

بررسی امکان تولید الکتریسته از گیاهان زنده

فروزان وکیلی^{*۱}

forouz.vakili@gmail.com

لعبت تقوی^۲

ابراهیم علائی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۹

چکیده

محدودیت منابع انرژی فسیلی در کنار پتانسیل بالای آلاینده‌گی، جایگزینی آن‌ها با منابع پاک و تجدید پذیر را ضروری نموده است. امروزه سهم این گروه از منابع در سیستم تأمین انرژی جهان رو به افزایش است. در این ارتباط، می‌توان با الهام از طبیعت فناوری نوینی برای استفاده از گیاهان جهت تولید برق توسعه داد که در آینده نزدیک توان تولید انرژی پاک از نور خورشید با استفاده از سیستم‌های زنده گیاهی و فرآیند فتوسنتز را پایه گذاری نماید.

اساس کار برای تبدیل انرژی خورشید به برق، بر مبنای همکاری و تعامل بین گیاهان و باکتری‌ها و با استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی می‌باشد. این پیل‌ها قادرند انرژی حاصل از فعل و انفعالات در ناحیه نزدیک به ریشه گیاه (ریزوسفر) که در نتیجه فعالیت ریزسازواره‌های موجود، تولید می‌گردد را جذب و پس از انتقال به پیل‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند. ایده اصلی برای این کار تولید مواد آلی، غالباً به شکل کربوهیدرات، توسط گیاهان (ریزودپوزیت‌ها) می‌باشد که باکتری‌ها قادرند با استفاده از آن‌ها به‌عنوان منبع تغذیه، انرژی موجود در آن‌ها را به الکتریسته (جریان برق) تبدیل نمایند. این امر، علاوه بر امکان استفاده مداوم از انرژی نورانی خورشید در تولید برق، به دلیل کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای و سایر آلاینده‌ها، رضایت علاقمندان به محیط زیست را نیز به همراه خواهد داشت. بر این اساس، در مطالعه حاضر مروری کوتاه بر مشخصات و نحوه عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی در تولید "برق سبز" از گیاهان زنده، صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: برق سبز، پیل سوختی میکروبی- گیاهی، پیل سوختی فتوسنتزی، بیو کاتد میکروبی، ریزودپوزیت.

۱- دکتری آلودگی‌های محیط زیست، گروه آلودگی‌های محیط زیست، دانشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۲- استادیار گروه آلودگی‌های محیط زیست، دانشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- استادیار پژوهشکده محیط زیست، پردیس انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

مقدمه

منابع انرژی فسیلی مانند نفت، گاز و زغال سنگ سرانجام روزی به پایان خواهند رسید و با پایان گرفتن آن تمدن بشری که بستگی مستقیم به انرژی دارد، دچار چالشی جدید و بزرگ خواهد شد. از سوی دیگر سوخت‌های فسیلی دارای معایب فراوان از جمله آلودگی محیط زیست و گرمایش جهانی می‌باشند (۱). لذا، شناسایی و معرفی منابع پاک و تجدید پذیر انرژی ضروری می‌گردد. این امر سبب شده است که کشورهای توسعه یافته صنعتی با جدیت هر چه تمام‌تر استفاده از سایر انرژی‌های موجود در طبیعت به خصوص انرژی‌های تجدید شونده را مورد توجه قرار دهند. استفاده از انرژی خورشید، باد و امواج، زمین‌گرمایی، هیدروژن، زیست توده و ... که به انرژی‌های تجدید پذیر موسومند، مستلزم مطالعات و تحقیقات فراوانی می‌باشد که قبل از استفاده باید انجام گیرد (۲).

خورشید، منبع عظیم تأمین انرژی در کره زمین است. انرژی خورشیدی که در یک ساعت به زمین می‌تابد برابر $4/3 \times 10^{20}$ ژول می‌باشد در حالی که کل انرژی که در مدت یک سال در سیاره ما مصرف می‌شود برابر $4/1 \times 10^{20}$ ژول می‌باشد (۱). تنها مقدار کمی از تابش خورشید بر روی زمین به انرژی قابل استفاده و مفید تبدیل می‌شود. گیاهان و فرآیند تولید گیاهی (فتوسنتز) یکی از موارد جذب و مصرف انرژی خورشید و تولید ماده آلی و انرژی می‌باشند. انرژی زیستی که در زیست توده گیاهی جای گرفته از منبع خورشید منشأ گرفته و احتمالاً در آینده میزان قابل توجهی از تولید انرژی تجدید پذیر را شامل می‌شود. مزیت عمده تولید انرژی از گیاهان، تجدید پذیر بودن آن و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده که ۷۰ درصد مواد آلی تولید شده در نتیجه عمل فتوسنتز توسط خود گیاه استفاده نمی‌شود و از طریق ریشه‌ها در زمین و فضای اطراف پخش می‌شود. گیاهان و ریز سازواره‌ها منابع مناسبی برای تولید انرژی هستند ولی برای بهره‌برداری انرژی تولیدی از آن‌ها، نیاز به ابزارهایی است تا بتوان به‌وسیله آن‌ها،

انرژی تولیدی توسط این موجودات را در اختیار و کنترل قرار داد. یکی از مهم‌ترین این ابزارها، "پیل‌های سوختی میکروبی" می‌باشند. گیاهان در حین فتوسنتز، انرژی نورانی را جذب می‌کنند. در این فرآیند H_2O و CO_2 نیز جذب و تبدیل به پیوندهای شیمیایی موجود در ساختار مواد تولیدی می‌شوند. بخشی از این انرژی ذخیره شده شیمیایی در مواد بیوسنتزی از ریشه به خاک منتقل می‌شود. انرژی منتقل شده به خاک، توسط باکتری‌هایی که "باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی" نامیده می‌شوند، مصرف می‌شود. این ریزسازواره‌ها^۳ قادر به اکسیداسیون ماده آلی و انتقال الکترون‌های غنی از انرژی به سمت الکتروده می‌باشند. انرژی منتقل شده توسط الکترون‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل شده و سپس الکترون‌ها در الکتروده دیگر برای تشکیل آب با اکسیژن ترکیب می‌شوند. این فناوری، "پیل سوختی میکروبی- گیاهی"^۴ نام دارد.

بر همین اساس، با قرار دادن تعدادی حامل یا الکتروده در اطراف ریشه گیاهان، انرژی حاصل از فعل و انفعالات در ناحیه ریزوسفر، جذب و پس از انتقال به پیل‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. این پیل‌ها قابلیت استفاده در هر ابعادی را دارند. بررسی‌ها نشان داده که گیاهان موجود در فضای ۱۵ متر مکعبی، توانایی تولید انرژی برای مصرف یک کامپیوتر همراه را دارند. دانشمندان معتقدند که با استفاده از این روش و کاشتن گیاهان در سقف یک خانه می‌توان تقریباً ۵۰ درصد از برق مورد نیاز آن را تأمین نمود.

این تکنولوژی در همه سطوح قابل استفاده می‌باشد. یعنی می‌توان بر روی سقف‌های ایزوله و یا منابع آب راکد به کاشتن گیاهان مبادرت نمود و در مقیاس بزرگ‌تر، این روش برای استفاده در شالیزارها و تالاب‌ها که از نظر پوشش گیاهی غنی هستند، به کار گرفته می‌شود و هم‌زمان می‌توان از این محیط‌های سبز هم به عنوان منبع غذایی و هم به عنوان منبع تولید

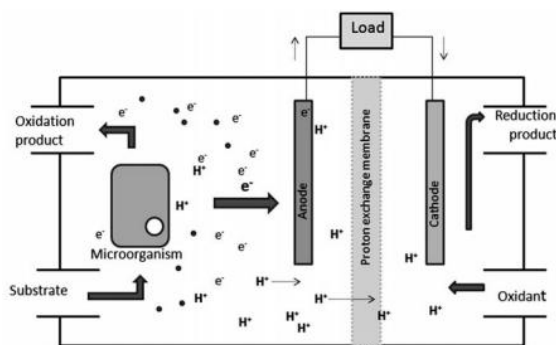
2- Microbial Fuel Cell (MFC)

3- Microorganism

4- Plant-Microbial Fuel Cell (P-MFC)

1-Biomass

سپس الکترون‌های تولید شده توسط یک سری آنزیم‌های مربوط به تنفس سلولی، در داخل سلول انتقال پیدا کرده و منجر به ایجاد انرژی می‌گردد. این الکترون‌ها در نهایت، به آخرین پذیرنده الکترونی رسیده، آن را احیا می‌کنند. به عنوان مثال اکسیژن به عنوان آخرین پذیرنده الکترون، می‌تواند طی واکنش کاتالیزوری بین الکترون‌ها و پروتون‌ها، به آب احیا شود. بسته به نوع اکسید کننده‌ای (پذیرنده الکترون) که در کاتد استفاده می‌شود، عمل احیا در کاتد منجر به تشکیل آب از اکسیژن، گاز نیتروژن از نیترات، آهن دو ظرفیتی از آهن سه ظرفیتی گشته و با اعمال انرژی اضافه روی الکترون‌ها، احیا الکترون‌ها به پروتون و هیدروژن صورت گرفته که این فرآیند احیا می‌تواند به طریق شیمیایی یا با کمک ریز سازواره‌هایی که در کاتد فعال می‌باشند، انجام شود (۵).



شکل ۱- نمای مفهومی یک پیل سوختی میکروبی (۶)

۲-۱- اساس کار پیل‌های سوختی میکروبی

در پیل سوختی میکروبی نیم پیل‌های واکنش آندی و کاتدی توسط یک غشای انتقال دهنده پروتون از یکدیگر جدا شده و به وسیله مدار خارجی با یکدیگر در ارتباط هستند. در نیم پیل آندی ریز سازواره‌ها به همراه کربوهیدرات‌هایی مثل گلوکز و جفت کننده‌های اکسایش- کاهش^۲ یا واسطه‌گرهای الکترونی وجود دارند. ریز سازواره‌ها منبع کربوهیدراتی را تجزیه نموده و الکترون‌های تولید شده توسط این واکنش را در یک

برق استفاده نمود (۳). هدف از مقاله حاضر مروری بر نحوه استحصال برق از گیاهان سبز (زنده) می‌باشد.

۱- روش شناسی

۱-۱- معرفی پیل‌های سوختی میکروبی

پیل سوختی میکروبی برای تولید برق زیستی^۱ از زیست توده باکتریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اولین بار در سال ۱۹۱۱ بود که مشخص گردید باکتری‌ها قادرند در نتیجه تجزیه مواد آلی آثار الکتریکی ایجاد نمایند. ولی در سال ۱۹۶۶ بود که به صورت عملی روی این مسأله کار شد. امروزه، پس از گذشت ۱۰۰ سال، این اثر الکتریکی که ناشی از عملکرد چندین سیستم بیوالکتروشیمیایی می‌باشد، تقریباً در تمام امور زندگی، مواردی نظیر تصفیه فاضلاب، تولید الکتریسیته و یا بازیافت شیمیایی، بکار گرفته می‌شود (۴).

در اوایل دهه ۱۹۹۰ پیل‌های سوختی بسیار مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات روی پیل‌های سوختی میکروبی برای تولید برق زیستی از زیست توده باکتریایی، که در آن ریز سازواره‌ها به عنوان کاتالیست عمل می‌نمایند، آغاز شد. در طی سال‌های اخیر، شاهد افزایش قابل توجه میزان تولید جریان الکتریکی و برداشت الکتریسیته توسط پیل‌های سوختی میکروبی می‌باشیم. علاقه به این سلول‌های سوختی جهانی بوده و تحقیقات زیادی در کشورهای مختلف در این زمینه صورت گرفته است، تا آخر سال ۲۰۰۹ به ترتیب کشورهای ایالات متحده آمریکا، چین و کره جنوبی بیش‌ترین تعداد مقالات را در زمینه پیل‌های سوختی میکروبی به چاپ رسانیده‌اند (۴).

یک پیل سوختی میکروبی از آند و کاتد در یک یا دو اتاقک تشکیل شده است. ریز سازواره‌ها در نیم پیل آندی رشد کرده، ماده آلی موجود در گهرمایه^۲ (سوبسترا) را اکسید نموده و

1- Bioelectricity

"سوبسترا" یا "گهر مایه": ماده آبیکی یا جامد که Substrate-
ریزسازواره‌ها را بر روی آن رشد دهند. این ماده می‌تواند خود خوراک ریزسازواره باشد یا تنها پایه‌ای باشد که ریزسازواره بر روی آن استوار

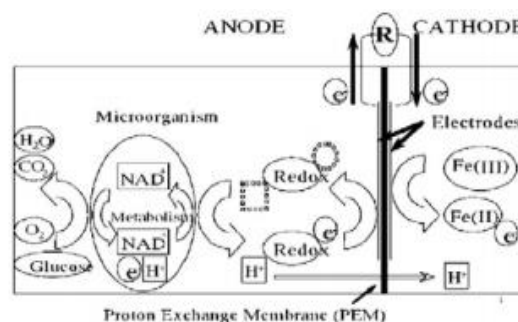
شده و رشد می‌کند. سوبسترا تحت تأثیر آنزیم تغییر نموده و به یک یا تعدادی محصول تبدیل می‌شود.

3-Redox coupler

کارآمدی، صرفه اقتصادی و تداوم تبدیل پس‌مانده‌های آلی به بیوانرژی به نوع، ترکیب شیمیایی و غلظت اجزای تشکیل دهنده آن ماده پسماند بستگی دارد. در پیل‌های سوختی میکروبی، گهرمایه‌ای که تجزیه می‌شود عامل مهمی است که در تولید الکتریسیته تأثیر می‌گذارد. طیف متنوعی از گهرمایه‌ها در پیل‌های سوختی میکروبی برای تولید الکتریسیته، مورد استفاده قرار می‌گیرند که تعدادی از آن‌ها شامل: استات، گلوکز، بیومس لیگنوسلولزی، مخلوط مواد آلی موجود در فاضلاب صنایع مختلف مانند آجوسازی، فرآوری نشاسته، رنگ، سلولزی، مواد معدنی و سایر مواد می‌باشد.

شکل ۳ انواع پیل‌های سوختی مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی و شکل ۴ انواع مورد استفاده در عملیات پیوسته و بزرگ مقیاس را نشان می‌دهد (۷). اشکال ۳-A و ۳-F، مدل‌های پر مصرف و ارزان یک پیل سوختی میکروبی در مقیاس آزمایشگاهی و به شکل H را نشان می‌هند که متشکل از دو محفظه شیشه‌ای و یک لوله رابط، حاوی غشا تعویض کاتیون^۲ و با هدف نفوذ انتخابی پروتون‌ها^۳، می‌باشد. علاوه بر ساختار پیل به شکل دو محفظه جدا، برای ایجاد سطوح بزرگ‌تر می‌توان آن‌ها را به شکل صفحات بهم فشرده و در دو طرف یک غشا، به یکدیگر متصل نمود (شکل ۳-B).

سری واسطه‌ها مانند $NADH^+$ و یا در طی زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری، ذخیره می‌کنند. واسطه‌گرهای الکترونی احیا شده یا اکسایش-کاهش به داخل سلول ریزسازواره نفوذ کرده و با فعالیت متابولیکی معینی که دارند با اکسیژن بر سر اکسید کردن این الکترون‌ها رقابت کرده و پس از احیا، از دیواره سلولی ریزسازواره‌ها به داخل محلول بافری انتشار یافته و در نهایت الکترون‌هایشان را به آند انتقال می‌دهند. این الکترون‌ها در کاتد توسط پذیرنده الکترون جذب و جریان کامل می‌شود.



شکل ۲- مکانیزم عمل یک پیل سوختی میکروبی (۱)

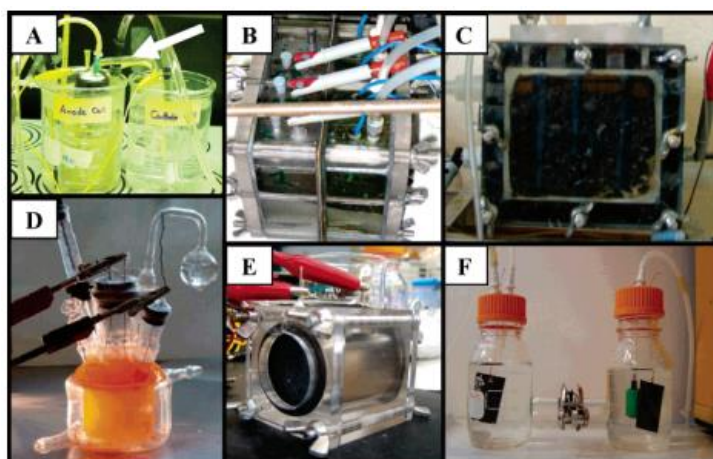
لازم به ذکر است که برای فرآیندهای بیولوژیکی وجود گهرمایه بسیار مهم است زیرا منبع کربن (ماده مغذی) و انرژی را برای آن فرآیند فراهم می‌کند. پیل‌های سوختی میکروبی می‌توانند از موادی مانند رسوبات، مواد آلی موجود در فاضلاب مانند ترکیبات فنلی و نیز ضایعات کشاورزی به عنوان گهرمایه برای تولید الکتریسیته استفاده نمایند. به طوری که در کنار تولید الکتریسیته هدف دیگر این سیستم‌ها از بین بردن آلاینده‌هایی مثل نیترات‌ها، سولفیدها و سولفات‌ها می‌باشد.

۱- NADH: Nicotinamide Adenine Dinucleotide

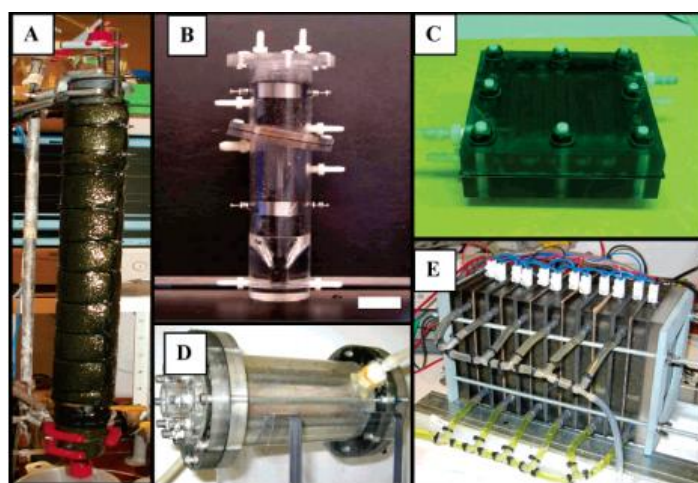
(کوآنزیمی که در همه سلول‌های زنده یافت می‌شود و به دو شکل احیا شده $NADH$ و اکسید شده NAD^+ وجود دارد. این کوآنزیم در واکنش‌ها به راحتی می‌تواند الکترون را بین مولکول‌ها جابجا کند.)

2- Cation Exchange Membrane (CEM)

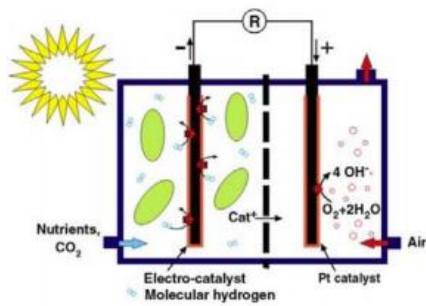
3- Proton Exchange Membrane (PEM)



شکل ۳- اشکال مختلف پیل‌های سوخت (A) سیستم ساده شامل پیل نمکی (با پیکان مشخص شده) (B) سیستم چهارتایی صفحه‌ای، جدا شده توسط غشا (C) مشابه (B) ولی با جریان دائمی از آند با ماتریس گرانوله گرافیت و محفظه بسته آند و کاتد (D) نوع فتو هتروتروفی از پیل‌های سوختی (E) سیستم تک محفظه با کاتد هوا به شکل لوله (F) سیستم دو محفظه‌ای (H-Type) و غشا پخش گاز



شکل ۴- اشکال مختلف پیل‌های سوختی برای عملیات پیوسته (A) پیل سوختی میکروبی لوله‌ای با جریان رو به بالا با آند به شکل بستر گرافیتی و کاتد احاطه کننده در سطح بیرونی، (B) پیل سوختی میکروبی لوله‌ای با جریان رو به بالا، آند در زیر و کاتد در بالا و غشا شیب دار، (C) مدل صفحه مسطح با تقسیم محفظه به بخش‌های کوچک و عبور مایع به شکل مارپیچ در بین الکترودها، (D) سیستم تک محفظه با کاتد هوا احاطه شده توسط محفظه آند به شکل میله‌های گرافیتی، (E) بسته پیل سوختی حاوی شش پیل مجزادر یک واحد رآکتوری



شکل ۵- شماتیک پیل سوختی میکروبی فتوسنتزی شامل باکتری‌های فتوسنتزی تولید کننده هیدروژن به همراه بیوکاتالیست (۱)

- فتوسنتز جفت شده با ترکیبی از باکتری‌های هتروتروف موجود در آند شامل:
 - ✓ رابطه هم‌افزایی بین ریز سازواره‌های فتوتروف و ترکیبی از باکتری‌های هتروتروف موجود در رسوبات^۴
 - ✓ رابطه هم‌افزایی بین گیاهان و ترکیب باکتری‌های هتروتروفی موجود در رسوبات
 - ✓ جفت شدن خارجی فتوسنتز با مخلوطی از باکتری‌های فتوتروفی در یک آند تاریک^۵
 - ✓ انتقال مستقیم الکترون بین باکتری‌های فتوسنتزی و الکتروده^۶
 - ✓ فتوسنتز در کاتد برای تأمین اکسیژن^۷
- با توجه به هدف مورد نظر در این مطالعه، به بررسی رابطه هم‌افزایی بین گیاهان و ترکیب باکتری‌های هتروتروفی موجود در رسوبات پرداخته خواهد شد.
- ۱-۳-۱- تولید برق با استفاده از رابطه هم‌افزایی بین گیاهان و ترکیب باکتری‌های هتروتروفی موجود در رسوبات

۱-۳- پیل‌های سوختی میکروبی فتوسنتزی^۱

پیل سوختی میکروبی فتوسنتزی سیستمی است که در آن نور خورشید طی یک واکنش متابولیکی در پیل سوختی میکروبی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. یکی از مزایای عمده این پیل‌ها نسبت به پیل‌های سوختی میکروبی معمولی توانایی حذف گاز دی‌اکسید کربن از محیط می‌باشد. در این نوع از پیل‌ها، از ریز سازواره‌های فتوسنتز کننده استفاده می‌شود که پیل سوختی را با واکنش‌های فتوسنتزی جفت می‌کنند. اصول کار این پیل همانند یک پیل سوختی میکروبی می‌باشد، با این تفاوت که این پیل از ترکیبات حاصل از فتوسنتز نیرو گرفته و انرژی الکتریسیته را از فرآیند فتوسنتز و در نتیجه تجزیه کربوهیدرات‌های داخل سلولی در طول روز و همچنین تجزیه (به تنهایی) در شب تولید می‌کند. در نیم پیل آندی باکتری‌های فتوسنتزی CO_2 و H_2O را به O_2 و کربوهیدرات (مانند گلوکز) تبدیل می‌کنند. الکترون‌ها در نهایت از طریق مدار خارجی به نیم پیل کاتدی رسیده و در آنجا پذیرنده نهایی الکترون را احیا می‌کنند. پروتون‌هایی که از غشای انتقال دهنده پروتونی عبور کرده و از آند به کاتد آمده‌اند با O_2 و الکترون‌ها، ترکیب شده و H_2O آزاد می‌کنند. انواع پیل‌های سوختی میکروبی فتوسنتزی، عملکردهای متفاوتی دارند، نظیر:

- باکتری‌های فتوسنتزی در آند به همراه واسطه گرهای مصنوعی^۲
- باکتری‌های فتوسنتزی تولید کننده هیدروژن به همراه آند الکتروکاتالیست^۳

4- Heterotrophic in situ pMFC
 5- Heterotrophic ex situ photo MFC
 6-Direct Electron Transfer photo MFC(DET pMFC)
 7-Oxygen providing pMFC

1- Photo Microbial Fuel Cell : pMFC
 2- Mediated MFC
 3- Electro catalytic pMFC

پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی نوع رسوبی استفاده شوند. این پیل‌ها برای تولید برق به صورت "در جا" عمل نموده و به جابه‌جایی و جمع‌آوری زیست توده در محیط نیازی ندارند، علاوه بر این از یک منبع تجدید پذیر انرژی استفاده کرده و در طی تولید انرژی در این سلول‌های سوختی، گاز گل‌خانه‌ای تولید نمی‌گردد. همچنین این پیل‌ها می‌توانند بدون تخریب طبیعت، در محیط‌های طبیعی مانند تالاب‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در این ارتباط، محققان گیاه " شیرین چمن یا شکرین"^۴ (گلیسیریا ماکسیما) را به‌عنوان مدل انتخاب کرده و به تولید انرژی بیشینه، تا 67 mW/m^2 رسیده‌اند.

در این قبیل پیل‌های سوختی، همبستگی مستقیمی بین فعالیت فتوسنتزی و تولید انرژی الکتریکی وجود دارد، به این صورت که در ضمن فرآیند فتوسنتز میزان ترشحات ریشه‌ای (ریزودپوزیت) تولیدی گیاه افزایش یافته و در فرآیند تولید انرژی الکتریکی، مواد تولید شده طی فاز فتوسنتز مصرف می‌گردند. مطالعات نشان می‌دهند که میزان تولید ریزودپوزیت‌ها با افزایش مصرف آن‌ها، افزایش می‌یابد. در برآوردهای اولیه، کارایی پیل‌های سوختی در تولید انرژی خالص در آب و هوای اروپای غربی (هلند، بلژیک و فرانسه) به طور تئوری برابر $1 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ تخمین زده شده بود، در حالی که چند سال بعد کنسرسیون تحقیقات بین رشته‌ای اروپا مقدار نیروی تولیدی توسط پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی را تا حد $1 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ برآورد نمود(۱).

لازم به توضیح است که پیل‌های سوختی میکروبی گیاهی هنوز با مشکلاتی برای افزایش مقیاس از آزمایشگاه روبرو می‌باشند. عملکرد این قبیل پیل‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. از جمله می‌توان به واکنش کاتدی، ترکیب گهرمایه، سیستم بافری، و درجه حرارت عملیات اشاره نمود (۸). فلزات مختلفی به‌طور آزمایشی برای تسریع واکنش‌های کاتدی بکار گرفته شده‌اند اما مشخص شده که احیا اکسیژن در کاتد، اصلی‌ترین عامل محدود کننده در بحث پیل‌های سوختی

سیستم‌های متداول تولید بیوانرژی مثل برق سبز^۱ یا زیستی با استفاده از منابع زیست توده، بیواتانول و بیو دیزل، در کنار تمام مزایا، معایبی نیز دارند. این سیستم‌ها، برای تولید انرژی به زمین‌های قابل کشت، کود و رسیدگی نیاز دارند و از طرفی، بخشی از محصول مزارع به‌جای رفع نیازهای غذایی انسان، برای تولید این سوخت و انرژی مورد استفاده قرار گرفته و به‌این ترتیب امنیت غذایی انسان با تهدید مواجه می‌گردد.

علاوه بر این، سیستم‌های مذکور، به‌منظور فرآورش و تولید سوخت به خوراک ورودی و انرژی اضافی نیاز داشته و به‌دنبال آن احتمال تولید ترکیبات جانبی ناخواسته در طی فرآیند تبدیل و در نتیجه آلودگی محیط زیست، وجود خواهد داشت. ولی پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی این معایب را نداشته و بازده بیش‌تری نیز دارند. در این سیستم‌ها ریشه گیاهان زنده در قسمت آندی پیل سوختی میکروبی وارد می‌شود. تولید انرژی با این روش بر دو فرآیند استوار است: ابتدا "تولید ترکیبات آلی به‌وسیله گیاهان"^۲ در حین فرآیند فتوسنتز و سپس "تولید انرژی الکتریکی از این ترکیبات توسط ریزوسازواره‌ها". برگ گیاهان، نور خورشید را جذب کرده و ضمن فرآیند فتوسنتز، دی‌اکسید کربن را به شکل کربوهیدرات تثبیت می‌کند. متناسب با نوع، سن و شرایط محیطی، گیاهان تا ۶۰٪ کربن تثبیت شده خود را از برگ‌ها به ریشه انتقال می‌دهند. سیستم ریشه‌ای گیاهان ترکیبات آلی مختلفی را تولید و در خاک آزاد می‌کنند، این ترکیبات شامل: قندها، اسیدهای آلی، کربوهیدرات‌های پلیمری، آنزیم‌ها، مواد حاصل از سلول‌های مرده و گازهای اتیلن و CO_2 می‌باشد. فرآیند آزادسازی ترشحات ریشه‌ای، "ریزودپوزیشن"^۳ و به فرآورده‌های آن "ریزودپوزیت"^۳ گفته می‌شود. ریزودپوزیت‌ها حدود ۴۰٪ بازدهی گیاهان فتوسنتزی را به خود اختصاص داده و می‌توانند به عنوان یک منبع بزرگ سوختی برای تولید الکتریسیته در

1-Green electricity

2- Rhizodeposition

3- Rhizodeposit

4-Glyceria maxima

بر مواد مترشحه از گیاه، بخش‌های مرده گیاهی مانند ریشه‌های مرده، منابع مهم تأمین سوخت برای فرآیند پیل سوختی میکروبی- گیاهی می‌باشند (۱۱).

استفاده از گونه‌های گراس (گندمیان) به‌طور خاص در این فرآیند توصیه می‌گردد. همچنین تالاب‌ها در صورت بکارگیری این روش، پتانسیل تبدیل به یک فناوری بزرگ مقیاس تولید الکتریسیته را دارند. انرژی اولیه مورد نیاز فرآیند از "ریزودپوزیشن"، نظیر مواد مترشحه از ریشه و یا ریشه‌های مرده تأمین می‌گردد. در نتیجه عملکرد فرآیند به‌شدت وابسته به نوع گیاه، ساختار ریشه و ترکیب میکروبی محیط می‌باشد، به گونه‌ای که تجزیه هیدروکربن‌های کوچک مولکول تولید شده توسط ریشه گیاه، به طور خاص، با عملکرد بالای ۷۰٪ منجر به تولید الکترون می‌گردد. چنانچه در این فناوری از پیل‌های سوختی میکروبی صفحه‌ای تخت با مقاومت داخلی $0.1 \Omega.m^2$ استفاده گردد، باعث تولید جریان خروجی با بیش‌ترین مقدار تئوری خواهد شد.

به‌دلیل لزوم وجود شرایط غرقابی برای تداوم فعالیت پیل‌های سوختی میکروبی، و به‌منظور بررسی شرایط بهینه رشد گیاه و آزاد شدن کربن آلی از ریشه در این شرایط، سه گونه گیاه با قابلیت رشد در محیط‌های غرقابی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این گونه‌ها عبارتند از:

- علف فناری^۱ (گیاه بومی اروپای مرکزی)
- شیرین چمن^۲ (گیاه بومی اروپای مرکزی)
- برنج^۳ (قابل کشت در سراسر جهان)

در پیل‌های سوختی میکروبی طراحی شده با این گیاهان، به‌طور نسبی مقادیر برق و نیز زیست توده بیش‌تری تولید گردید به طوری که به تناوب کم‌تری برای درو نیاز بود. این گیاهان همگی از خانواده گندمیان (گراس) می‌باشند و می‌توان در زمینه بکارگیری پیل سوختی میکروبی- گیاهی، به استفاده انواع مناسب این گونه‌ها، تأکید نمود (۷).

میکروبی می‌باشد. در این خصوص مطالعاتی در زمینه امکان استفاده و توسعه کاربرد بیوکاتدهای میکروبی کاهنده اکسیژن و نیز استفاده از مواد اصلاح کننده سطح به‌منظور بهسازی الکترودها و عملکرد بیوفیلم انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این عمل با نشانیدن بار مثبت بر روی الکترودها و افزایش احتمال جذب الکترواستاتیکی باکتری‌های با بار منفی، در افزایش اتصال بیو فیلم تأثیر داشته است و همچنین به‌کار گرفتن ضخامت مناسب از اصلاح کننده سطح، نقش مهم و اساسی در اخذ نتایج مطلوب دارا می‌باشد. علاوه بر این، بهترین شرایط عملیاتی در pH حدود ۵ و دمای $31^{\circ}C$ به- دست آمد. بیوکاتدهای کاهنده اکسیژن تا چندین ساعت در مقابل تغییرات pH و دما مقاوم می‌باشند (۹).

۱-۳-۲- انتخاب گیاهان برای استفاده در تولید برق

گیاهان، قهرمانان بی چون و چرای استفاده از انرژی خورشیدی هستند. پس از میلیاردها سال تکامل، بیش‌تر آن‌ها با بازدهی صد درصدی کار می‌کنند، بدین معنا که به هر اندازه که یک گیاه از نور خورشید فوتون دریافت می‌کند به همان مقدار نیز الکترون تولید می‌کند. گیاهان در حین عمل فتوسنتز، از نور خورشید برای تجزیه مولکول‌های آب به اکسیژن و هیدروژن استفاده می‌کنند که به تولید الکترون می‌انجامد.

استفاده از سیستم پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی این امکان را فراهم می‌کند که الکتریسیته را در محل بدون نیاز به چیدن یا درو نمودن گیاهان و به طور شبانه روزی، تولید نمود. تولید برق با این روش بدون تولید هر گونه گازهای حاصل از احتراق بوده، علاوه بر اینکه از لحاظ تولید گاز کربن دی اکسید خنثی می‌باشد، باعث کاهش نشر متان نیز می‌گردد. مطالعات انجام شده در کشورهای اروپایی نشان می‌دهد چنانچه از این فناوری به‌طور صحیح استفاده گردد، می‌توان تا ۲۰٪ انرژی الکتریکی مورد نیاز در اروپا را با این روش تأمین نمود (۹).

نتایج حاصل از مطالعات گیاه‌شناسی حاکی از این است که بعضی از انواع گیاهان می‌توانند در پیل سوختی میکروبی - گیاهی کاشته شوند ولی بعضی این قابلیت را ندارند و یا رشد اندکی خواهند داشت (۱۰). همچنین نشان داده شده که علاوه

۱-Phalaris arundinacea (Reed Canarygrass)

۲-Glyceria maxima (Reed Managrass)

۳-Oryza sativa (Asian Rice)

انرژی‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدید پذیر (باد، خورشید، و ...) طبقه بندی کرد. تلاش برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی که نتیجه استفاده از آن انتشار گازهای گل-خانه‌ای است از یک‌سو، و ذخایر رو به کاهش سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر، در سال‌های اخیر به یک چالش بین-المللی تبدیل شده است. لذا، استفاده از دو دسته دیگر، یعنی منابع انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدید پذیر ضروری می‌گردد. استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر، نه آلودگی‌ها و تخریب‌های محیط زیستی انرژی‌های فسیلی و هسته‌ای را دارند و نه پایان پذیر و تمام شدنی هستند، از این رو دانشمندان در کشورهای مختلف در صدد یافتن راه‌های جدیدی برای استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر هستند و تدوین و ارایه راهبردهایی برای استفاده بیش‌تر از این منابع ضروری می‌گردد. در این راستا، بسیاری از محققان در سراسر دنیا در تلاشند که از انرژی خورشیدی به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر استفاده نمایند. نتایج به‌دست آمده از سال‌ها تحقیق و مطالعه نشان می‌دهد گیاهان یکی از مهم‌ترین و بهترین گزینه‌های موجود در سطح زمین برای به‌دام انداختن انرژی خورشیدی، از طریق فرآیند فتوسنتز، هستند. در شرایط طبیعی، باکتری‌هایی که در مجاورت ریشه گیاهان زندگی می‌کنند بقایای مواد آلی گیاهی را تجزیه کرده و در نتیجه، الکترون‌ها در ضمن فرآیند فتوسنتز آزاد می‌شوند. اگر بتوان الکترونی را در چنین محیطی قرار داد، می‌توان این الکترون‌ها را جذب کرده و در نتیجه نیروی الکتریکی تولید کرد. گروهی از محققین در کشور هلند نشان داده‌اند که با کمک پیل‌های سوختی میکروبی - گیاهی می‌توان به این مهم دست یافت و استفاده از این پیل‌ها، یکی از راه‌های جذب انرژی خورشید و تبدیل آن به جریان الکتریکی می‌باشد. با استفاده از این فناوری می‌توان در حالیکه گیاه به رشد خود ادامه می‌دهد، انرژی تولید نمود. ویژگی مهم این روش این است که در رشد گیاه اختلالی ایجاد ننموده و در نتیجه تهدیدی برای محیط زیست نخواهد بود. علاوه بر این در زمین‌های کشاورزی با فرآیند تولید غذا رقابت نکرده و تهدیدی برای

از سوی دیگر، اکوسیستم‌های تالابی به‌دلیل غنی بودن در محتوی ماده آلی و بالا بودن میزان زیست توده گیاهی خود منحصر به‌فرد هستند. از این منبع ماده آلی می‌توان به‌عنوان گهرمایه در پیل‌های سوختی میکروبی از نوع گیاهی برای تولید الکتریسیته، استفاده نمود. یک تیم تحقیقاتی مکزیکی بر روی امکان تولید برق با این روش، در نواحی گرمسیری و بر روی گیاه تالابی لوتی^۱ بررسی‌هایی را انجام دادند. پیل‌های سوختی مذکور که با استفاده از سلول‌های شیشه‌ای و الکترودهای گرافیتی ساخته شده بودند در شرایط محیط طبیعی بکار گرفته شدند. نتیجه بررسی پس از یک دوره، حاکی از افزونی جریان تولیدی به میزان ۱۸٪ و توان تولیدی به میزان ۴۲٪ نسبت به نمونه کنترل فاقد گیاه، بود (۱۲). تالاب‌ها یکی از منابع اصلی تولید و ورود گاز متان به اتمسفر می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی رسوب-گیاه در تالاب‌ها، علاوه بر تولید برق به کاهش نشر گاز متان نیز کمک می‌نماید. تولید برق با کمک پیل سوختی میکروبی - گیاهی، می‌تواند گزینه خوبی برای کاهش نشر متان از تالاب‌ها باشد که می‌تواند در کنار سایر استراتژی‌های کاهش نشر بکار گرفته شود (۹). برای دستیابی به این هدف، تمام عناصر تشکیل دهنده فرآیند نظیر گیاه، اجتماعات میکروبی ریشه و فناوری پیل سوختی باید بهسازی شده و ارتقا یابند. به‌عنوان مثال، بررسی‌ها حاکی از این است که با بهینه سازی نسبت مصرف کربن گرانول در آند و نیز تنظیم میزان کربن آلی، بیش‌ترین میزان تولید برق و کم‌ترین میزان متان‌زایی در تالاب‌ها را خواهیم داشت.

بحث و نتیجه گیری

بی شک انرژی در زندگی و حیات انسان نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند تا جایی که بسیاری از کارشناسان بر این باورند که رشد اقتصادی در گرو دستیابی به راهکارهایی برای مقابله با بحران انرژی می‌باشد. منابع تأمین انرژی را می‌توان در ۳ گروه عمده

۱-Typha domingensis Pers.

مهندسی ژنتیک را برای افزایش ثبات سیستم‌های فتوسنتز گیاه به کار برند و عملکرد تولید الکتریسیته را افزایش دهند، این فناوری قادر خواهد بود در آینده با پنل‌های خورشیدی رقابت نماید.

با اینکه آینده این روش از منظر فناوری، محیط زیستی و اقتصادی بسیار نوید بخش می‌باشد اما هنوز مشکلاتی نیز وجود دارد و در حال حاضر از لحاظ قیمت قابل رقابت با توربین‌های بادی و پیل‌های خورشیدی نبوده و لازم است تحقیقات مداوم برای ارتقاء کارایی روش و بهینه سازی تولید انرژی و مصرف مواد، صورت گیرد.

علاوه بر نیاز به تحقیقات بنیادی، افزایش مقیاس تکنولوژی چالش بعدی است (۵). محققان نیز به این امر اذعان دارند که استفاده از این ایده در ابتدای راه قرار داشته و راه درازی تا تولید در مقیاس انبوه و تجاری از این روش، باقی مانده است. نظر به وجود مواهب طبیعی و جوامع گیاهی نظیر اکوسیستم‌های حرا در استان‌های هرمزگان، سیستان و بلوچستان و بوشهر، که با وسعت قابل توجه، مهم‌ترین پوشش گیاهی منطقه را تشکیل می‌دهد و همچنین جامعه علف‌های دریایی در این مناطق که یکی دیگر از جوامع گیاهی قادر به فتوسنتز و با اهمیت در منطقه محسوب می‌گردد (۱۳) از یک سو، و از سوی دیگر دارا بودن ۵۸۷۰۰۰ هکتار سطح زیر کشت برنج در ایران، که بیش از ۷۵٪ آن در استان‌های شمالی کشور یعنی گیلان و مازندران قرار داشته و دلیل عدم وجود سیستم‌های آبیاری مناسب، معمولاً بصورت غرقابی آبیاری می‌گردند (۱۴)، شرایط را برای توسعه پیل‌های سوختی میکروبی فتوسنتزی در این مناطق مهیا می‌کند.

پیشنهادات

تحقیقات مختلفی برای توسعه روش‌های اقتصادی و کارآتر در خصوص استفاده حداکثری از انرژی و پتانسیل موجود در گیاهان، نیاز می‌باشد. زیرا باید این روش به گونه‌ای پیاده سازی گردد که بتواند به میزان زیادی با سایر روش‌ها رقابت نموده و توجیه اقتصادی مناسبی داشته باشد. در بسیاری از موارد

امنیت غذایی محسوب نمی‌شوند و همچنین تولید انرژی با این روش وابسته به وضعیت آب و هوا نیست و می‌توان در تمام حالات به تولید انرژی پرداخت.

اگرچه نیروی خروجی از این پیل‌ها به میزان ۳ تا ۵ برابر کم‌تر از سایر منابع تجدید پذیر نظیر توربین‌های بادی و صفحات خورشیدی است، ولی بعضی از آثار نامطلوب و مضرات ناشی از استفاده از فناوری‌های مذکور نظیر مرگ و میر پرندگان، افزایش سطوح تاریک و استفاده از فلزات آلوده کننده را نیز ندارند. به دلیل تولید انرژی پاک و دارا بودن کم‌ترین میزان مضرات و آلودگی‌های محیط زیستی، این روش بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بکارگیری این پیل‌ها را می‌توان در ابتدا از سقف‌های مسطح در مناطق دور افتاده در کشورهای در حال توسعه شروع کرد تا پس از امکان پذیر شدن اجرای آن در مساحت‌های بزرگ‌تر، رویای شبکه انرژی مرکزی در مناطق باتلاقی به حقیقت بپیوندد.

لذا، توصیه می‌گردد که با بهبود ساختار و وضعیت رآکتورها، اصلاح مواد مورد استفاده در ساخت الکترودها، بهبود کاتالیست‌های میکروبی، کاهش مقاومت اهمی و سایر اقدامات اصلاحی بتوان موجبات بهبود در عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی- گیاهی را فراهم نمود. از سوی دیگر از آنجا که گیاهان کشت آسانی داشته و در مساحت زیاد قابل پرورشند، می‌توان از رابطه هم‌افزایی بین گیاهان و ریز سازواره‌ها برای ارتقا و افزایش عملکرد پیل‌های سوختی فتوسنتزی در تولید انرژی الکتریکی استفاده نمود. این پیل‌ها می‌توانند در همه ساعات شبانه روز انرژی الکتریکی تولید کنند، بنابراین به نظر می‌رسد که بتوان در آینده این پیل‌ها را برای دستگاه‌هایی که نیاز به روشن بودن ۲۴ ساعته داشته ولی در عین حال به انرژی ورودی کمی نیاز دارند (مانند سنسورها) مورد استفاده قرار داد (۱).

انرژی تولیدی توسط این روش، جریان برق مستقیم با ولتاژ نسبتاً پایین است که می‌توان به طور مستقیم از آن برای شارژ باتری‌ها و همچنین روشن کردن چراغ‌های LED استفاده نمود. در صورتی که دانشمندان بتوانند فناوری‌هایی مانند

شهری، بام سبز و...) برای تولید الکتریسیته در مقیاس بزرگ، از ضروریات پیشرفت طرح می‌باشد.

- پس از مشخص شدن نتایج اولیه در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت، ضروری است که توسعه آن با استفاده از روش‌هایی مانند هزینه- فایده مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیر بکارگیری مشوق‌های مختلف در توسعه این روش در سایر کشورها و امکان پیاده سازی آن در ایران، مورد بررسی قرار گیرند. از آن‌جا که این روش در سایر کشورهای پیشرفته نیز در مراحل اولیه می‌باشد، تعجیل در پیاده سازی آن در کشور به‌عنوان روش مکمل در تولید برق، باعث کاهش شکاف تحقیقاتی در این خصوص بین ایران و سایر کشورها خواهد گشت.

منابع

- ۱- رجب، شادی و بابایی پور، ولی اله، "تولید الکتریسیته از ارگانیزم‌های فتوسنتز کننده و غیر فتوسنتز کننده"، دومین همایش بیو انرژی ایران (بیو ماس و بیو گاز)، ۱۳۹۰، تهران- ایران
- ۲- سازمان انرژی‌های نو، ۲۰۱۲. گزارش چهارم، انرژی زیست توده در:

www.sun.org.ir/suna_content/media/image

- 3- Strike, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel J. F. H., Buisman C. J. N., 2008. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, (329): p. 870-876. (Published online in Wiley interscience.)
- 4- Strike, D., Highlights of 4 years EP7 EU Plant power Project, Proceedings 2nd International Plant power Symposium, 2012. Nov. 22&23, Wageningen, the Netherlands.

انتخاب ارجح استفاده از روش‌های پر بازده و دارای فناوری‌های متداول و پیشرفته، نظیر نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و یا سلول‌های فتو ولتائیک، می‌باشد اما دلایل اصلی برای استفاده از توان گیاهان زنده در تولید برق را می‌توان این-گونه بیان نمود: استفاده از انرژی مازاد تولید شده از فعالیت فتوسنتز گیاهی؛ پاک و تجدید پذیر بودن آن؛ عدم تهدید امنیت منابع غذایی انسان؛ عدم تداخل در فرآیند تولید برق با سایر روش‌ها، نظیر استفاده از بیومس گیاهی در تولید برق، به-دلیل عدم نیاز به چیدن و درو نمودن گیاه.

با عنایت به موارد فوق الذکر و در راستای عملیاتی نمودن طرح تحقیقاتی فوق در داخل کشور، موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- بومی سازی این روش و انطباق آن با شرایط اقلیمی کشور؛
- بررسی توان گونه‌های مختلف گیاهان غرقابی، غیر غرقابی، شوررست و گیاهان مناطق خشک در تولید برق در کشور؛
- استفاده از دانش و تجربه متخصصین رشته‌های مختلف به‌منظور حداکثر بهره‌گیری از پتانسیل‌های طبیعی، نظیر شناسایی و تعیین توان گونه و سویه-های بومی در فرآیند، معرفی ساختارهای جدید و منطبق با دانش روز و سازگار با محیط زیست؛
- بررسی امکان استفاده از ترکیبات نانو در ساخت الکترودهای پیل سوختی میکروبی گیاهی؛
- بکارگیری گونه‌های مختلف و بومی ریزسازواره‌ها در تهیه بیوفیلم برای ارتقا عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی؛
- مطالعات جامع " ارزیابی چرخه عمر" و نیز بررسی-های فنی- اقتصادی دقیق برای توسعه روش
- بررسی امکان پیاده سازی طرح در شالیزارها، تالاب-ها، سایر جوامع گیاهی و مناطق شهری (بوستان‌های

- and Arundo donax, Bioresource Technology, 101(10), pp. 3541-3547
- 11- Kuijken, R.C., 2011. Quantification of exudation for the plant microbial fuel cell. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, Vol.76, No.2, pp.15-18
- 12- Cervantes-A.R., Arocha-Across. A.A., Ortega- Clemente L.A., 2012. Electricity generation in sediment plant microbial fuel cells(SPMFC) in warm climates using Typha domingensis Pers. Int. Research J. of Biotechnology, Vol.3, No. 9, pp.166-173
- ۱۳- علایی، ا.، بیابانی، ط.، وکیلی، ف. "شناسایی عوامل مخرب محیطی تاثیرگذار بر اکو سیستم جنگل‌های حرا در خلیج نایبند عسلویه و ارائه راهکارهای مناسب برای کنترل آن‌ها و حفظ محیط زیست"، پژوهشگاه صنعت نفت، زمستان ۱۳۸۴، صفحات ۸-۴.
- ۱۴- سلحشور دلپوند، ف.، ناظمی، ا.ح.، یزدانی، م.ح.، "بهبود مدیریت توزیع آب در اراضی شالیزاری"، دوازدهمین همایش کمیته آبیاری و زهکشی ایران، مدیریت آبیاری در ایران، چالش‌ها و چشم اندازها، اسفند ۱۳۸۸- تهران- ایران.
- 5- Strike, D.P.B.T.B., Hamelers, H.V. M., Buisman, C. J.N., 2010. Solar Energy Powered Microbial Fuel Cell with a Reversible Bio electrode. Environmental Science & Technology, 2010, 44: 532-537
- 6- Surajit, D., Neelam, M., 2010. Recent developments in microbial fuel cells: a review, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol.69, pp.727-731
- 7- Logan, B. E., Hamelers, B., 2006. Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, Vol.40, No. 17, pp. 5181-5192.
- 8- Vaez, M., Karimi-Rad, Sh., Tavakoli, Sh., Diba, H., 2015. Microbial Fuel Cells, Features and Developments. Current World Environment, vol. 10 (Special issue1), pp. 637-643.
- 9- Strike, D., Hamelers, B., PlantPower, 2013. Seventh framework programme FP7/2007-2013 in: www.plantpower.eu
- 10- Helder, M., Strike, D., Hamelers, H.V.M., Kuhn, A.J., Blok, C., Buisman, C.J.N, 2010. Cocurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala*