و پیل سوختی (Fuel Cell) باشد؛ که هدف این مقاله به کارگیری با محرک اولیه پیل سوختی CCHP در صنایع محصولات کشاورزی می باشد، با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات به کارگیری این سیستم ها به همراه پیل های سوختی باعث کاهش مصرف سوخت های فسیلی در نتیجه کاهش آلاینده های و تخریب محیط زیست و نیز کاهش هزینه استفاده از حامل های انرژی می شود.

### واژه های کلیدی

پیل سوختی، سیستم های CCHP، کشاورزی

امروزه مصرف انرژی در جهان به خصوص در بخش کشاورزی و صنایع وابسته به آن رشد فزاینده ای داشته و سیستم های مرتبط با آن روز به روز متنوع تر می شود. بر این اساس استفاده از سیستم های مؤثر و با قابلیت، اهمیت بیشتری می یابد. از طرفی استفاده از سوخت های فسیلی می تواند اثرات زیست محیطی زیادی از جمله گرمایش زمین را به دنبال داشته باشد؛ به طوری که جهت جلوگیری از فاجعه ای زیست محیطی تغییرات آب و هوایی تا سال ۲۰۱۵ باید عمده مصرف گازهای هیدروکربن با منابع کم کربن جایگزین گردد؛ بنابراین می توان با به کارگیری سیستم های با قابلیت و با کارایی بالا، علاوه بر مصرف کمتر منابع انرژی فسیلی، اثرات نامطلوب ناشی از آن ها را حتی المقدور کاهش داد. از جمله مهم ترین سیستم های موجود در تأمین انرژی، سیستم های تولید پراکنده شامل سیستم های تولید برق و حرارت (CHP) و نیز تولید برق، حرارت و برودت (CCHP) می باشند که تولید سه گانه نیز نامیده می شوند. در واقع سیستم های CCHP برای تولید قدرت و گرما بوده که می توانند با یک بیش از ۱۰۰ سال قدمت دارد اما این سیستم ها اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی بیشتر معطوف به ترکیب چیلرهای جذبی سیستم های تولید قدرت و نیروگاه ها بوده است. در دو دهه اخیر توسعه سیستم های حرارتی جذبی و کاهش هزینه های آن ها باعث افزایش به کارگیری سیستم های در ابعاد تجاری و توان های متوسط برای تولید برق، CCHP. گرمایش و سرمایش محلی شده است [5 - 9]

(شامل ساختمان اداری کوچک، ساختمان اداری متوسط، بیمارستان و دانشکده) انجام دادند.

### سیستم‌های CCHP

سیستم ها ی CCHP از یک منبع حرارتی برای ایجاد سرمایه‌گذاری استفاده می‌کند. این حرارت عمدتاً از گرمای اتلافی یک سیکل قدرت تأمین می‌گردد که می‌تواند در یک سیکل تبرید جذبی به عنوان محرک حرارتی در نظر گرفته شود؛ بنابراین استفاده از این گرمای اتلافی در نهایت منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه و سوخت‌های فسیلی می‌شود. [۳]

شکل (۱) طرح کلی یک سیستم CCHP را نشان می‌دهد که شامل یک توربین گاز، ژنراتور، بویلر بازیافت گرما (HRSG) و یک چیلر جذبی است. نیروی محرکه توربین گازی می‌تواند توسط گاز طبیعی تأمین گردد و کار مکانیکی حاصل به وسیله‌ی یک ژنراتور به برق تبدیل می‌شود و چیلر جذبی به وسیله‌ی گرمای بازیافتی از بویلر بازیافت گرما عمل سرمایه‌گذاری را در تابستان و گرمایش را در زمستان فراهم می‌نماید [۳]

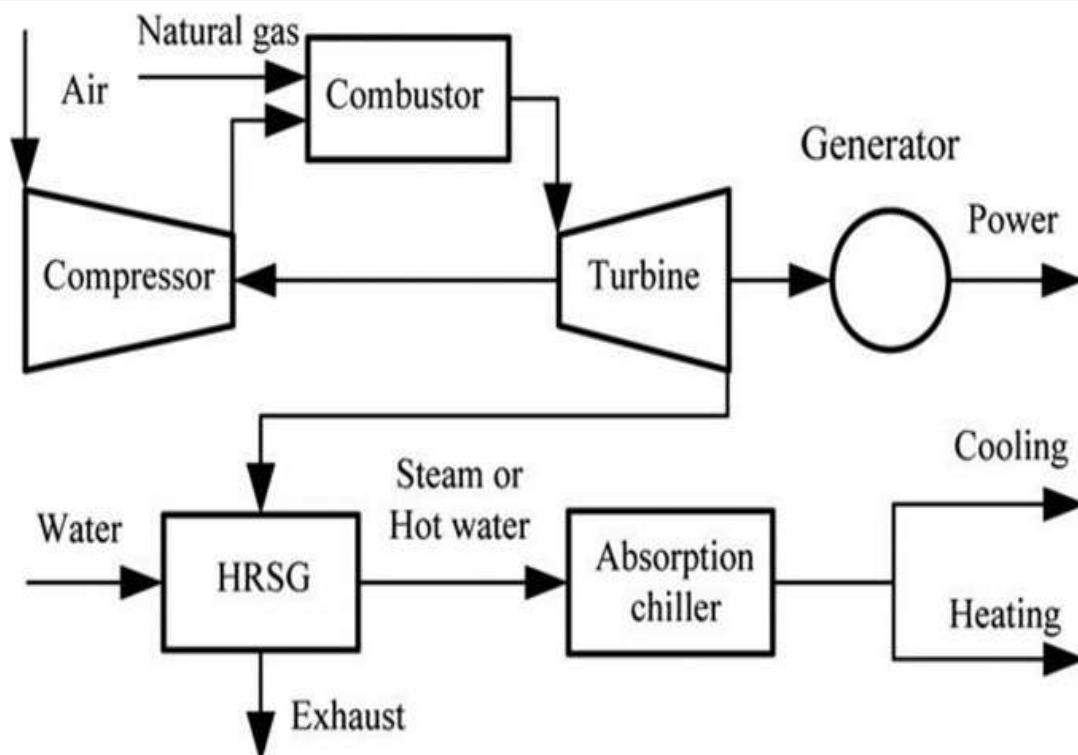
بخش مهم دیگر سیستم CCHP سیکل تبرید جذبی می‌باشد که از گرمای هدررفته بخش‌های دیگر می‌تواند برای ایجاد سرمایه‌گذاری و گرمایش استفاده نماید. هرچند ممکن است در بعضی مواقع چیلر با محرک الکتریکی و یا چیلرهایی که با موتور احتراق داخلی کار میکنند و به محرک اولیه متصل میشوند نیز استفاده شود. [۳]

مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که سیستم‌های CCHP قابلیت ذخیره انرژی و کارایی بالایی و خصوصیات تولید آلاینده‌های آن‌ها پایین می‌باشد. همچنین تکنولوژی پیل سوختی به کار گرفته شده در این سیستم‌ها که در چند دهه اخیر به عنوان یکی از راهکارهای تولید انرژی مطرح شده است، اولین بار توسط دانشمند انگلیسی سر ویلیام گرو در سال ۱۸۳۹ با سرمشق گرفتن از واکنش الکترولیز آب، طی واکنش معکوس و در حضور کاتالیست پلاتین ساخته شده است. واژه پیل سوختی» در سال ۱۸۸۹ توسط لودویک مند و چارلز لنجر به کار گرفته شد. آن‌ها نوعی پیل سوختی که هوا و سوخت زغال سنگ را مصرف می‌کرد ساختند. فصلی دیگر از تاریخچه تحقیقات پیل سوختی توسط فرانسیس بیکن از دانشگاه کمبریج انجام شد. او در سال ۱۹۳۲ اولین پیل سوختی قلیایی را که "Cell Bacon" نام گرفت اختراع کرد. بیکن در ۱۹۵۹ پیل سوختی با توان ۵ کیلووات را تولید نمود که می‌توانست نیروی محرکه یک دستگاه جوشکاری را تأمین نماید. مطالعات گوناگونی در زمینه سیستم‌های CCHP و پیل سوختی صورت گرفته است؛ به عنوان نمونه

Tozer Maidment Tozer [۱۰] مدیریت انرژی یک سیستم CCHP با استفاده از یک چیلر جذبی را بررسی نمودند.

Medrano و همکاران [۱۲] بررسی اثرات محیطی اقتصادی و راندمان را برای سه سیستم CCHP که با محرک‌های جدید پیل سوختی دما بالا (HTFC) میکروتوربین و سلول‌های فتوولتائیک کار می‌کردند را برای چهار نمونه ساختمان عمومی





شکل (۱) طرح کلی یک سیستم CCHP [۳]

شرایط اقلیمی و ... داشته باشند.

**توربین‌های گازی:** عمدتاً در سیستم‌های تولید پراکنده در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود و اندازه‌های کوچک‌تر از ۱ MW به علت بازده الکتریکی پایین و هزینه اولیه بالا به ازای واحد برق تولیدی چنان اقتصادی نیست. [۹]

**توربین‌های بخار:** توربین‌های بخار بیشترین کاربرد را در نیروگاه‌ها و صنایع دارند و می‌توانند در کنار یک بویلر با سوخت‌های متنوع به کار روند. همچنین عمر آن‌ها بالا بوده و با توجه به هزینه‌های کارکرد و نگهداری، مناسب و قابل اطمینان می‌باشند؛ اما بعضی از مشکلات از جمله بازده الکتریکی پایین، زمان راه‌اندازی آهسته و عملکرد ضعیف‌تر در بارهای جزئی، کاربرد آن‌ها را محدودتر می‌نماید و بنابراین کاربرد آن‌ها عمدتاً در سیستم‌های بزرگ می‌باشد. [۹]

کاهش CCHP از مزایای مهم سیستم‌های آلاینده‌ها است که در بعضی محرک‌های اولیه این امر بیشتر به چشم می‌خورد. از جمله در پیل‌های سوختی، که در آن‌ها به علت عدم احتراق، تولید  $CO_2$  و  $NO_x$  به کمترین مقدار در مقایسه با سایر محرک‌های اولیه می‌رسد. چندین روش برای دسته‌بندی محرک‌های اولیه وجود دارد که می‌توانند بر اساس سوخت مصرفی، جزئیات فنی، محدوده ظرفیت و ... دسته‌بندی شوند. [۱۴]

### محرک‌های اولیه سیستم‌های CCHP

در سیستم‌های CCHP عامل ایجاد قدرت در سیکل، محرک اولیه (Prime Mover) نامیده می‌شود که می‌تواند توربین گاز، توربین بخار، موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین (Micro turbine) باشد.

هر یک از این (Fuel Cell) و پیل سوختی نمونه‌ها می‌توانند خصوصیات و محدودیت‌های متفاوتی بر اساس تولید برق، ایجاد آلاینده‌ها



## موتورهای احتراقی داخلی رفت

**و برگشتی:** دو نوع موتور جرقه‌ای و تراکمی به‌عنوان محرک‌های اولیه در سیستم‌های CCHP می‌تواند استفاده شود. این موتور ها با هزینه‌های اولیه پایین‌تری نسبت به سایر محرک‌های اولیه می‌باشند. زمان راه‌اندازی آن‌ها سریع بوده و در بارهای جزئی عملکرد خوبی دارند و بنابراین به‌عنوان محرک‌های اولیه با انعطاف‌پذیری بالا شناخته می‌شوند. این موتورها عمدتاً در سیستم‌هایی با ظرفیت کمتر از 1 MW به کار گرفته می‌شوند. از معایب این سیستم ها ارتعاش بالای آن‌ها بوده و نیز تعداد زیاد قطعات متحرک، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را بالا می‌برد. از طرفی آلاینده‌های زیاد خصوصاً NOx از معایب عمده این سیستم ها می باشد. [۹]

## میکروتوربین‌ها: تکنولوژی این

تجهیزات مشابه توربین‌های گازی بوده، اما از نظر مقیاس، کوچک‌تر می‌باشند و می‌توانند با سوخت‌های متنوعی شامل گاز طبیعی، گازوئیل و بنزین نیز به کار روند. قطعات متحرک آن‌ها کم بوده و روان کاری کمتری نیاز دارند. هرچند سرعت گردش آن‌ها بسیار بالا می‌باشد. همچنین به علت دمای احتراق پایین آن‌ها NOx کمتری تولید می‌نماید و سطح ایجاد سروصدا در آن‌ها نسبت به موتورهای با ابعاد مشابه کمتر می‌باشد. اما هزینه‌های اولیه آن‌ها نسبت به موتورهای احتراقی بالا می‌باشد. اشکال دیگر آن‌ها بازده الکتریکی پایین و حساس بودن آن‌ها به شرایط محیطی می‌باشد. میکروتوربین‌ها می‌توانند در واحدهای تولید پراکنده انرژی و کاربردهای صنعتی، تجاری و مسکونی استفاده شوند. [۹]

## پیل‌های سوختی: پیل‌های سوختی

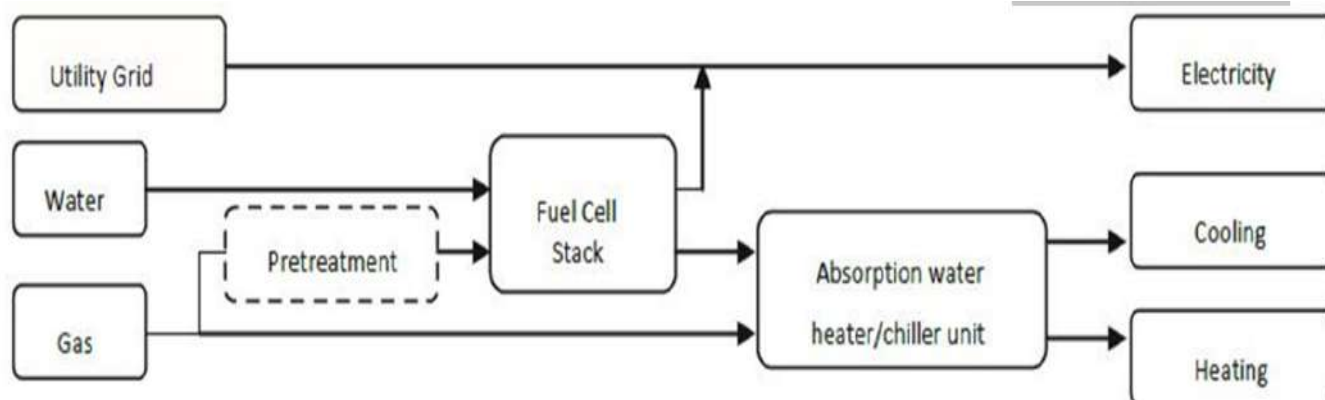
تولیدکننده قدرت فشرده و بی‌صدا بوده و فاقد قطعات متحرک می‌باشند که هیدروژن و اکسیژن را برای تولید برق مصرف می‌کنند و هم‌زمان می‌توانند گرما را برای کاربردهای متنوعی تولید نمایند. پیل‌های سوختی بازده الکتریکی بالایی در محدوده وسیعی از بازه‌ها دارند و به‌کارگیری آن‌ها علاوه بر صرفه‌جویی منابع انرژی فسیلی و کاهش هزینه مربوط به استفاده از حامل‌های انرژی میزان آلاینده‌ها و نیز گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. [۹]

## پیل سوختی و طرز کار آن

پیل سوختی وسیله‌ای است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. عملکرد پیل سوختی مانند باتری نیست که انرژی را ذخیره کند، بلکه پیل سوختی حالتی از انرژی را به حالتی دیگر تبدیل می‌کند، به‌طوری‌که در این تبدیل، مواد داخل پیل مصرف نمی‌شوند. گاز هیدروژن به دلیل تمایل واکنش‌دهندگی بالا، فراوانی و عدم آلاینده‌گی محیط‌زیست، به‌عنوان سوخت ایده‌آل در پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. هر پیل سوختی دارای دو الکترود (آند و کاتد) و یک الکترولیت مابین این دو الکترود و غشا به‌منظور جدا کردن دو بخش پیل می‌باشد. در قطب آند، هیدروژن بر روی یک کاتالیزور واکنش داده و تولید یک یون با بار مثبت و الکترون با بار منفی می‌کند [۱۹]. پروتون به وجود آمده، از محیط الکترولیت گذر کرده، حال‌آنکه الکترون در فضای مدار خارجی حرکت می‌کند و تولید جریان می‌نماید. در قطب کاتد، اکسیژن با یون



و الکترون واکنش نشان داده و تولید آب و حرارت می‌نماید. این سلول به تنهایی ۰/۷ ولت نیروی محرکه الکتریکی تولید می‌کند که برای روشنایی یک لامپ کوچک کافی است. اگر این پیل‌ها به صورت سری قرار گیرند قادر به تولید برق با توان چندین مگاوات می‌باشند در شکل (۲) طرح کلی یک سیستم CCHP با محرک اولیه پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل (۲) طرح کلی سیستم CCHP با محرک اولیه پیل سوختی

## انواع پیل‌های سوختی

پیل‌های سوختی را به طور معمول، بر اساس نوع الکترولیتی که در آن به کار می‌رود، به پنج دسته طبقه‌بندی می‌کنند. پیل سوختی اسید فسفریک پیل سوختی غشا پروتونی (پلیمری) پیل سوختی قلیایی پیل سوختی کربنات مذاب پیل سوختی اکسید جامد

از نگاهی دیگر، طبقه‌بندی پیل‌های سوختی بر اساس دمایی است که پیل سوختی در آن کار می‌کند. بر این اساس پیل‌های سوختی به دو دسته کلی «پیل سوختی دمابالا» و «پیل سوختی دماپایین» تقسیم‌بندی می‌شوند. در جدول زیر دمایی که انواع پیل‌های سوختی در آن کار می‌کنند، به همراه نوع الکترولیت و نام اختصاری آن‌ها نشان داده شده است.

| نوع پیل سوختی         | نام اختصاری | الکترولیت          | دمای کارکرد (°C) |
|-----------------------|-------------|--------------------|------------------|
| پیل سوختی پلیمری      | PEMFC       | نفیون (نوعی پلیمر) | 80-100           |
| پیل سوختی قلیایی      | AFC         | پتاس               | 80-100           |
| پیل سوختی اسید فسفریک | PAFC        | اسید فسفریک        | 200-220          |
| پیل سوختی کربنات مذاب | MCFC        | نمک کربنات مذاب    | 650              |
| پیل سوختی اکسید جامد  | SOFC        | (نوعی سرامیک) YSZ  | 1000             |

ویژگی‌های پیل‌های سوختی [۱۹]

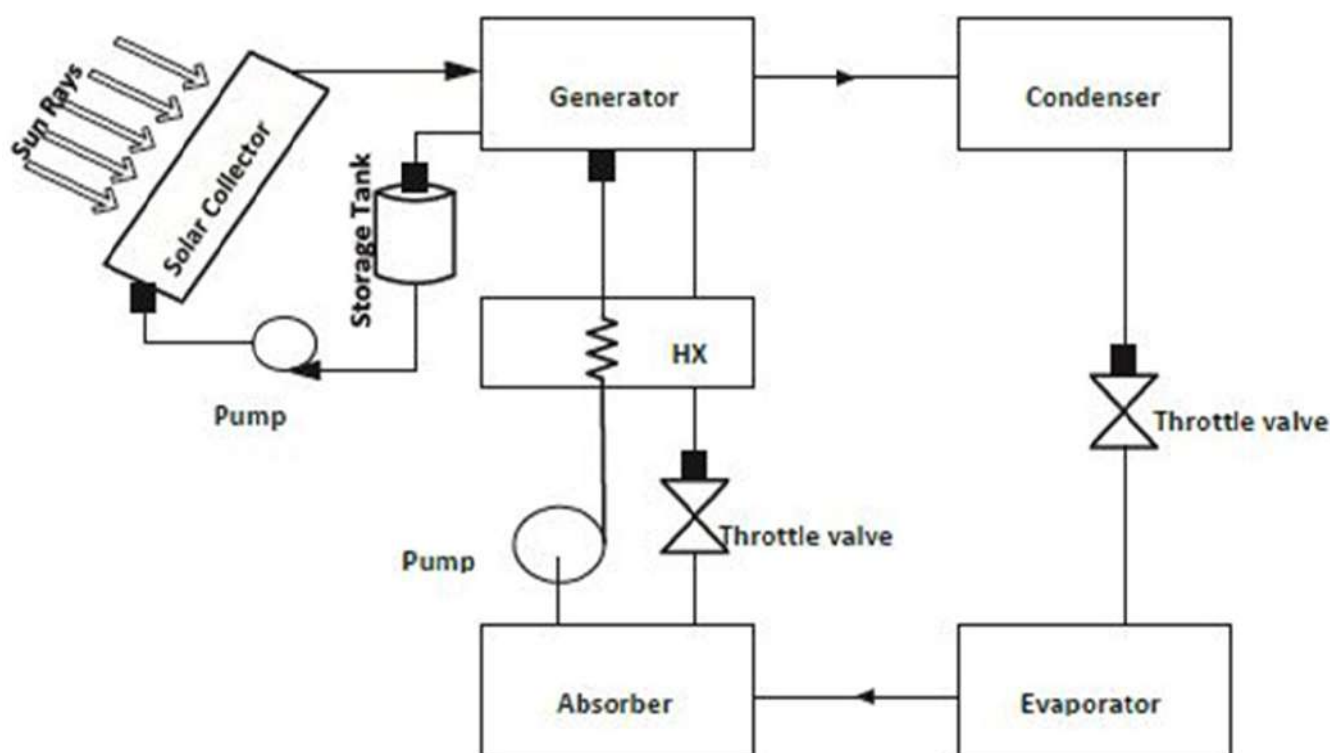
## بررسی عملکرد سیستم سرمایشی

## چیلرهای جذبی

چیلرهای جذبی یکی از مهمترین سیستم‌هایی هستند که از حرارت برای ایجاد سرمایش استفاده می‌کنند. برخلاف سیستم‌های تراکمی بخار که از کمپرسور برای افزایش فشار استفاده می‌شود، در یک سیکل تبرید جذبی از ترکیب جذب‌کننده یا ابزوربر، ماده جاذب، ژنراتور، پمپ بازیاب و شیر انبساط استفاده می‌شود، شکل (۳) طرح یک سیکل تبرید جذبی با محرک اولیه انرژی خورشیدی را نشان می‌دهد. [۱۵،۹]

تفاوت عمده سیستم‌های CHP و CCHP با اضافه شدن یک سیکل برای تامین سرما است و در این زمینه مناسب‌ترین روش استفاده از سیستم‌هایی است که از گرمای اتلافی برای تأمین این نیاز استفاده می‌نمایند و بدین‌وسیله عملکرد CCHP تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد. عمده‌ترین این تجهیزات، چیلرهای جذبی و جذب سطحی می‌باشند. این سیستم‌ها با گرمای بخار، آب داغ یا گاز داغ اگزوز حاصل از محرک‌های اولیه به حرکت درمی‌آیند. همچنین چیلرهای تراکمی و چیلرهای متحرک با موتورهای حرارتی نیز می‌توانند برای تأمین سرمایش در یک سیکل استفاده شوند. [۳،۴،۹]

شکل (۳) طرح یک سیکل تبرید جذبی با محرک اولیه انرژی خورشیدی [۱۵]



یون‌های هیدروژن از فضای الکترولیتی گذر کرده و به کاتد منتقل می‌شوند و در آنجا با اکسیژن واکنش می‌دهند و الکترون‌ها از مدار خارجی در اثر اختلاف پتانسیل شارش کرده و جریان الکتریسیته ایجاد می‌نمایند که ولتاژ آن برای یک سلول به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{Out} = V_{Rev} + V_{Loss}$$

که در آن  $V_{Out}$  ولتاژ کارکرد خروجی هر سلول پیل سوختی بوده و  $V_{ev}$  ولتاژ فرآیند برگشت پذیر و  $V_{Loss}$  تلفات ولتاژ ناشی از برگشت ناپذیری‌ها می‌باشد. در نتیجه توان الکتریکی تولیدی هر سلول پیل سوختی برحسب وات به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = V_{Out} \cdot I_{Cell}$$

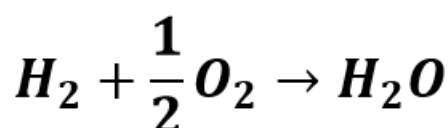
توان الکتریکی خروجی برای کل پیل سوختی که از  $N$  سلول تشکیل شده است از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_{FC} = N_{Cell} \cdot V_{Out} \cdot I_{Cell}$$

که  $I_{Cell}$  شدت جریان الکتریکی تولیدی در هر سلول و  $N_{Cell}$  تعداد سلول‌های موجود در پیل می‌باشد.

## فرایندهای شیمیایی و تولید توان در پیل سوختی

در یک پیل سوختی هیدروژنی، هیدروژن به عنوان سوخت با اکسیژن ترکیب شده و اکتریسیته، آب و حرارت تولید می‌نماید که فرایند آن به شکل زیر است [۱۶،۹]



بازده پیل سوختی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{FC} = \frac{W_{FC}}{\dot{m}_f \cdot LHV}$$

که در این رابطه  $\eta_{FC}$  بازده الکتریکی پیل سوختی  $W_{FC}$  توان الکتریکی پیل  $\dot{m}_f$  نرم جرم سوخت و  $LHV$  ارزش حرارتی پایین سوخت می‌باشد همچنین بازده پیل سوختی را می‌توان بر حسب ارزش حرارتی بالا نیز ارائه کرد در هر سلول پیل سوختی با ورود گاز هیدروژن از طرف آند و طی واکنش‌های الکتروشیمیایی در حضور کاتالیست، گاز هیدروژن به یون هیدروژن ( $H^+$ ) و الکترون‌های آزاد تجزیه می‌شود که در رابطه زیر نشان داده شده است.





## عملکرد انواع پیل‌های سوختی در سیستم‌های CCHP

### پیل سوختی غشاء پروتونی (PEMFC)

پیل‌های سوختی غشاء پروتونی دارای غشاء پلیمری جامد هستند که در حال حاضر عمدتاً غشاء Nafion در این پیل سوختی به کار برده می‌شود و به شکل یک ورقه باریک منعطف است. این غشاء، کوچک و سبک بوده و در دمای پایین کار می‌کند (دمای کارکرد بهینه در حدود ۸۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است). سایر الکترولیت‌های جامد در دمای بالا کار می‌کنند [۱۹] برای سرعت بخشیدن به واکنش، یک کاتالیست پلوتونیومی در دو سطح غشاء الکترولیت استفاده می‌شود که این کاتالیست موجب افزایش قیمت پیل سوختی می‌شود؛ اما به دلیل جامد بودن الکترولیت پیل سوختی و همچنین انعطاف‌پذیر بودن این الکترولیت، امکان شکستن و یا ترک خوردن در آن کم است و این مشخصه، پیل سوختی PEM را برای کاربرد های خانگی و کاربرد های حمل‌ونقلی مناسب می‌کند

در پیل سوختی نوع PEM اتم‌های هیدروژن درآند یونیزه می‌شوند و الکترون‌های آن‌ها جدا می‌شود. یون‌های هیدروژن که شامل بار مثبت هستند به سطح غشاء خلل‌دار نفوذ می‌کنند و به سمت کاتد می‌روند. الکترون‌های جدا شده نمی‌توانند از این غشاء عبور کنند و از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و موجب تولید برق می‌شوند. در کاتد، الکترون‌ها و پروتون‌های هیدروژن و اکسیژن موجود در هوا باهم ترکیب می‌شوند

و آب را تشکیل می‌دهند. پیل PEM نیازمند هیدروژن خالص است؛ بنابراین باید از یک رفورمر در خارج از پیل سوختی استفاده کنیم تا احتمال به وجود آمدن CO و در نتیجه مسمومیت کاتالیست را کاهش دهیم.

### مزایا:

دمای پایین و شروع به کار سریع  
عدم حساسیت به کربن دی‌اکسید  
امکان استفاده از گازهای مشتق از هیدروکربن به عنوان سوخت  
امکان استفاده از گاز های مشتق از هیدروکربن به عنوان سوخت

### معایب:

حساسیت به منواکسید کربن  
به کارگیری فلزات کمیاب در ساختمان پیل  
پیچیده بودن سیستم مدیریت آب در مجموعه غشا و الکترود

### پیل سوختی قلیایی (AFC)

پیل سوختی قلیایی با هیدروژن و اکسیژن خالص کار می‌کند و از محلول هیدروکسید پتاسیم در آب به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند و الکترود آند آن از جنس نیکل و الکترود کاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیومی شده می‌باشد. درجه حرارت کارکرد این پیل پایین بوده و بین ۸۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است در این پیل سوختی، یون‌های هیدروکسید  $\text{OH}^-$  از سمت کاتد به آند رفته و در آند گاز هیدروژن با یون‌های هیدروکسید واکنش داده و آب و الکترون را ایجاد می‌کند. الکترون‌های به وجود آمده در آند توسط یک مدار خارجی



توان الکتریکی تولید می‌کند و از طریق این مدار خارجی، الکترون‌ها به کاتد بازمی‌گردند. الکترون‌ها در کاتد با اکسیژن و آب واکنش می‌دهند و موجب تشکیل یون‌های هیدروکسیل بیشتری می‌شوند. این یون‌ها درون الکترولیت نفوذ کرده و واکنش ادامه پیدا می‌کند پیل سوختی قلیایی از میزان آلودگی کمی برخوردار است و به خاطر احتمال واکنش‌های ناخواسته در این پیل نیاز به هیدروژن خالص شده داریم و در صورتی که هیدروژن خالص نباشد موجب واکنش‌های شیمیایی اضافی و ایجاد کربنات جامد می‌شود که این ماده در واکنش‌های پیل سوختی اختلال ایجاد میکند. مشکل دیگر پیل سوختی قلیایی میزان زیاد پلوتونیم است که به‌عنوان کاتالیست از آن استفاده میشود. این کاتالیست قیمت زیادی دارد و پیل سوختی قلیایی را برای کاربردهای عادی نامناسب میکند.

### مزایا

عدم نیاز به فلزات کمیاب  
بالا بودن راندمان

### معایب

حساسیت شدید به دی اکسید کربن  
الزامی بودن استفاده از هیدروژن خالص

### پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

پیل سوختی اسید فسفریک در دمای حدود ۲۰۰-۲۲۰ درجه سانتیگراد کار می‌کند و از الکترولیت اسید فسفریک استفاده می‌کند. الکترودهای پیل‌های سوختی اسید فسفریک از جنس پلاتین میباشند که بر روی سطح پودر کربن فعال نشانداده شده‌اند. در این نوع پیل سوختی از سوخت‌های بیشتری میتوان استفاده کرد.

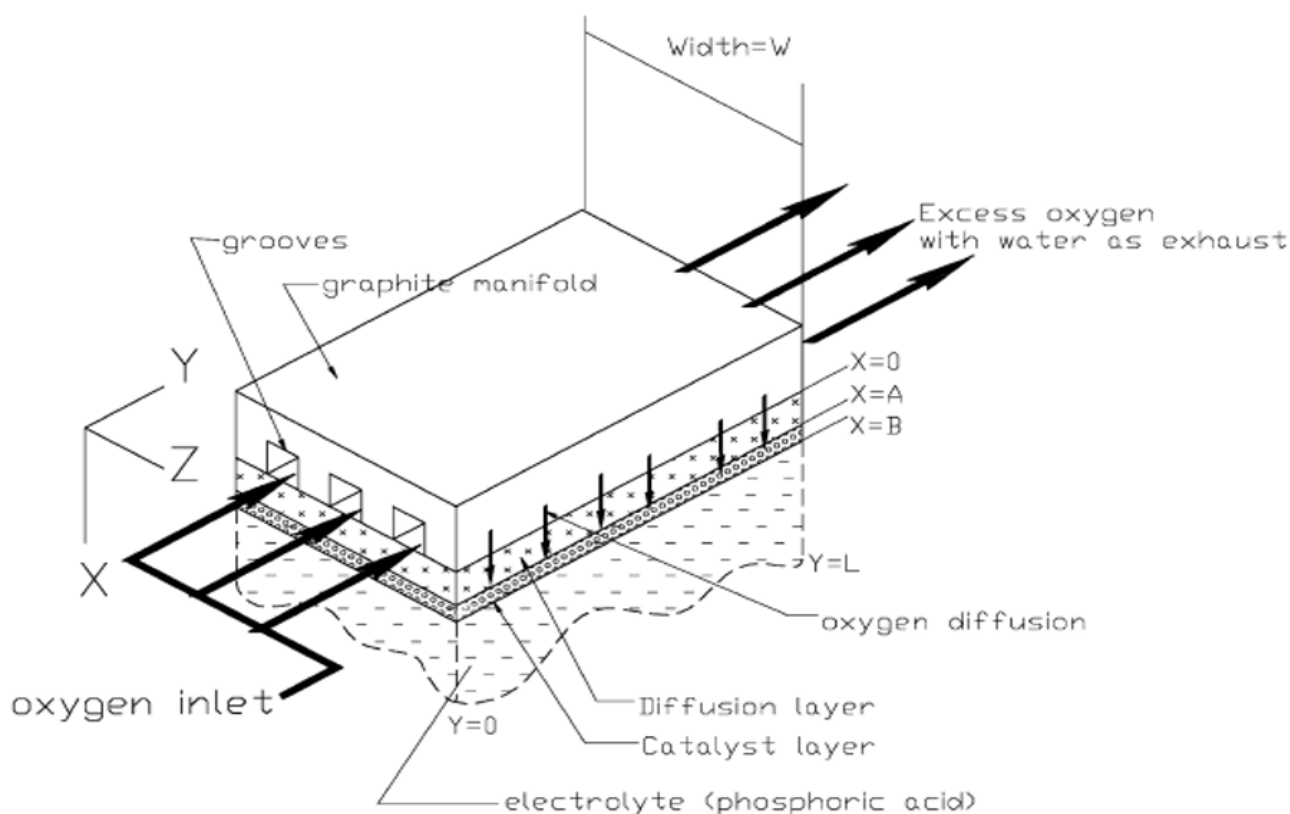
عملکرد پیل سوختی اسید فسفریک به این ترتیب است که یون‌های هیدروژن مثبت توسط فضای الکترولیتی از الکترود آند به الکترود کاتد رفته و الکترون‌های به وجود آمده در آند از یک مدار خارجی گذر کرده، جریان الکتریسیته را ایجاد مینمایند و به کاتد می‌روند. در کاتد الکترون‌ها، یون‌های هیدروژن و اکسیژن باهم واکنش داده و آب را به وجود می‌آورند که با فشار به بیرون پیل سوختی هدایت میشود. باوجود کاتالیست پلوتنیم، سرعت واکنش بالا میرود. این نوع پیل سوختی توانایی تحمل دمای بالای دمای جوش آب را دارد. همچنین اجزای آن باید مقاومت بالایی داشته باشند تا در مقابل خوردگی اسید مقاومت کنند [۱۷، ۱۹]  
هیدروژن مورد نیاز برای PAFC می‌تواند یک رفورمر خارجی از یک سوخت هیدروکربنی به وجود بیاید در صورتی که سوخت مورد نظر گازوئیل باشد، سولفور آن باید جدا شود. زیرا سولفور به کاتالیست الکترودها صدمه می‌زند می‌توان از گرمای به وجود آمده‌ی این نوع پیل سوختی در سیستم‌های CHP و CCHP برای تولید همزمان برق، گرما و سرما استفاده نمود.

### مزایا

توانایی تحمل ۱ تا ۲ درصد منواکسید کربن  
امکان استفاده در سیستم‌های CHP و CCHP  
سادگی سیستم مدیریت آب و دما  
ثبات الکترولیت در محیط الکتروشیمیایی

### معایب

کم بودن سرعت احیاء اکسیژن  
حساسیت به  $H_2S$



شکل (۴) پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC) [۱۷]

### پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

را  $\text{CO}_3^{2-}$  به وجود می آورند و الکترولیت را سرشار از یون های  $\text{CO}_3^{2-}$  میکنند. [۱۹]

پیل سوختی کربنات مذاب دمابالا می تواند هیدروژن را از سوخت های مختلف توسط رفورمر داخلی یا خارجی استخراج کند. به علاوه حساسیت کمتری نسبت به مسمومیت منوکسید کربن دارند و با کاتالیست های نیکلی بسیار خوب کار می کنند و ارزان تر از پلوتونیم هستند. از گرمای خروجی پیل سوختی می توان برای کارهای صنعتی و صنایع وابسته به کشاورزی استفاده نمود. پیل سوختی کربنات مذاب در مقایسه با اکسید جامد دارای دو مشکل است؛ یکی پیچیدگی کار با الکترولیت مایع و دیگری باقیمانده های واکنش های شیمیایی در پیل سوختی کربنات مذاب است.

در پیل سوختی کربنات مذاب، الکترولیت از ترکیب ۳۲٪ کربنات پتاسیم و ۶۸٪ درصد کربنات لیتیم میباشد. الکتروکاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیمی شده و الکتروکاتد از جنس آلیاژ نیکل کروم (۲ تا ۱۰ درصد کروم) است و درجه حرارت کارکرد آن در حدود ۶۵۰ درجه سانتی گراد می باشد که جزو پیل های سوختی با دمای کارکرد بالا محسوب می شود. درآند، هیدروژن با یون ها واکنش می دهد و دی اکسید کربن، آب و الکترون تشکیل می دهد. الکترون ها توسط یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل میشوند و برق تولید می کنند. اکسیژن هوا و دی اکسید کربن از آند به کاتد رفته و با الکترون ها واکنش داده و یون های



در واکنش‌های آند از یون‌های کربنات الکترولیت استفاده می‌شود؛ لذا نیاز است از طریق تزریق دی‌اکسیدکربن در کاتد این مقدار جبران گردد. [۱۹]

### مزایا

امکان استفاده در سیستم‌های CHP و CCHP

### معایب

حساسیت زیاد به سولفور

حل شدن اکسید نیکل

احتیاج به چرخه دی‌اکسید کربن

### مزایا

عدم حساسیت به منوکسیدکربن

قابلیت استفاده از سوخت‌های گوناگون

عدم نیاز به هیدروژن خالص

عدم نیاز به سوخت مجزا

امکان استفاده مستقیم از گاز طبیعی به عنوان

سوخت

قابلیت استفاده در سیستم‌های CHP و CCHP

عدم استفاده از الکترولیت مایع

عدم استفاده از فلزات گران قیمت

و کمیاب در ساخت

### معایب

طولانی بودن زمان شروع به کار

شدید بودن خوردگی و خرابی اجزاء به

دلیل کار کردن در دماهای بالا

گران قیمت بودن برخی از اجزاء

### پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

پیل سوختی اکسید جامد از یک الکترولیت سرامیکی ( ترکیبی از زیرکنا و ایتریا با فرمول  $Zr_{0.92}Y_{0.08}O_{1.96}$  به جای یک الکترولیت مایع استفاده میکند الکتروود آند، آلیاژی از نیکل و زیرکنا و الکتروود کاتد از جنس منگنیت لانتانیم است. درجه حرارت کاری این پیل در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. الکترولیت جامد با الکتروودها که از مواد متخلخل مخصوصی تشکیل شده‌اند پوشانده می‌شوند. در دمای بالای عملکرد این پیل سوختی، یون‌های اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی عبور می‌کنند. [۱۸، ۱۹]

وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یون‌های اکسیژن از الکترولیت عبور می‌کند تا سوخت را اکسید کنند. اکسیژن ذخیره شده در کاتد معمولاً از هوا گرفته می‌شود. اکترون‌های ایجاد شده در آند از یک مدار خارجی عبور کرده و به کاتد می‌روند که این عمل باعث ایجاد جریان الکتریسیته می‌شود. همچنین پیل‌های سوختی نوع اکسید جامد نیاز به رفورمر خارجی ندارند.

[۱۸، ۱۹]

### مزایای استفاده از پیل سوختی به عنوان

#### محرك اولیه در سیستم‌های CCHP

محدوده وسیع ظرفیت: پیل‌های سوختی از سلول‌های کوچک در اندازه‌های مختلف ساخته می‌شوند که هر یک از آن‌ها می‌تواند از MW10 تا KW2 توان تولید نماید که این امر محدوده وسیعی از ظرفیت‌ها را فراهم می‌نماید که ترکیب آن‌ها تا ظرفیت‌های چند مگاوات را میسر خواهد کرد. بازده حرارتی در آن‌ها وقتی با سیستم‌های تولید پراکنده ترکیب شوند می‌تواند در محدوده ۶۵٪ تا ۸۵٪ قرار گیرد. گرمای تولیدی می‌تواند برای کاربردهای گرمایش، آب گرم مصرفی و سرمایش به کار رود. [۱۹]



## با محرک CCHP کاربرد سیستم‌های اولیه پیل سوختی در کشاورزی و صنایع وابسته به آن

با توجه به محصولات سیستم CCHP که شامل گرمایش، سرمایش و الکتریسیته است، می‌توان در زمینه‌های مختلف بخش کشاورزی از این سیستم بهره لازم را کسب نمود به‌کارگیری سیستم سرمایشی CCHP در سردخانه‌های محصولات کشاورزی به‌کارگیری سیستم گرمایش و سرمایش CCHP به عنوان تهویه مطبوع در سالن‌های پرورش طیور استفاده از سیستم گرمایشی CCHP در خشک کن‌ها و جوجه‌کشی‌ها بهره بردن از جریان الکتریسیته تولیدی در تمام سیستم‌های CCHP به عنوان منبع انرژی مورد نیاز در بخش کشاورزی که سهم به سزایی در مصرف انرژی کل کشور را دارا است.



کاربرد مناسب در بارهای جزئی: بازده پیل سوختی در بارهای کم و جزئی، بالا می‌باشد که این امر بازده کل سیستم را در مقایسه با سیستم‌های دیگر در شرایط مناسب‌تری نگه می‌دارد.

توان باکیفیت بالا: توان الکتریکی حاصل از پیل سوختی بالا و تلفات آن پایین می‌باشد

قابلیت اطمینان و عمر بالا: از آنجاکه اجزای متحرک در پیل‌های سوختی بسیار کم بوده و بیشتر مربوط به تجهیزات جانبی و کمکی می‌باشد قابلیت دوام و عمر آن‌ها بالا است.

آلودگی کم: تولید آلاینده‌ها در پیل سوختی بسیار کم است و فقط در فرآیند تبدیل سوخت اولیه به هیدروژن در آن‌هایی که با سوخت‌های غیر هیدروژنی کار می‌کنند آلاینده‌های کمی تولید می‌شود. [۱۹]

بازده بالا: بازده پیل‌های سوختی در انواع مختلف متغیر است که بستگی به نوع و طراحی آن‌ها دارد؛ اما بازده الکتریکی در محدوده ۳۰٪ تا ۵۰٪ قرار می‌گیرد. [۱۹]

کارکرد آرام و کم‌صدا: به علت سروصدای پایین آن‌ها داخل ساختمان نیز می‌تواند نصب شود.

تنوع سوخت مورد استفاده: سوخت اصلی پیل سوختی، هیدروژن است که می‌تواند بيو گاز، متانول و LPG، از گاز طبیعی سوخت‌های کربنی دیگر تأمین شود که این امر کارایی آن‌ها را بالا می‌برد. [۱۹]



[1] Chicco G., Mancarella P., "Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development", *Energy Policy*, 2007, 35, PP 6132–44.

[2] Rentizelas A., Karellas S., Kakaras E., Tatsiopoulos I., "Comparative technoeconomic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications", *Energy Conversion and Management*, 2009, 50, PP 674–81.

[3] Deng J., Wang RZ., Han GY., "A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37, PP 172–203.

[4] Kavvadias KC., Tosios AP., Maroulis ZB., "Design of a combined heating, cooling and power system Sizing, operation strategy selection and parametric analysis", *Energy Conversion and Management*, 2010, 51, PP 833–45.

nomics of a trigeneration system in a hospital", *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26, PP 680–7.

از آنجایی که سیستم‌های CCHP قابلیت تولید هم زمان برق، گرمایشو سرمایه‌ش را دارند، می‌توانند به‌عنوان یکی از مؤثرترین سیستم‌ها برای مکان‌های عمومی، تجاری، صنعتی و به‌خصوص بخش کشاورزی که سهم زیادی در مصرف انرژی دارد، استفاده شوند. استفاده از محرک‌های اولیه جدید می‌تواند باعث گسترش و توسعه این سیستم‌ها گردد. با توجه به تکنولوژی مناسب پیل سوختی و مزایای ذکرشده‌ی آن، استفاده از پیل سوختی به‌عنوان محرک اولیه‌ی سیستم‌های CCHP توصیه می‌شود. با این حال استفاده از پیل سوختی هزینه بالایی دارد که با پیشرفت تکنولوژی در آینده و ساخت مواد مناسب‌تر و با هزینه کمتر می‌توان هزینه اولیه مربوط به پیل سوختی را کاهش داد. استفاده از سوخت‌های متنوع نیز از مهم‌ترین مزایای پیل سوختی می‌باشد. با توجه به انواع پیل‌های سوختی ذکرشده و مزایای آن‌ها از دو نوع سیستم پیل سوختی کربنات مذاب و اکسید جامد که دارای قابلیت کارکرد در دمای بالاتری هستند می‌توان به‌عنوان محرک اولیه در سیستم‌های CCHP استفاده نمود.



## درک پیچیدگی هم بست آب- انرژی- غذا در مسیر توسعه پایدار

پیام آموزگاری 

دانشجوی دکتری آبخیزداری،   
احیاء مناطق خشک و کوهستانی،  
دانشگاه تهران

P.amouzegar@ut.ac.ir 

رشد جمعیت و به تبع آن افزایش تقاضا باعث تحمیل فشار به منابع محدود حوزه های آبخیز شده است. به نحوی که موازنه بین منابع موجود و نیازهای رو به رشد جوامع انسانی بهم ریخته است (Mohtar و Daher، 2012).

در این میان آب منبعی کلیدی برای همه ی پدیده های زیستی از جمله انسان و کالایی ضروری برای توسعه اقتصادی- اجتماعی کشورها و یکی از مؤلفه های مهم در حفظ تعادل و پایداری اکوسیستم و محیط زیست است (Nazemi و Madani، 2018).

توزیع غیر یکنواخت آب در سطح کشور، الگوی نامناسب توسعه شهری، نوع و شیوه تولید محصولات زراعی از نظر سازگاری با اقلیم و بروز خشکسالی های متوالی در سال های اخیر دسترسی به آب را با چالش مواجه ساخته است، به طوری که تأمین آب قابل دسترس برای مصارف مختلف، یکی از دغدغه های مهم دولت محسوب می شود (Amouzegari 2017).

کشور ایران به لحاظ وضعیت جغرافیایی و زمین شناسی خاصی که دارد، به طور طبیعی در معرض تخریب های گوناگون بوده و در طی دهه های اخیر به دلیل مدیریت غیر اصولی منابع خاک و آب به وضعیت نامناسبی رسیده است. فرسایش کمی و کیفی خاک یکی از نمودهای تخریب اراضی و با سطح تأثیر گسترده می باشد که به عنوان چالشی اساسی در مدیریت منابع طبیعی و دستیابی به توسعه پایدار محسوب می شود. (Sadeghi و همکاران، 2015)

رشد جمعیت و طبعا افزایش تقاضا باعث تحمیل فشار به منابع محدود حوزه های آبخیز شده است. به نحوی که موازنه بین منابع موجود و نیازهای رو به رشد جوامع انسانی بهم ریخته است. بخش کشاورزی در ایران که محدودیت ذاتی منابع آب دارد، برداشت کننده حدود ۹۰ درصد از منابع آبی کشور است و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور دارد. از طرفی در یک نگاه بلند مدت، قیمت پایین انرژی و آب انگیزه محافظت و استفاده عقلانی از این منابع را در ذهنیت بهره بردار ایجاد نکرده است. این درحالیست که بین آب، انرژی و غذا روابط بسیار بهم پیوسته و درهم تنیده ای برقرار است. بنابراین در برنامه ریزی برای توسعه پایدار نیازمند درک و دانستن روابط متقابل بین آب، انرژی و غذا هستیم تا بتوانیم با مدیریت هماهنگ و مرتبط آنها از منابع طبیعی کشور محافظت نماییم.

کلمات کلیدی: امنیت آبی، امنیت غذایی، هم بست آب-انرژی-غذا، توسعه پایدار، انرژی





قنات ها، رودخانه ها و تالاب ها و ... و همچنین معضلات اجتماعی مثل مهاجرت، فقر و فحشاء و .. در حوزه های آبخیز نمود پیدا می کند که همگی بازخورد بی توجهی به پویایی طبیعت و عدم توجه به توسعه پایدار است. (Amouzegari و همکاران، 2020)

در سه دهه اخیر جمعیت ایران کمتر از دو برابر و در مقابل تعداد سدها بیش از سی برابر رشد داشته اند (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۹) که بیانگر علاقه مندی مدیران به مهندسی مطلق و عدم بهره جویی از رویکردهای نرم در مدیریت محیط است. در سایه ورشکستگی آبی حوزه های آبخیز کشور، اهمیت روش های غیرسازه ای و نرم به منظور افزایش بهره وری از آب روشن میشود. در عصر حاضر که رقابت بر سر منابع محدود، اعم از انرژی، آب و غذا روز به روز شدیدتر میشود، توانمندسازی کشاورزان جهت افزایش بهره وری مصرف آب و انرژی برای تولید غذا ضروری است. بر همین اساس توجه به رویکرد هم بست آب-انرژی-غذا یکی از گام های ضروری برای رسیدن توسعه پایدار می باشد عبارتی به میزانی که ارتباط پیچیده بین آب، غذا و انرژی درک شود و مدیریت آنها هماهنگ و مرتبط صورت بگیرد، از هدر رفتن منابع در حوزه های آبخیز، جلوگیری بیشتری انجام خواهد شد (Maghrebi و همکاران، 2020)



تغییرات اقلیم از طریق ایجاد بی نظمی در چرخه هیدرولوژیکی آب، مدیریت این شرایط را پیچیده تر کرده است. (Konikow و Kendy، 2005).

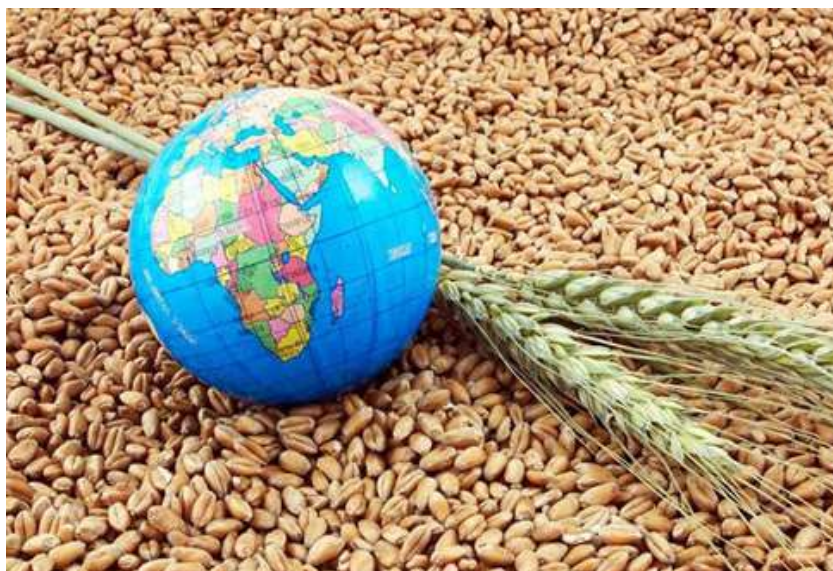
بخش کشاورزی که در ایران نقش استراتژیک در اقتصاد سیاسی و تولید ملی دارد، برداشت کننده حدود ۹۰ درصد از منابع آبی کشور است. (و همکاران، 2020 Maghrebi)

لذا نمی توانیم مدیریت منابع آب و مدیریت کشاورزی را جدای از هم در نظر بگیریم. بطوریکه که موفقیت در توسعه پایدار کشور نیازمند مدیریت هماهنگ و مرتبط بخش کشاورزی و بخش آب است. از طرفی بخش کشاورزی که وظیفه تأمین امنیت غذایی کشور را برعهده دارد نقش و سهم مهمی در تولید و مصرف انرژی دارد. یعنی بین بخش کشاورزی و بخش انرژی هم رابطه ای پیچیده و درهم تنیده وجود دارد. پیچیدگی مسائل گوناگون محیط زیست در کنار قدرت محدود ذهن انسان نسبت به درک آن، عموماً تصمیم گیرندگان این حوزه را به سمت ساده سازی مسائل سوق داده است. (Madani، 2020)

مثال ملموس این ادعا کثرت طرح های انتقال آب و سدسازی بی رویه در مناطق مختلف ایران زمین است. رشد سدسازی که بمنظورهای مختلف مثل مهار سیل، تولید انرژی و تأمین آب برای شرب، صنعت و کشاورزی بوده است شکوفایی اقتصادی کوتاه مدتی را برای جوامع ذینفع به همراه داشته که تصمیم گیرندگان و مدیران را از توجه به اثرات منفی دراز مدت سدسازی غافل کرده است. (Gabriel، 2017)

نتیجه این غفلت به مرور زمان بصورت معضلات محیط-زیستی مثل وقوع ریزگردها، خشک شدن چشمه ها





## امنیت غذایی و چالش های پیش رو

صنعت کشاورزی که برداشت کننده حدود ۹۰ درصد از منابع آبی کشور است، با برآورده کردن حدود ۹۰ درصد از نیازهای غذایی کشور و فراهم کردن زمینه اشتغال

بسیست درصدی و همچنین تامین ۱۰ درصد از تولید ناخالص داخلی، نقش استراتژیک در اقتصاد سیاسی و تامین امنیت غذایی ایران بازی می کند. یکی از اهداف اصلی ایران طی چند دهه گذشته، دستیابی به خودکفایی غذایی بوده که این امر کماکان بطور کامل محقق نشده است (Maghrebi و همکاران، ۲۰۲۰)

با توجه به آثار تحریم های بین المللی که کاهش ظرفیت واردات غذایی یکی از پیامدهای احتمالی آن است، کمبود آب در ایران می تواند به تهدیدی جدی برای امنیت غذایی کشور بدل شود. (Madani, 2020).

با وجود افزایش تولیدات کشاورزی در دهه های اخیر، به دلیل افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به منابع غذایی و همچنین کاهش حجم منابع آب در دسترس، بویژه در دوران خشکسالی، هدف خودکفایی غذایی محقق نشده و واردات مواد غذایی ادامه یافته بطوریکه ایران نهمین واردکننده گندم و سومین واردکننده برنج در دنیا در پایان قرن بیستم بوده است (Maghrebi و همکاران، ۲۰۲۰) در واقع توسعه کشاورزی در ایران با استفاده بی رویه از منابع آب از طریق ساختن سد و احداث چاه های متعدد ممکن شده است که نتیجه آن کاهش چشمگیر حجم ذخایر

آب تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر بوده است. در حالیکه این توسعه ناپایدار کشاورزی میتواند در کوتاه مدت جوابگوی برخی نیازهای کشور در زمینه تامین غذا و اشتغال زایی باشد، اما آثار دراز مدت آن بر منابع آبی سطحی و زیرزمینی باعث ورشکستگی آبی کشور شده است که می تواند شرایط غیرقابل بازگشت را رقم بزند. بعلاوه، نفوذ آب شور در نتیجه کاهش سطح سفره های آب زیرزمینی و هم چنین عدم وجود سیستم های زهکشی مناسب، سبب افزایش شوری در زمین های زراعی شده است که باعث محدودیت تولیدات کشاورزی و تنوع محصول شده است. در حال حاضر ایران براساس استاندارد فائو دارای ۴۱ میلیون هکتار (۲۵ درصد) زمین شور است. با این وجود دولت در مورد افزایش سطح زیرکشت برای افزایش تولیدات کشاورزی و اشتغال زایی بسیار مصمم است. یکی دیگر از چالش های بحث امنیت غذایی مربوط به استفاده از کودهای شیمیایی برای افزایش تولیدات غذایی است. در اوایل دهه ۷۰ سالیانه تقریباً دو میلیون تن کود شیمیایی مصرف میشده است. این میزان در طول سه دهه، در راستای سیاست های خودکفایی غذایی دو برابر شده است که کیفیت آبخوان های کشور را در معرض آلودگی ناشی از نیترات قرار داده است.



## امنیت آبی

بر ابعاد اقتصادی و زیست محیطی، دارای ابعاد اجتماعی، سیاسی و امنیتی بوده که دارای تعامل پویا و غیرخطی با مسائل اجتماعی، سیاسی و امنیتی در ابعاد محلی، منطقه ای، ملی و بین المللی می باشند. (Mianabadi ، 2016)

### ورشکستگی آبی

کلید واژه ورشکستگی آبی تصویر قابل درکی از وضعیت فعلی منابع آب در ایران را مجسم می کند. چرا که برداشت آب در ایران بطور قابل توجه ای از ظرفیت تجدید پذیری و تغذیه مجدد آب های سطحی و زیرزمینی فراتر رفته است. بعبارتی بدهی ها (برداشت آب) از دارایی ها (نرخ تغذیه آبخوان ها و میزان تجدیدپذیری منابع آب سطحی) تجاوز کرده است و کشور از نظر منابع آبی در وضعیت ورشکستگی آبی قرار گرفته است در حالت معمول، بعد از ورشکستگی یک

آب بعنوان یک منبع طبیعی مشترک بین ذی مدخلان مختلف (محلی، منطقه ای، ملی و بین المللی)، مرزهای سیاسی و انسان ساخت را به رسمیت نمی شناسد. ارتباط مستقیم بین امنیت آبی، امنیت انسانی و امنیت ملی دولت ها سبب شده که سامانه های آبی به نحو اجتناب ناپذیری به یک مقوله سیاسی و امنیتی در دنیا تبدیل شود و پیوند درهم تنیده آب، سیاست و امنیت را ایجاد کند. (Mianabadi و همکاران، 2015)

امنیت آبی و امنیت غذایی بخش مهمی از امنیت ملی هر کشور هستند. افزایش مصرف آب، تغییر اقلیم و افزایش رقابت های سیاسی بین کشورها باعث شده است که تأمین امنیت آبی به عنوان یک پیش نیاز الزامی امنیت غذایی و امنیت ملی، به یکی از اصول شناخته شده در مباحث طرح ریزی استراتژیک هر کشور تبدیل شود. منابع آب بعنوان یک سیستم پیچیده انسانی- طبیعی، علاوه بر





بنظر میرسد ایران همچنان از طرفیت کافی برای غلبه بر ورشکستگی سیستم آبی برخوردار است. آنچه مسلم است کشاورزان و رهبران سیاسی کشور با بده بستان های حساسی میان آب، غذا و انرژی روبرو هستند و اگر یک عزم ملی و سیاسی جدی برای غلبه بر ورشکستگی آبی و سوق دادن کشور بسمت پایداری شکل نگیرد، در یک افق بلند مدت ظهور فجایع گوناگون محیط زیستی تمامی زمینفع ها و تصمیم گیرندگان را وادار به تغییر رفتار خواهد کرد. (Gabriel، 2017).

اکنون در زمینه ورشکستگی آبی کشور، تصمیم گیرندگان با دو انتخاب مواجه اند. یا باید تغییرات و اصلاحات در رابطه با آب را آغاز کنند و سختی تغییر در طول زمان را متحمل شوند تا از وخیم تر شدن اوضاع جلوگیری شود و یا وضعیت فعلی را ادامه دهند و کشور را بسمت پیامدهای خشونت آمیز محیط زیستی در آینده سوق دهند. (Madani و همکاران، 2016).

سیستم، معمولا برای مدت کوتاهی، سیستم قادر به ادامه فعالیت خود خواهد بود. اما برای تداوم و بقای بلندمدت، بعنوان بخشی از تصفیه حساب خود با واقعیت، انجام اصلاحات قابل ملاحظه و دردناک در سیستم اجتناب ناپذیر است. (Madani و همکاران، 2016).

زمانی که میزان برداشت از منابع آب بیشتر از نرخ طبیعی تغذیه شود، تنها گزینه های بلندمدت برای پوشش ضعف سیستم، انتقال تقاضا بسمت مناطقی که آب کافی دارند، و یا بهره برداری از منابع آبی پر هزینه و گران مانند شیرین کردن آب دریا و واردات کالاهایی که از سرزمین هایی با آب کافی تولید شده اند، معادل انتقال آب مجازی از طریق این کالاهای می باشند

(Peter و همکاران، 2010).

مفهوم ورشکستگی آبی کشور دربر گیرنده این حقیقت است که ممکن است تأمین آب کشور به اندازه ای پرهزینه و انرژی بر تمام شود که در کنار اعمال تحریم های اقتصادی باعث تغییر رفتار و نگرش مدیران در تصمیم گیری هایشان در مورد واردات و صادرات و نیز تغییر کشت محصولات شود.







## امنیت انرژی

آب-انرژی-غذا مورد توجه قرار گیرد. پیش بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰، تقاضای جهانی آب برای تولید برق در حدود ۵۵ درصد افزایش خواهد یافت. لذا انتظار می رود که بیش از ۴۰ درصد جمعیت جهان تحت تنش شدید آبی قرار گیرند. (Unesco, 2014)

که کشور ما هم از این قضیه مستثنی نیست. استخراج آبهای زیرزمینی نیاز به مقدار قابل توجهی از انرژی دارد، که اگر کشاورز بابت این انرژی هزینه ای را بپردازد، عملا پی می برد که اگر به شیوه صحیحی که کمترین میزان هدر رفت منابع آبی را در پی داشته باشد فعالیت کشاورزی خود را انجام ندهد، نمی تواند به سود مورد نظر برسد لذا ناچار است از منابع تولید به درستی استفاده نماید. یعنی بهره بردارانی که بدون توجه به هزینه فرصت استفاده از عوامل تولید مخصوصا انرژی و آب، صرفا بخاطر مالکیت بخشی از عوامل تولید (داشتن زمین)، مشغول به فعالیت کشاورزی با بازدهی پایین هستند به ناچار

نظر به موقعیت جغرافیایی ایران و واقع شدن در محدوده ای از زمین که دارای منابع انرژی فراوان است، انرژی در کشور یک منبع نسبتا ارزان است و این باعث شده است که دغدغه ای که برای امنیت آب و غذا در کشور وجود دارد در مورد انرژی مطرح نباشد. در چنین شرایطی بهره برداران مختلف در حوزه کشاورزی و صنعت، فعالیت های خود را با پیش فرض تقریبا رایگان بودن انرژی ادامه می دهند که نتیجه آن هدر رفتن انرژی و نیز کاهش بهره وری در بخش آب و غذا می باشد. (Gabriel, 2017).

کاهش ذاتی منابع آبی کشور و نگرانی هایی که در مورد امنیت آبی و به تبع آن امنیت غذایی وجود دارد، منعکس کننده ی ضرورت توجه به هزینه فرصت استفاده از انرژی است بنابراین برای داشتن توسعه پایدار و جلوگیری از هدر رفتن منابع آب و انرژی میبایست ارزش واقعی منابع با روش های علمی مشخص شود. و (Amouzegari و همکاران، 2020) در مدیریت این منابع رویکرد هم-بست



های پیوند آب-انرژی-غذا وجود داشته باشد.

### ضرورت هم بست آب-انرژی-غذا

هم بست آب-انرژی-غذا رویکردی جهت ارزیابی، توسعه و اجرای سیاست است که بصورت همزمان بر امنیت آب، انرژی و غذا متمرکز است. این رویکرد به دنبال توسعه پایدار است و باعث می شود سرمایه های طبیعی و اجتماعی در یک بازه بلند مدت محافظت شوند. (Bizikova و همکاران، 2014)

این رویکرد تقویت کننده امنیت سه سامانه آب، انرژی و غذا است و نیز اثرات متقابل این سه سامانه را مد نظر دارد (شکل ۱). اولین گزارش در مورد لزوم هم بست آب-انرژی-غذا مربوط به کنفرانس (Bonn) در سال ۲۰۱۱ بوده که تهیه آن را بعنوان یک راه حل جامع برای اقتصاد سبز مورد تاکید قرار داد. همچنین در این خصوص می توان به نشست امنیت آب در سال ۲۰۱۱ برای معرفی معیارهای مهم در توسعه چارچوب مفهومی هم بست اشاره کرد. همچنین نشست بمنظور برجسته کردن ارتباط بین (Rio+۲۰) آب، امنیت غذایی، تغذیه و کشاورزی پایدار، بهداشت، تنوع زیستی و بیابان زدایی به لزوم توجه به رویکرد آب-انرژی-غذا تاکید کرده اند. (Mohtar و همکاران، 2015)

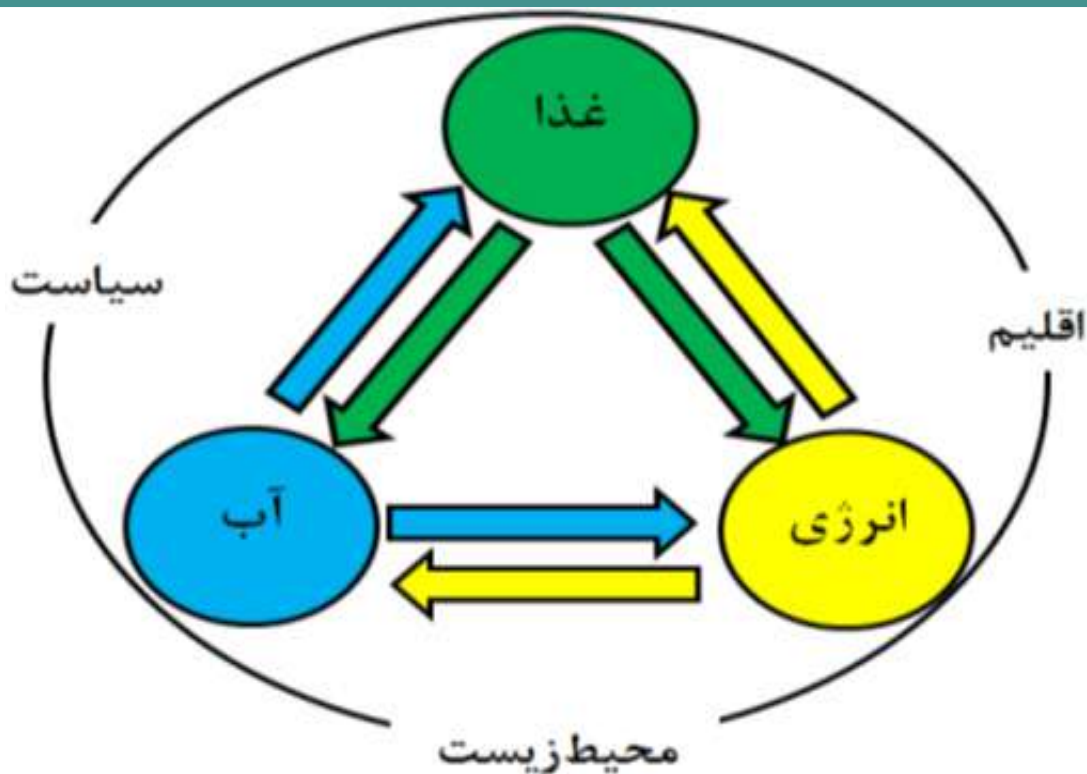


در جهت کشاورزی هدفمند با بازدهی بالا قرار خواهند گرفت و بدینوسیله می توان از هدر رفت حجم بسیار زیادی از منابع آب زیرزمینی که در بخش کشاورزی استفاده می شود و نیز هدر رفتن انرژی، جلوگیری به عمل آورد. (Amouzegari و همکاران، 2020)

اقدامات دولت برای تحقق خودکفایی غذایی باعث شده تا برای کشاورزان، یارانه قابل توجهی به آب و انرژی داده شود، اگرچه شاهد بهبود در معیشت و بهره وری کشاورزی نشده است. این در حالیست که آب های سطحی در حال کمیاب شدن و سطح آبخوان ها در حال کاهش است. با این وجود دولت همچنان به پرداخت یارانه توجه ویژه ای دارد که باعث می شود انگیزه هرگونه حفاظت از منابع آب برای کاربران آب در بخش های خانگی، صنعتی و کشاورزی از بین برود. (Madani و همکاران، 2016)

همزمان با کاهش سطح ایستابی آبخوان، انرژی مورد نیاز برای استخراج آب زیرزمینی مستقیماً افزایش می یابد. در مورد آب های سطحی نیز فرآیند انتقال آب از منطقه ای به منطقه دیگر با صرف انرژی بسیار زیادی همراه است. در نهایت تنها منبع آبی که حداقل از نظر کمی پایان ناپذیر است، شیرین سازی آب دریاست که ضمن اینکه دارای اثرات منفی محیط زیستی هم می باشد، مستلزم مصرف انرژی بسیار زیادی است. (Gabriel, 2017).

زیرا پمپاژ آب از سطح دریا به ارتفاعات فلات مرکزی ایران یک چالش فیزیکی مهم است و بسیار انرژی بر خواهد بود. در یک حالت منطقی و با در نظر داشتن موضوعات مصرف انرژی و هزینه تأمین آب متعارف برای مزارع کشت غلات در شرایط ایران، موضوع آب شیرین شده دریا تنها در شرایطی میبایست بررسی شود که تأثیرپذیری شدیدی بین مولفه



شکل ۱. مدل مفهومی هم بست آب-انرژی-غذا  
(Bizikova و همکاران، ۲۰۱۴)

زیرزمینی در استان های کشور کاملاً ضروری است.  
(Mirzaei و همکاران، ۲۰۱۹)

### نتیجه گیری

امنیت آب، انرژی و غذا در جهان کنونی به دلیل سرعت بالای افزایش جمعیت و به تبع آن فشارهای غیرقابل تحمل بر منابع با مشکل روبرو شده است. این وضعیت برای دولت های خاورمیانه و شمال آفریقا موسوم به منطقه منا که آب ناکافی دارند حادتر است. امنیت غذایی بعنوان یک چالش جدی در محدوده منا مطرح است. کشور ایران هم در منطقه امن واقع شده است. دسترسی محدود به آب، جمعیت بالا و بی ثباتی سیاسی، این منطقه را نسبت به کمبود مواد غذایی آسیب پذیر کرده است. بنابراین بحث امنیت غذایی همواره در دستور کار دولت های منطقه منا قرار داشته و در واقع میل این دولت ها به خودکفایی در مواد غذایی موضوعی مشترک در این منطقه بوده که اثرات چشمگیر بر منابع آب دارد.  
(Gabriel, 2017).

در استان تهران ۵۸ درصد، مازندران ۶۲ درصد، گیلان ۶۶ درصد، البرز ۶۷ درصد، اردبیل و گلستان ۷۷ درصد و مابقی استانها بالای ۸۲ درصد مصرف آب زیرزمینی مربوط به بخش کشاورزی است. بطور کلی در تمامی استان های کشور عمده مصرف آب زیرزمینی در بخش کشاورزی است. از منظر اقتصادی بهای ناچیز آب در کنار پایین بودن قیمت انرژی، عملاً افزایش مصرف و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی و انرژی را توجیه پذیر می کند (Amouzegari و همکاران، ۲۰۲۰)

بر پایه تفکر سیستمی در توسعه پایدار، پیوندهایی میان منابع آب، انرژی و تولید غذا در کانون توجه محافل علمی جهان قرار گرفته است. این مباحث ذیل عنوان هم بست آب-انرژی-غذا مطرح میشوند. در سایه ورشکستگی آبی کشور، توانمندسازی کشاورزان جهت افزایش بهره وری مصرف آب و انرژی برای تولید غذا و بهبود نظارت و مدیریت منابع آب زیرزمینی برای کاهش افت گسترده سطح آب



## منابع

1. Amouzegari Payam, Panahi Mostafa and Mirnia Seyed Khalagh. (B) "Local market analysis of groundwater resources exchange in Alashtar Watershed, Iran". Watershed Engineering and Management, 12, 2, 2020, 454-466.
2. Amouzegari Payam, Panahi Mostafa, Mirnia Seyed Khalagh and Daneshi Alireza. (A) "Estimation of preservation value of groundwater resources from the villagers' perspective in Alashtar Watershed, Iran". Watershed Engineering and Management, 12, 1, 2020, 57-71.
3. Amouzegari, P., 2017. Economic Valuation of Groundwater Resource Using Contingent Valuation and Market Prices Methods in Alashtar Plain. Thesis Submitted to the Department of Watershed Management Engineering for Degree of Master of Science (M.Sc.). Tarbiat Modares University. Tehran.Iran. 104p (In Persian)

نظر به ارتباط اجتناب ناپذیر بین منابع آب و تولید غذا و روابط بسیار درهم تنیده بین این دو بخش با مصرف انرژی ضروری بنظر می رسد که مدیریت آب، غذا و انرژی می بایست مرتبط و هماهنگ با یکدیگر انجام شود. بنابراین در برنامه ریزی برای توسعه پایدار درک پیچیدگی و بازخوردهای بین هم بست آب-انرژی-غذا باید در نظر گرفته شود. (Naderi و همکاران، 2021)

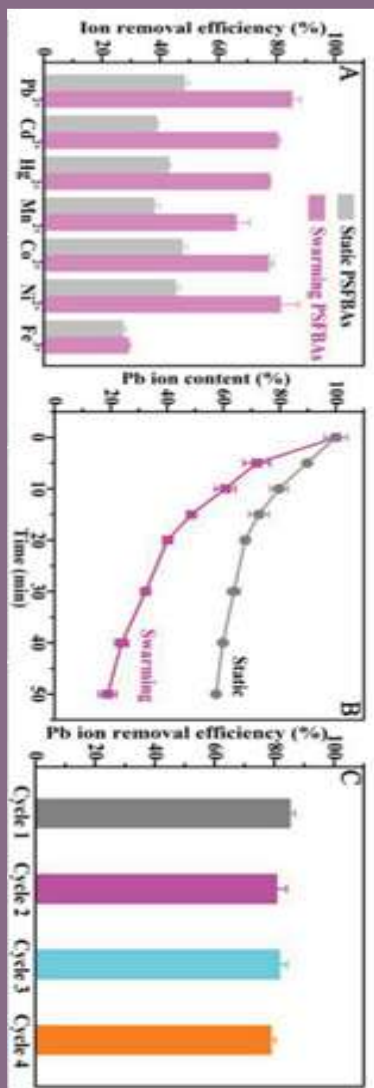
این موضوع بویژه در کشور ایران که تحت تحریم های اقتصادی بین المللی نیز قرار دارد بسیار مهم است چرا که تحریم اقتصادی اگر چه عامل مشکلات محیط-زیستی نیست اما می تواند یک شتاب دهنده باشد و فرآیند تخریب محیط زیست را در اقتصادهای تحت فشار تسریع کند. (Madani ، 2020)







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



عمار صالحی<sup>۱</sup>  
سلیمان حسین‌پور<sup>۲</sup>

دانشجوی دکتری مهندسی  
مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران<sup>۱</sup>  
دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های  
کشاورزی، دانشگاه تهران<sup>۲</sup>

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



## چکیده

در چند سال گذشته جهش چشم‌گیری در فناوری میکروباتیک وجود داشته است که باعث شده این رشته جدید به سرعت در حال رشد باشد. با وجودی که میکروبات‌ها به صورت گسترده برای کاربردهای مختلف به خصوص در پزشکی و سلامت مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما کاربردهای میکروبات‌ها در کشاورزی و صنایع غذایی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش پتانسیل‌سنجی کاربردهای فناوری میکروباتیک 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 میکروباتیک قابل اجرا خواهند بود.

## کلمات کلیدی

میکروباتیک، کشاورزی، صنایع غذایی، فناوری‌های نوین، میکروبات مغناطیسی

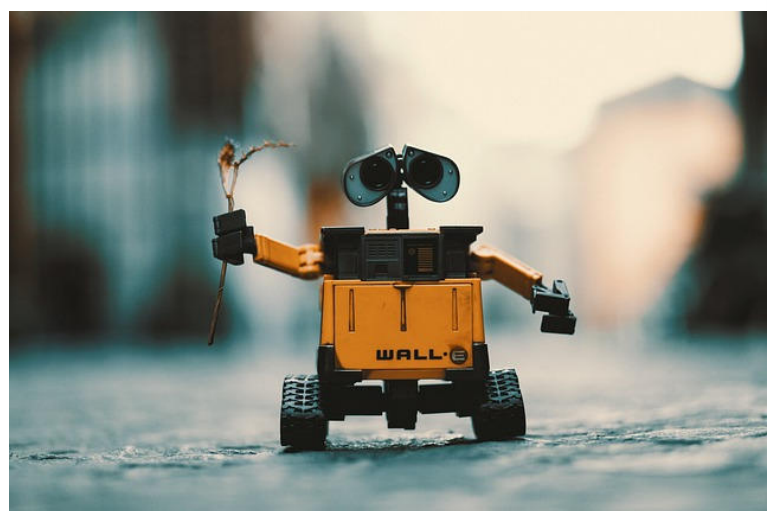
## مقدمه

میکروباتیک 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 «microbotics» (تا لحظه نگارش این مقاله) در گوگل اسکالر

۲۲۷۰۰ رفرنس را در پی دارد. تاکنون تعریفی جامع، استاندارد و مورد توافق از «میکروبات» ارائه نشده است، با این حال با ترکیب تعاریف ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف، می‌توان میکروبات‌ها 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 میکروبات تقریباً ناچیز هستند. (N Chaillet & Régnier, 2013; Sitti, 2017).

بسته به چیدمان اجزاء میکروبات‌ها (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 میکروبات‌ها 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 میکروروبات‌ها 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 میکروروبات‌ها به صورت گسترده برای کاربردهای فوق‌مورد 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 میکروروبات‌ها در کشاورزی و صنایع غذایی شده است. بر خلاف ربات‌ها در مقیاس‌های بزرگ‌تر، تجهیز میکروروبات‌های 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 میکروروبات و فعال‌سازی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این چالش، نتیجه‌ی محدودیت‌های مربوط به ابعاد داخلی میکروروبات‌هاست 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 میکروروبات‌ها پاسخگو نیست و در نتیجه میکروروبات‌ها نیازمند استراتژی‌های فعال‌سازی و کنترل جدیدی هستند.

برای حل این چالش، یعنی تأمین توان و فعال‌سازی میکروروبات‌ها، 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 برخوردار 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 میکروروبات‌ها، 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 میکروروبات که در آن ساختار فعال ساز مشخص می شود از اهمیتی زیادی برخوردار است؛ زیرا پس از انتخاب رویکرد، نوع و کاربرد میکروروبات، می توان معادلات دینامیکی آن را فرمول بندی کرد. در این پژوهش پتانسیل های استفاده از سیستم فعال سازی برای کنترل میکروروبات های مغناطیسی در کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار می گیرد. در سیستم های مغناطیسی دائمی دورانی یا آهنرباهای دائمی، پارامترهای میدان مغناطیسی در فضای کاری با تغییر موقعیت یا جهت آهنربای فعال ساز (و یا هر دو به صورت همزمان) کنترل می شود، در حالی که در سیستم های الکترومغناطیسی با سیم پیچ، میدان مغناطیسی تولید شده از طریق جریان های سیم پیچ کنترل می گردد.

انتخاب رویکرد مناسب و نوع میکروروبات که در آن ساختار فعال ساز مشخص می شود از اهمیتی زیادی برخوردار است؛ زیرا پس از انتخاب رویکرد، نوع و کاربرد میکروروبات، می توان معادلات دینامیکی آن را فرمول بندی کرد. در این پژوهش پتانسیل های استفاده از سیستم فعال سازی برای کنترل میکروروبات های مغناطیسی در کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار می گیرد. در سیستم های مغناطیسی دائمی دورانی یا آهنرباهای دائمی، پارامترهای میدان مغناطیسی در فضای کاری با تغییر موقعیت یا جهت آهنربای فعال ساز (و یا هر دو به صورت همزمان) کنترل می شود، در حالی که در سیستم های الکترومغناطیسی با سیم پیچ، میدان مغناطیسی تولید شده از طریق جریان های سیم پیچ کنترل می گردد.

### پیش نیازهای تئوری

در یک سیال، دو نوع نیرو و گشتاور بر حرکت میکروروبات های مغناطیسی غالب است: مغناطیسی و سیالات. اگر میکروروبات ها در نزدیک یک مرز حرکت کنند، اثر دیوار و نیروهای مرزی نیز حرکت آن ها را تحت تأثیر قرار می دهد. در میکروروبات های مغناطیسی، نیروها و گشتاور مغناطیسی اغلب تنها ورودی های کنترلی آن سیستم میکروروباتیک هستند که کنترل دینامیکی آن منجر به فعال کردن تغییرات نیروها و گشتاورهای دیگر می شود به طوری که نیرو و گشتاور برآیند حرکت مورد نظر را تأمین می کند.

میکروروبات های مغناطیسی معمولاً از فلزات با ویژگی پارامغناطیسی همچون آلیاژهای کبالت، نیکل و آهن ساخته می شوند تا از پاسخ سریع و بالای مغناطیسی آن ها برای کنترل و فعال سازی میکروروبات ها استفاده شود. قاعده کلی فعال سازی مغناطیسی، به حرکت در آوردن میکروروبات با استفاده از میدان و یا گشتاور مغناطیسی است. نیروی مغناطیسی که از آن برای به حرکت در آوردن میکروروبات استفاده می شود با گرادیان میدان مغناطیسی متناسب است در حالی که گشتاور مغناطیسی به میدان مغناطیسی مرتبط است که وظیفه ی هم تراز کردن مغناطش میکروروبات با میدان را به عهده دارد. میدان مغناطیسی دورانی به دلیل اثر نسبتاً طولانی مدت بر قدرت میدان ضعیف، بر میدان های گرادیان ارجحیت دارد. (Abbott et al., 2009).

در فعال سازی مغناطیسی با استفاده از سیم پیچ ها، میدان ایجاد شده معمولاً متناسب با جریان الکتریکی درون سیم پیچ ها در نظر گرفته می شود. این فرض در صورتی صحیح است که هیچ گونه ماده ای با ویژگی های پسماند مغناطیسی غیر خطی در نزدیکی آن نباشد. میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک سیم پیچ دایره ای با اعمال قانون بیو-ساوار برای هر دور سیم پیچ بیان می شود که با رابطه ۱ بیان می گردد:

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



که در آن جریان  $I^*$  رنده از سیم بر حسب آمپر ،  $\vec{B}_{ec}(xyz)$  میدان مغناطیسی ناشی از الکترومغناطیس در موقعیت میکروروبات بر حسب تسلا،  $N_t$  تعداد سیم های دور سیم پیچ،  $d\vec{l}$  یک قطعه خط بی نهایت کوچک در جهت انتگرال بر حسب متر ،  $\mu_0$  ضریب گذردهی خلا بر حسب تسلا در متر بر آمپر ،  $\vec{a}_R$  واحد بردار از قطعه خط  $d\vec{l}$  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  $d\vec{l}$  حامل جریان ثابت  $I$  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 برهم نهی صادق است؛ یعنی برای تعیین میدان کل، میدان موجود در هر یک از سیم پیچ ها با هم جمع می شوند. میدان مغناطیسی یکنواخت می تواند توسط یک جفت سیم پیچ هلمهولتز ایجاد شود. سیم پیچ هلمهولتز از دو سیم پیچ دایره ای شکل با شعاع و تعداد دور سیم پیچی یکسان که به صورت هم محور قرار گرفته اند تشکیل شده است و با فاصله ای برابر با شعاع سیم پیچ با جریان های یکسانی که در یک جهت همسان می گذرند از هم جدا شده اند. با عبور جریان از سیم پیچ ها، برآیند میدان الکتریکی مغناطیسی آن ها در حوالی نقطه میانی به صورت یک میدان تقریباً یکنواخت و موازی با محور این سیم پیچ ها خواهد بود. به منظور افزایش بهره وری انرژی و افزایش درجات آزادی کنترل موقعیت و جهت گیری میکروروبات ها، ترکیبی از هر دو سیستم الکترومغناطیسی و مغناطیسی دائمی را می توان در نظر گرفت.

هدایت و حرکت دقیق میکروروبات ها در حضور اغتشاشات خارجی ناشی از نویزهای محیط اطراف، نیازمند یک سیستم کنترل حلقه- بسته قوی و کارآمد است. در حقیقت، ماهیت سیستم های فعال سازی مغناطیسی ذاتاً ناپایدار است، بنابراین لازم است یک سیستم کنترلی دارای بازخورد برای سیستم های میکروباتیک فراهم گردد. از آن جا که میکروروبات های مغناطیسی باید در یک فضای کاری، یک یا چند وظیفه مشخص را انجام دهند، سیستم های ماشین بینایی نقش بسیار مهمی در ارائه بازخورد بر عهده دارند. از طرف دیگر به منظور جمع آوری اطلاعات مربوط به موقعیت و جهت میکروروبات ها 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، انعطاف پذیری بیشتری را به سیستم اضافه می کند. وظیفه اصلی آن تعیین موقعیت میکروروبات با استفاده از یک یا چند دوربین در فضای دو بعدی و سه بعدی و به صورت بلادرنگ است.

### کاربردهای عملی و بالقوه

همان گونه که پیشتر نیز عنوان شد کاربرد میکروباتیک در صنایع غذایی و کشاورزی بسیار محدود گزارش شده است. نمونه هایی از کاربرد میکروباتیک در این دو حوزه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. گروهی از دانشمندان در سال ۲۰۲۰ از میکروروبات های خودران دوگانه ی حساس به نور و مغناطیس استفاده کردند که به صورت فعال در داخل نوشیدنی ها حرکت کرده و

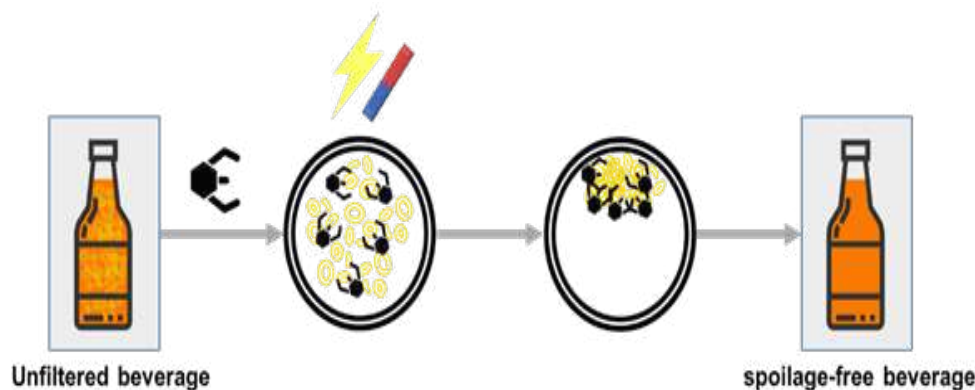


می‌توانند سلول‌های مخمر را گیر بیاندازد فرایند فعال‌سازی این میکروروبات‌ها و حذف مخمرها به ترتیب از طریق نانوذرات مغناطیسی قرارداده شده روی ربات‌ها و تابش نور مرئی روی سطح آن انجام می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان داد که میکروروبات‌ها توانستند تقریباً ۱۰۰٪ از مخمرهای باقی‌مانده در نوشیدنی‌های فیلترنشده را حذف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

در حوزه کشاورزی نیز اخیراً برخی از پژوهشگران توانستند از میکروروبات‌ها برای برداشت مواد شیمیایی با ارزش از سلول‌های 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 میکروروبات این سلول‌های غنی را استخراج می‌کنند به صورتی که بقیه گیاه دست نخورده باقی می‌ماند (Bae et al., 2021).

سیستم فعال‌سازی برای کنترل میکروروبات‌ها 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 نوشابه‌های 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 میکروروبات‌ها

بر اساس یک مطالعه انجام شده در سال ۲۰۱۲ میکروروبات‌ها (Campuzano et al., 2012) می‌توانند به طور موثر در آب سیب به حرکت درآیند و وظایف پیچیده‌ای مانند گرفتن، جمع آوری و رهاسازی دسته‌ای از میکروارگانیسم‌ها (مانند باکتری‌ها) را انجام دهند. در پژوهشی دیگر ترکیبی از نیسین که یکی از معمولترین باکتریوسین‌ها دارای ساختار پپتیدی است و به صورت طبیعی دارای ساختار

ضدباکتریایی است، و یک میکروروبات برای کشتن انتخابی باکتری‌های گرم مثبت استفاده از این میکروروبات (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 میکروروبات‌ها در گرفتن یا کشتن باکتری‌های مضر تقریباً دارای راندمان ۸۵

درصد در آبمیوه، شربت و آب لوله کشی بود. میکروروبات‌ها را می‌توان برای استحصال قند از درختان و برداشت مواد شیمیایی با ارزش از سلول‌های 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 ژن‌ها و پروتئین‌ها قابل استفاده می‌باشد. پژوهش‌های مشابهی برای کاربرد انتقال ژن توسط میکروروبات‌ها 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 میکروروبات‌ها 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 میکروباتیک 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 میکروروبات‌ها 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 میکروروبات‌های خود-پیشران که با نانوذرات نقره پوشش داده شده‌اند می‌تواند این عمل را با عملکرد بالاتری انجام داد. (Vilela et al., 2017)

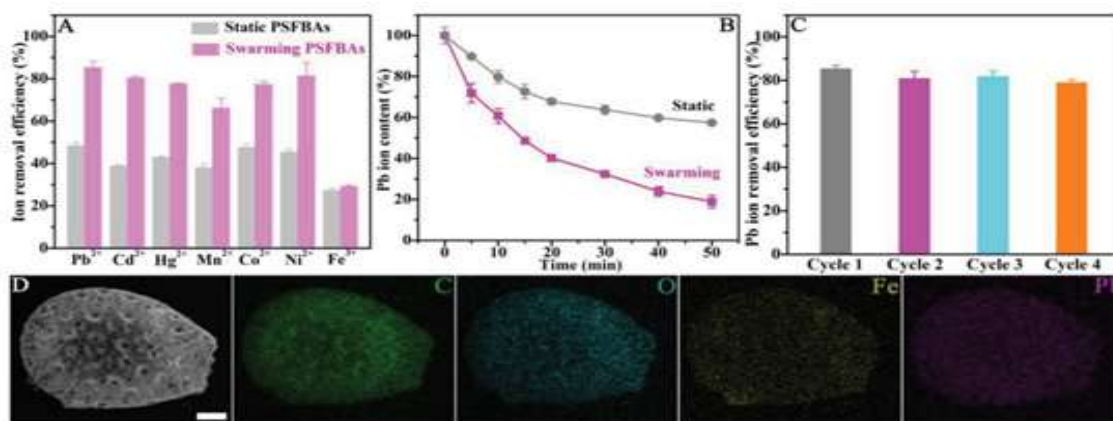
پس از جمع‌آوری و نابودی باکتری‌ها، از ویژگی مغناطیسی میکروروبات‌ها برای جمع‌آوری باکتری‌های مرده و خارج کردن آن‌ها از آب استفاده می‌شود. هم‌چنین میتوان از یک میکروروبات استوانه‌ای که از طریق میدان مغناطیسی کنترل می‌شود برای از بین بردن آلاینده‌های آلی و کشتن باکتری‌های مضر در آب استفاده کرد. (Bernasconi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

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



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 الگوهای برای سنتز میکروربات هایی استفاده کردند که توسط یک میدان مغناطیسی کنترل و بازیافت می شدند (Zhang et al., 2018). میکروربات ها 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)

آب به میکروربات ها موثر هستند. علاوه بر کاربردهای ذکر شده می توان از سیستم میکروباتیک برای تعیین کمیت مکانیک رشد سلول های گیاهی زنده در حال رشد استفاده کرد. رشد سلول های گیاهی فرآیندی اساسی در طول نمو گیاه است و جامعه زیست شناسی رشد با استفاده از رویکردهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، ژنتیکی، ریاضی و مدل سازی، رشد سلولی را از جنبه های مختلف مورد مطالعه قرار می دهند. سیستم میکروباتیک توسعه داده شده قادر به تعیین خصوصیات مکانیکی خودکار سلول های گیاهی زنده در محیط آزمایشگاهی در هنگام تکثیر و رشد این سلول خواهد بود یکی از چالش ها در حوزه صنایع غذایی، وجود فلزات سنگین در زنجیره غذایی است. فلزات سنگین به آسانی زیست تخریب پذیر نیستند و



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

با الهام از خاصیت چسبندگی قوی پای صدف، گروهی از دانشمندان از پلی دوپامین خود پلیمریزه پوشیده شده بر روی سطوح نانوذرات  $Fe_3O_4$  برای تولید میکروربات های مغناطیسی استفاده کردند که روشی مناسب برای جذب، انتقال و بازیافت آلاینده های میکروپلاستیک میکروپلاستیک تحت یک میدان مغناطیسی دوار خارجی ارائه می کنند.

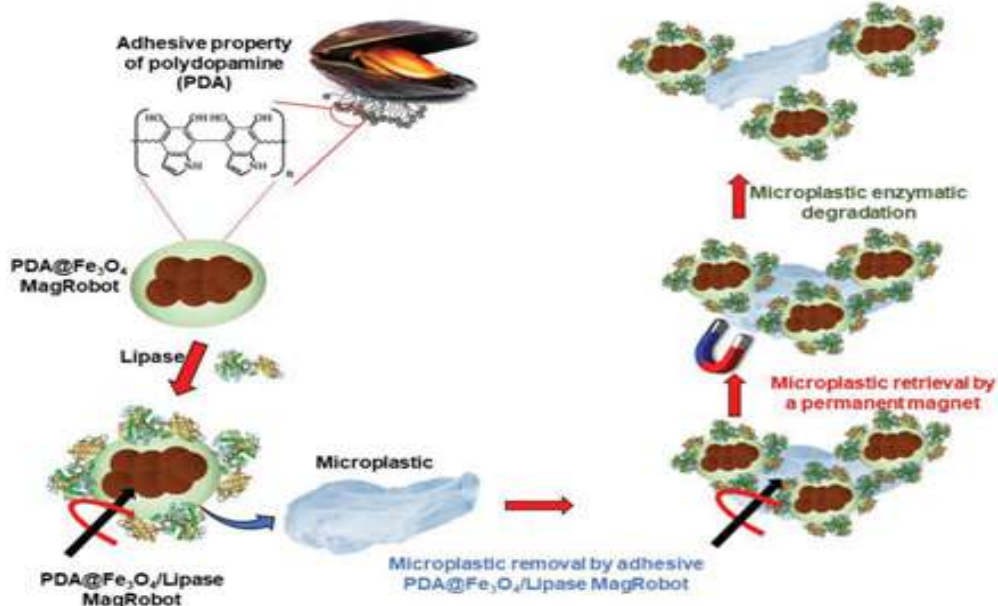
در فناوری میکروباتیک می توان فرآیند «جذب» و فوتوکاتالیز را برای حذف همزمان آلاینده های آلی از آب ترکیب کرد. گزارش های متعددی وجود دارد که میکروپلاستیکها در غذا و آب آشامیدنی شناسایی شده است که ممکن است امنیت غذایی، ایمنی غذا و سلامت انسان را به خطر بیندازد. (Liu et al., 2021).



میکروپلاستیک‌های پلی‌کاپرولاکتون را در حین گرفتن آنها تخریب کند. (شکل ۳)

(Zhou et al., 2021)

علاوه بر این، آنها نشان دادند که لیپاز تثبیت شده روی میکروروبات‌ها می‌تواند.



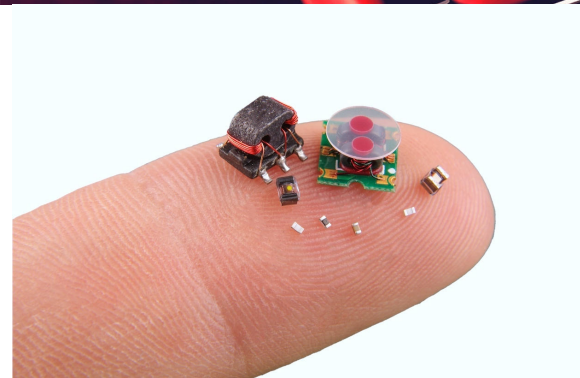
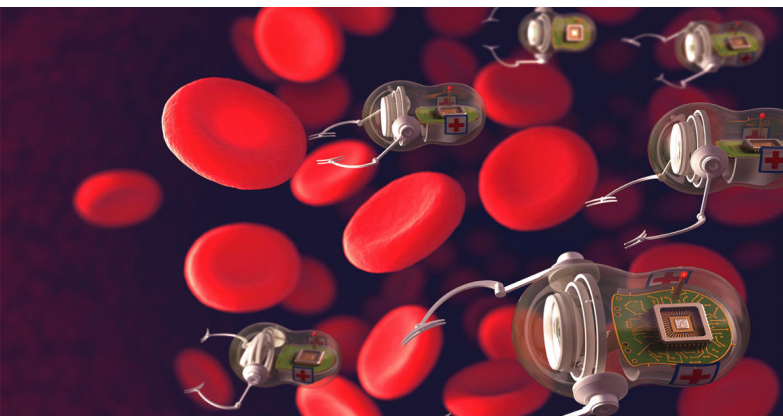
شکل ۳- تصویر شماتیک حذف میکروپلاستیک توسط میکروروبات موسوم به Magrobot (Zhou et al., 2021).

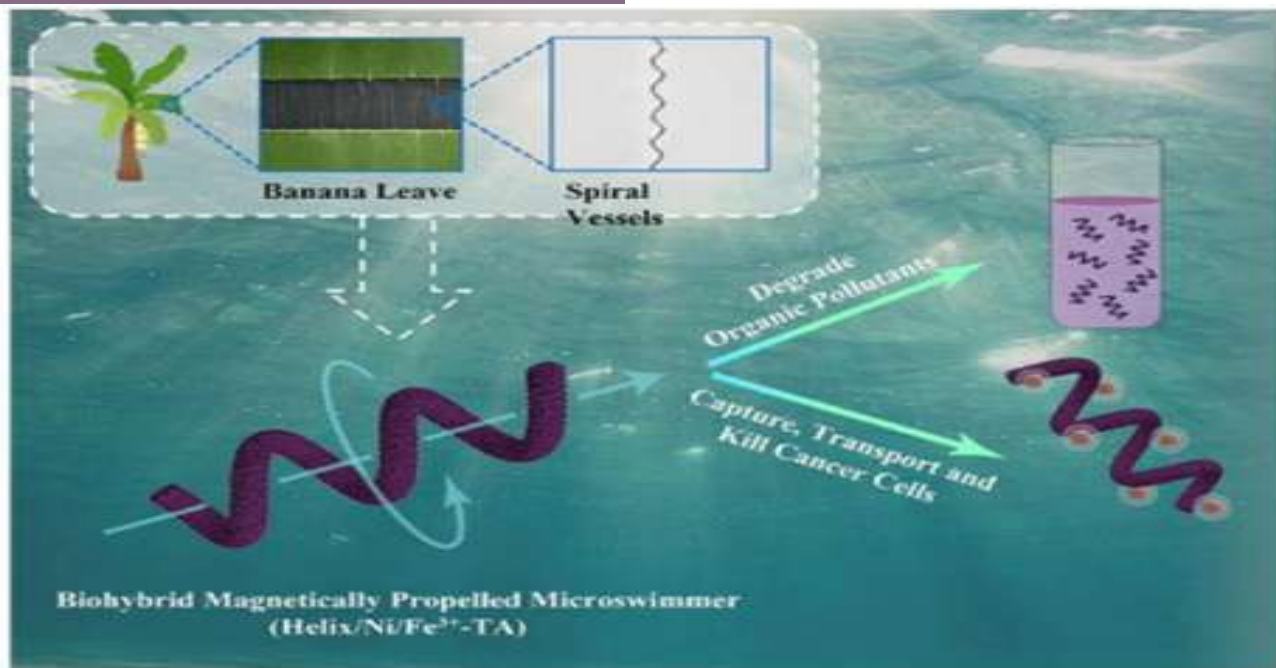
RhB را تا ۹۰ درصد در محلول 0.03 میلی مولار آلوده به RhB تجزیه کند. (شکل 4)

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) میکروروبات های مغناطیسی را برای تخریب رودامین (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 میکروروبات در نهایت توانست





## مراجع

1. Abbott, J. J., Peyer, K. E., Lagomarsino, M. C., Zhang, L., Dong, L., Kallakatsos, 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>

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

## نتیجه‌گیری

میکروبوت‌ها به عنوان یک ابزار نوظهور در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. کاربردهای گسترده میکروبوتیک، حوزه‌های مختلفی از علوم نظیر علم مواد، میکروساخت، رباتیک، کنترل و موارد دیگر را ترکیب می‌کند. اگرچه کاربردهای متنوع میکروبوتیک در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است اما در حوزه‌های کشاورزی و صنایع غذایی، بسیار نوپا است. با بررسی پتانسیل‌های کاربردی میکروبوتیک 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 میکروبوتیک در آینده نزدیک در دسترس باشد.

# فراخوان دریافت مقالات و مطالب علمی نشریه علم-ترویج

## صنعت سبز نوین

با توجه به اهمیت هم‌افزایی و همچنین معرفی پژوهش‌های انجام شده در این رشته و دستاوردهای آن به علاقه‌مندان و ترویج آن؛ از همه اساتید، پژوهشگران و دانشجویان در رشته‌های مهندسی مکانیک بیوسیستم، مهندسی مکانیزاسیون، مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی و رشته‌های مرتبط دعوت می‌شود جهت ارسال مطالب خود به نشریه علمی ترویجی صنعت سبز نوین از طریق راه‌های ذکر شده اقدام فرمایند.

همچنین از شماره‌های گذشته، بخشی با نام «دست‌آورد» برای معرفی طرح‌ها و پژوهش‌های انجام شده با هدف معرفی توانایی‌های دانشجویان در این رشته به صورت ثابت به نشریه اضافه شده است که علاقه‌مندان می‌توانند طرح‌ها و دستاوردهای خود را در این بخش با نام خود معرفی نمایند.

### نحوه ارسال مطالب:

- مراجعه به سایت رسمی نشریه به نشانی [sanatsabzsj.ut.ac.ir](http://sanatsabzsj.ut.ac.ir) و بخش ارسال مقالات
- ارسال مقاله به ایمیل نشریه به نشانی: [sanat.sabz.pub@gmail.com](mailto:sanat.sabz.pub@gmail.com)

جهت کسب اطلاعات بیشتر، می‌توانید به شماره‌های پیشین نشریه که در سایت و تلگرام نشریه موجود است، مراجعه کرده و با آی دی تلگرام @sanatsabznovin یا شماره ۰۹۰۳۷۰۲۵۷۳۹ در ارتباط باشید.

### راه‌های ارتباطی نشریه:

 [sanat.sabz.pub@gmail.com](mailto:sanat.sabz.pub@gmail.com)

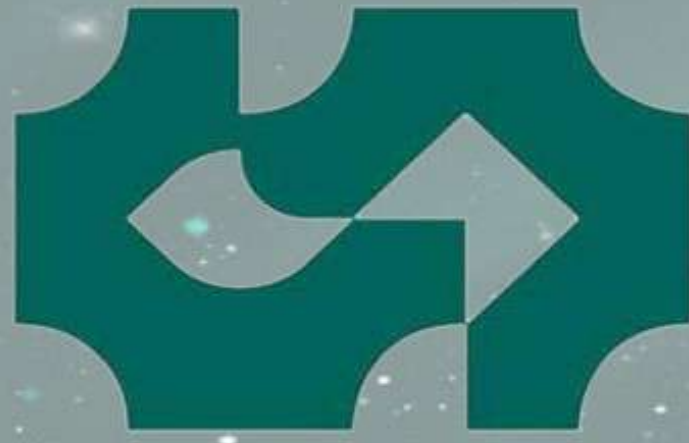
 <http://sanatsabzsj.ut.ac.ir>

  SanatSabz\_UT

 ۰۹۰۳۷۰۲۵۷۳۹







**SORENA**  
**AGRICULTURE**  
**MACHINES COMPANY**

- تولید و تعمیر انواع دستگاه های کشاورزی و بسته بندی



همدان، سردرود  
روستای خورونده

آشتیانی ۰۹۱۸۲۹۰۹۰۰۷  
طیپی ۰۹۱۲۰۳۵۵۶۰۵



**سورنا**

گروه تولیدی دستگاه های سورتینگ  
سیب زمینی و بسته بندی میوه و مرکبات