



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	هشت
فهرست شکل ها.....	۵۵
چکیده.....	۱
<b>فصل نخست: بررسی اهمیت موضوع و مفاهیم علمی مرتبط با آن</b>	
۱-۱ بحران جهانی انرژی و محیط زیست.....	۳
۲-۱ چرخه انرژی تجدید پذیر بر پایه زیست توده.....	۴
۱-۲-۱ تولید زیست توده توسط فرایند فتوستتر.....	۶
۲-۲-۱ هیدرولیز و تخمیر.....	۶
۳-۱ نیاز به منابع آب و تصفیه پساب ها.....	۸
۴-۱ پیل های سوختی میکروبی.....	۹
۵-۱ کاربردهای پیل سوختی میکروبی.....	۱۲
۱-۵-۱ تولید برق.....	۱۲
۲-۵-۱ تصفیه پساب ها.....	۱۳
۳-۵-۱ تولید هیدروژن.....	۱۳
۴-۵-۱ حذف مواد شیمیایی.....	۱۴
۵-۵-۱ حسگرهای زیستی.....	۱۴
۶-۱ مقایسه پیل های سوختی میکروبی با فرایندهای بیواتانول و متان زایی.....	۱۴
۱-۶-۱ فناوری های متان زایی و پیل سوختی میکروبی.....	۱۴
۲-۶-۱ فناوری های بیواتانول و پیل سوختی میکروبی.....	۱۵
۷-۱ بررسی جامعه میکروبی و زنجیره تنفسی در آن ها.....	۱۶
۸-۱ تکثیر میکروبی و ساز و کار نابودی آن ها.....	۱۸
۹-۱ چگونگی انتقال الکترون ها از سطح میکروب به سطح آند پیل سوختی.....	۱۹
۱۰-۱ هدف از پژوهش پیش رو.....	۲۴
<b>فصل دوم: بررسی پژوهش های پیشین و ارتباط پژوهش پیش رو با آن ها</b>	
۱-۲ بررسی پژوهش های پیشین در زمینه مدل سازی پیل های سوختی میکروبی.....	۲۶
۲-۲ ارتباط پژوهش پیش رو با مطالعات پیشین.....	۳۱
<b>فصل سوم: بررسی ساختار مدل</b>	
۱-۳ معادلات سرعت.....	۳۳
۱-۱-۳ معادله سرعت مصرف سوسترا.....	۳۳
۲-۱-۳ معادله سرعت پدیده خود-اکسایشی میکروب های فعال.....	۳۵
۳-۱-۳ معادله سرعت غیر فعال شدن میکروب های فعال.....	۳۶

۳۶	..... ۲-۳ معادله بقای جرم سوسترادر بیوفیلم
۳۸	..... ۳-۳ بررسی ضریب انتقال جرم خارجی
۳۹	..... ۴-۳ معادله بقای جرم سوسترادر حجم مایع آنولیت
۴۰	..... ۵-۳ معادله پتانسیل الکتریکی و قانون اهم
۴۴	..... ۶-۳ بررسی مقاومت های اهمی
۴۵	..... ۷-۳ معادله بقای جرم زیست توده
۴۸	..... ۸-۳ بررسی مدل مورد استفاده جهت تخمین پارامترهای طراحی
۵۰	..... ۹-۳ شاخص های عملکردی پیل سوختی میکروبی
۵۱	..... ۱۰-۳ روش حل

#### فصل چهارم: نتایج بدست آمده و تجزیه و تحلیل آن ها

۵۶	..... ۱-۴ بررسی شرایط مرجع
۶۰	..... ۲-۴ اثر تغییر پتانسیل آند و غلظت سوسترادر حجم مایع
۶۷	..... ۳-۴ بررسی اثر حالت جریان بر عملکرد پیل سوختی میکروبی
۶۷	..... ۱-۳-۴ جریان منقطع
۷۰	..... ۲-۳-۴ جریان پیوسته
۷۶	..... ۴-۴ بررسی اثر بار الکتریکی خارجی ( $R_{EXT}$ ) روی عملکرد پیل سوختی میکروبی
۸۱	..... ۵-۴ تخمین پارامترهای طراحی برای پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل

#### فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۲	..... ۱-۵ جمع بندی و نتیجه گیری
۹۵	..... ۲-۵ پیشنهادات
۹۶	..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: انرژی تجدید پذیر خورشیدی و انرژی‌های سرچشمه گرفته از آن- [۱]..... ۴
- شکل ۲-۱: نمایی کلی از چرخه تولید انرژی بر پایه زیست توده- [۳]..... ۵
- شکل ۳-۱: نمایی از فرایند های هیدرولیز، تخمیر، اسید زایی و متان زایی، محصولات و مواد اولیه هر کدام- [۳]..... ۷
- شکل ۴-۱: نمایی کلی از پیل سوختی میکروبی و مراحل انجام فرایند آن - [۶]..... ۱۰
- شکل ۵-۱: زنجیره تنفسی درون سلول میکروب‌ها و پتانسیل کاهش متناظر با هر مرحله- [۶]..... ۱۶
- شکل ۶-۱: نمایی از نحوه افزایش الکترون‌های حاصل از اکسیداسیون سوبسترا، تولید انرژی، تکثیر سلول‌های جدید فعال و سازوکارهای نابودی آن‌ها- اقتباس از [۱۹]..... ۱۸
- شکل ۷-۱: انتقال الکترون از سطح خارجی میکروب به سطح آند توسط مواد واسط درون زا و برون زا- [۱۷]..... ۲۱
- شکل ۸-۱: انتقال مستقیم الکترون از سطح سلول میکروب به سطح آند با تماس مستقیم فیزیکی بین آن‌ها- [۱۷]..... ۲۲
- شکل ۹-۱: انتقال الکترون از سطح سلول میکروب به سطح آند توسط نانوسیم رسانا- [۱۷]..... ۲۳
- شکل ۱۰-۱: گونه میکروبی از خانواده (الف) ژئوباکتر (ب) شوئولا و نانوسیم های ایجاد شده- [۶]..... ۲۳
- شکل ۱-۲: مقایسه شبیه سازی مدل [۲۴] و نتایج آزمایشگاهی [۴] در غلظت ۱ میلی مولار استات - [۲۴]..... ۲۸
- شکل ۱-۳: شمای ساده بیوفیلم چسبیده به سطح الکتروود آند و لایه مرزی غلظتی..... ۳۷
- شکل ۲-۳: الگوریتم حل معادلات مذکور در فصل سوم..... ۵۴
- شکل ۱-۴: خروجی‌های مدل برای حالت مرجع، (الف) پروفایل‌های غلظت و پتانسیل، (ب) جز حجمی میکروب‌های فعال در طول بیوفیلم، (ج) تغییر ضخامت بیوفیلم با زمان و (د) روند تغییرات چگالی جریان با زمان..... ۵۸
- شکل ۲-۴: تغییرات بازده کلومبیک با غلظت بی بعد سوبسترا در حجم مایع..... ۶۱
- شکل ۳-۴: (الف) روند تغییرات چگالی جریان و (ب) ضخامت بیوفیلم با غلظت بی بعد سوبسترا در حجم مایع..... ۶۲
- شکل ۴-۴: جمله نرنست- موند نسبت به پتانسیل آند..... ۶۳
- شکل ۵-۴: تغییرات چگالی جریان با پتانسیل سطح آند..... ۶۴
- شکل ۶-۴: تغییرات چگالی جریان با زمان، (الف) غلظت سوبسترای اشباع و پتانسیل‌های مختلف و (ب) پتانسیل آند اشباع و غلظت‌های مختلف..... ۶۶
- شکل ۷-۴: توزیع میکروب‌های فعال در بیوفیلم، (الف) پتانسیل آند محدود کننده، (ب) غلظت سوبسترای محدود کننده..... ۶۷

- شکل ۴-۸: مقایسه و درست آزمایی نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی [۴] برای زوج استات/ژئوباکتر سولفورریداستر ..... ۶۹
- شکل ۴-۹: تغییرات جریان الکتریکی با زمان در آند با جریان منقطع و تزریق ۱ میلی مولار استات در هر پالس ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۰: هندسه مورد بررسی در حالت پیوسته و بیوفیلم تشکیل شده روی سطح داخلی آن ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۱: عملکرد محفظه آندی در جریان پیوسته حالت مرجع، (الف) تغییرات چگالی جریان متوسط با زمان، (ب) تغییرات غلظت و پتانسیل در طول بیوفیلم در انتهای لوله، (ج) تغییرات غلظت در حجم آنولیت و ضخامت بیوفیلم در طول لوله، (د) جز حجمی زیست توده فعال در طول بیوفیلم در ابتدا و انتهای لوله ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۲: تاثیر دبی ورودی بر بازده تصفیه، نسبت به مورد ۱ جدول ۴-۴ ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۳: رفتار دینامیکی بیوفیلم در تولید جریان الکتریکی در جریان پیوسته آنولیت ..... ۷۵
- شکل ۴-۱۴: تاثیر تغییر غلظت سوبسترای ورودی بر چگالی جریان و بازدهی تصفیه در حالت جریان پیوسته ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۵: منحنی پلاریزاسیون و چگالی توان الکتریکی برای یک پیل سوختی میکروبی نمونه [۲] ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۶: منحنی های پلاریزاسیون و چگالی توان تحت شرایط حالت مرجع ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۷: اثر کاهش ضریب هدایت الکتریکی بیوفیلم در منحنی های پلاریزاسیون و چگالی توان ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸: اثر افزایش ضخامت لایه مرزی غلظتی در منحنی های پلاریزاسیون و چگالی توان ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۹: ساختار و هندسه پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل - [۴۳] ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۰: برازش مدل بر پایه هدایت الکترون ها و داده های آزمایشگاهی برای پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل در مقاومت ۱۰۰ اهم ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۱: مقایسه خروجی مدل بر اساس پارامترهای بهینه شده و داده های آزمایشگاهی برای مقاومت ۵۰ اهم جهت درست آزمایی پارامترهای تخمین زده شده ..... ۸۶
- شکل ۴-۲۲: (الف) پروفایل های غلظت و پتانسیل نسبی بی بعد در طول بیوفیلم، (ب) توزیع میکروب های فعال درون بیوفیلم، (ج) تغییرات ضخامت بیوفیلم با زمان، (د) تغییرات جریان با زمان برای سامانه شکل ۴-۱۹ با پساب لینی و لجن فعال ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۳: کاهش جریان تولیدی در سامانه شکل ۴-۱۹ در اثر رشد ضخامت بیوفیلم ..... ۸۹
- شکل ۴-۲۴: منحنی پلاریزاسیون و چگالی توان برای پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل ..... ۹۰

## چکیده

پیل های سوختی میکروبی یکی از فناوری های نوپا در زمینه بازیابی انرژی موجود در پساب ها و تصفیه هم زمان آنهاست که در سال های اخیر توجه زیادی را به سوی خود جلب نموده است. در پژوهش پیش رو مدلی بر اساس هدایت مستقیم الکترون ها در بیوفیلم ارائه و نتایج شبیه سازی آن با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. مدل حاضر قادر است نتایج آزمایشگاهی را با دقت مناسبی پیش گویی نماید. همچنین بررسی تغییرات پتانسیل آند نشان داد که در یک محدوده جزیی در اطراف پتانسیل نیم اشباع، جریان از مقدار صفر به مقدار اشباع خود رسیده و تغییرات غلظت سوپسترا نیز اثر مشابهی را در محدوده وسیع تری در پی داشت. بر طبق دو مورد اخیر بیشینه چگالی جریان قابل دستیابی از جامعه میکروبی خالص ژئوباکترسولفورریداسنز و با سوپسترای استات  $2/42$  آمپر بر مترمربع پیش گویی شد. در جریان منقطع سوپسترا در آند، پس از پایدار شدن جامعه میکروبی، الگوی جریان ثابت و بیشینه آن برابر با  $3/12$  میلی آمپر گردید. محفظه آندی برای نخستین بار در حالت جریان پیوسته سوپسترا مدل و شبیه سازی شد. نتایج بدست آمده از اجرای مدل برای جریان پیوسته نشان داد که برای یک محفظه آندی لوله ای شکل، کاهش قطر و افزایش طول، از لحاظ چگالی جریان تولیدی و بازده تصفیه شرایط مناسب تری را ایجاد می نماید. در این حالت، افزایش غلظت تأثیری در بازدهی تصفیه نداشت و تنها سبب افزایش تولید چگالی جریان گردید. علاوه بر این، برای نخستین بار امکان تحلیل پلاریزاسیون پیل سوختی میکروبی با استفاده از مدل بر پایه هدایت فراهم آمد. این امر با تعریف یک شرط مرزی نوین برای مدل بر پایه هدایت، محقق شد. نتایج نشان داد که برای یک بیوفیلم متشکل از ژئوباکترسولفورریداسنز، بخش زیادی از اتلاف ولتاژ ناشی از مقاومت های انتقال جرم می باشد. مدل امکان استفاده از تحلیل پلاریزاسیون برای بررسی اثر ضریب هدایت الکتریکی بیوفیلم و ضخامت فیلم غلظتی به صورت کمی را، روی عملکرد پیل سوختی میکروبی فراهم آورد؛ بررسی اثر این دو از طریق آزمایشگاهی قابل انجام نیست. با کاهش ضریب هدایت الکتریکی بیوفیلم و افزایش ضخامت فیلم غلظتی، به ترتیب اثر مقاومت های اهمی و انتقال جرم تشدید شده و چگالی توان خروجی از پیل کاهش یافت. در نهایت برای نخستین بار، پارامترهای طراحی یک پیل سوختی میکروبی جهت تصفیه پساب لبنی با استفاده از لجن فعال، با استفاده از مدل ارائه شده و توسط الگوریتم ژنتیک تخمین زده و درست آزمایی شدند. نتایج نشان داد که برای پیل سوختی مذکور با استفاده از توری با مش  $300$  برای الکتروود آند، سطح موثر به میزان  $64/76\%$  افزایش یافته است. این میزان افزایش سطح از طریق آزمایشگاهی قابل اندازه گیری نیست. همچنین مطالعه منحنی پلاریزاسیون این سامانه نشان داد که مقاومت های اهمی ناشی از ضریب هدایت الکتریکی پایین جامعه میکروبی موجود، نقش اساسی را در کاهش سطح عملکرد پیل و چگالی توان خروجی از آن ایفا نموده است. رفتار پیل مذکور با وجود غلظت ثابت  $1$  میلی گرم اکسیژن خواهی شیمیایی بر سانتیمتر مکعب و در بار الکتریکی خارجی ثابت  $50$  اهم مورد بررسی قرار گرفت. این مسئله روشن ساخت که تحت شرایط موجود، بخش اعظم مقاومت انتقال جرم موجود، ناشی از وجود فیلم غلظتی با ضخامت  $187$  میکرون در مجاورت بیوفیلم است. ضخامت بیوفیلم تشکیل شده نیز به علت صرف نظر نمودن از پدیده جدایش در تخمین پارامترها، پیوسته رشد نمود و به مقدار پایدار و نهایی نرسید. این امر باعث شد که چگالی جریان تولیدی در ابتدا و در روز بیستم پایدار شده ولی پس از آن به علت افزایش مداوم مقاومت انتقال جرم داخلی شروع به کاهش نماید.

**واژگان کلیدی:** پیل سوختی میکروبی، مدل سازی و شبیه سازی، هدایت مستقیم، تخمین پارامترها، الگوریتم ژنتیک

## فصل نخست

### بررسی اهمیت موضوع و مفاهیم علمی مرتبط با آن

در این فصل از پژوهش، در ابتدا اهمیت پیل های سوختی میکروبی از دیدگاه انرژی و محیط زیست و لزوم پرداختن به آنها مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور در بخش ۱-۱ بحران جهانی انرژی و مشکلات زیست محیطی در دنیا در چند سال اخیر، معرفی شده و لزوم بهره گیری از انرژی های تجدید پذیر مورد بحث قرار می گیرد.

پس از بررسی چرخه انرژی های تجدید پذیر بر پایه زیست توده و فناوری های موجود در این رابطه در بخش ۱-۲، پیل های سوختی میکروبی و کاربردهای آنها در بخش های ۱-۴ و ۱-۵ بررسی خواهند شد؛ سپس مزایا و معایب این فناوری با سایر فناوری های زیستی مشخص خواهد شد.

در بخش ۱-۷، سوخت و ساز میکروبی و زنجیره تنفسی درون سلول آنها معرفی شده و در بخش ۱-۸ به مفاهیم و ساز و کارهای مرتبط با تکثیر سلولی و نابودی باکتری ها پرداخته می شود.

در بخش ۱-۹ نیز روش های انتقال الکترون از سطح میکروب ها به روی سطح آند پیل سوختی بررسی می شوند. این روش ها نقش بسزایی را در تعیین معادلات حاکم و پیکره اصلی مدل توصیف کننده فرایند ایفا می کنند.

در انتها نیز به تبیین هدف این پژوهش خواهیم پرداخت.

## ۱-۱ بحران جهانی انرژی و محیط زیست

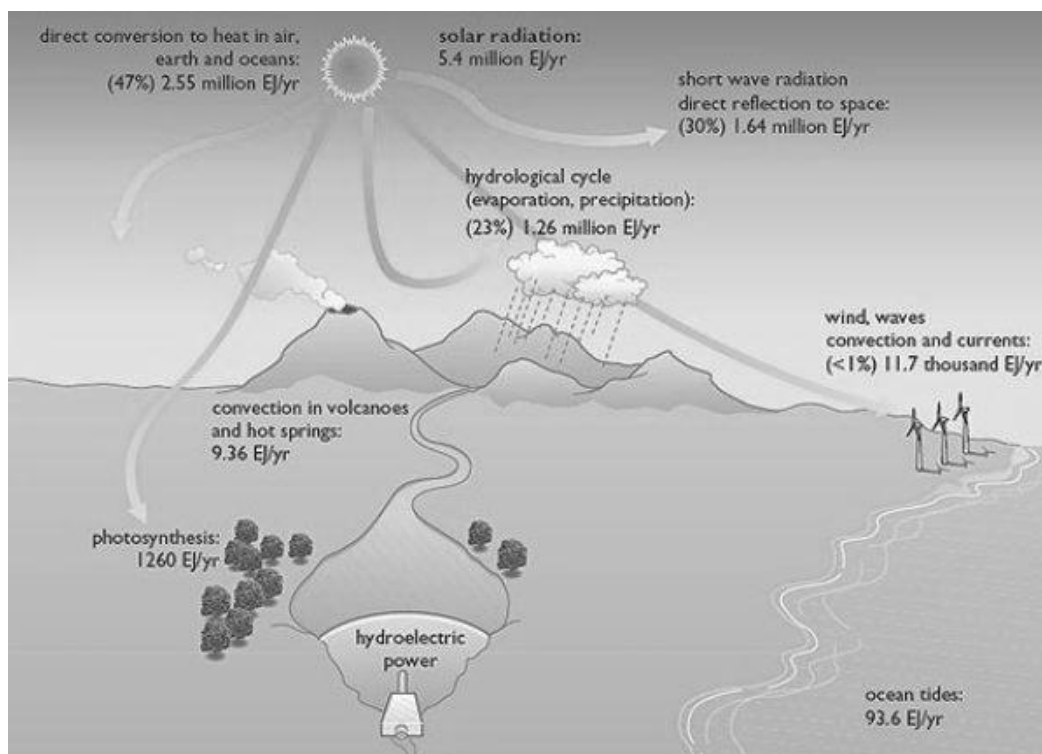
سوختهای فسیلی در یک قرن اخیر، تأثیر بسزایی روی رشد اقتصادی کشورهای پیشرفته گذاشته و باعث صنعتی شدن آنها شده است. ولی کاملاً روشن است که این منابع انرژی نمی‌توانند برای اقتصاد جهانی تا ابد پایدار بمانند. به شکل خوش‌بینانه‌ای، نفت و انرژی‌های مرتبط با آن تا یک‌صد سال آینده پایان نخواهند پذیرفت ولی با این حال انتظار می‌رود تا ۱۰ الی ۲۰ سال آینده تقاضا برای نفت بیش از عرضه آن توسط مخازن شناخته شده بشود [۱].

بر اساس تخمینی از رشد جمعیت و رشد اقتصادی همراه با آن و با در نظر گرفتن روند رشد تقاضای انرژی، میزان تقاضای انرژی در سال ۲۰۵۰ میلادی ۲۷ تراوات و در سال ۲۱۰۰ میلادی ۴۳ تراوات خواهد بود [۱]. بنابراین اگرچه نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ در کوتاه مدت می‌توانند نیاز انرژی را برآورده نمایند، ولی در دهه‌های آتی و با توجه به پیشی گرفتن تقاضای نفت از عرضه آن، نمی‌توانند به عنوان یک گزینه مناسب مطرح شوند.

این در حالی است که حتی در صورت یافتن منابع جدید نفت و یا افزایش بهره‌برداری از مخازن موجود، مشکل مهم تغییرات آب و هوایی نه تنها حل نمی‌شود، بلکه تشدید نیز خواهد شد. بدون شک رها سازی کربن ذخیره شده در سوخته‌های فسیلی، غلظت کربن دی‌اکسید را در جو افزایش می‌دهد؛ انباشتگی گازهای گلخانه‌ای در سال‌های اخیر سبب شده که دمای متوسط جهانی حتی از دماهای پیش از تاریخ نیز فراتر رفته و منجر به ذوب یخ‌های طبیعی و افزایش سطح دریاها بشود [۱]. بنابراین حتی جایگزینی نفت و گاز با سوخته‌های دیگری مانند ذغال سنگ، هیدرات متان و قطران ذغال سنگ نیز منجر به رها سازی گاز کربن دی‌اکسید بیشتر به جو، تشدید نمودن آسیب‌های زیست محیطی و شتاب بخشیدن به تغییرات آب و هوایی می‌گردد. بنابراین از این دیدگاه ما به روشی برای تولید انرژی نیازمندیم که با نرخ بیش از ۱٪ در هر قرن گاز کربن دی‌اکسید را به جو وارد ننماید. بزرگ‌ترین چالش پیش رو این است که علاوه بر برآورده نمودن نیاز روبه رشد انرژی، مسئله نشر گازهای گلخانه‌ای اضافی نیز به طور هم‌زمان برطرف گردد.

از این رو، انرژی‌های تجدید پذیری مانند انرژی خورشیدی، باد، زمین‌گرایی و انرژی حاصل از زیست توده گزینه‌های مناسبی به شمار می‌آیند. در این بین انرژی خورشیدی یک منبع انرژی مناسب و جذاب می‌باشد، زیرا علاوه بر تجدید پذیری به میزان زیادی نیز در دسترس می‌باشد. ولی به علت وجود مشکلات فنی و اقتصادی، در حال حاضر نمی‌توان در کوتاه مدت به طور کامل به این انرژی متکی بود.





شکل ۱-۱: انرژی تجدید پذیر خورشیدی و انرژی‌های سرچشمه گرفته از آن [۱]

در حدود ۲۰۰ تراوات از ۱۷۰۰۰۰ تراوات انرژی خورشیدی تاییده شده، به انرژی باد تبدیل می‌گردد؛ در حالی که از این میزان ۶۷ تراوات از طریق چرخه‌های آبی به انرژی آب و ۱۰۰ تراوات نیز از طریق فتوسنتز به شکل زیست توده ذخیره می‌گردد [۲]. نمایی از این امر در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. بخشی از فناوری‌های مرتبط با این انرژی‌ها مانند توربین‌های بادی، سدهای برقی، صفحات خورشیدی و فرایندهای تولید اتانول و متان از زیست توده در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند ولی با این حال، با رشد جوامع، بایستی نرخ رشد و توسعه این فناوری‌ها نیز افزایش یابد.

## ۲-۱ چرخه انرژی تجدید پذیر بر پایه زیست توده

همان گونه که پیش از این نیز اشاره شد، انرژی خورشیدی و انرژی‌هایی که از آن سرچشمه می‌گیرند، یک راهکار مناسب برای رفع چالش‌های انرژی و محیط زیست در درازمدت می‌باشند. ولی این امر کاملاً به چگونگی دریافت و استفاده از این انرژی بستگی دارد. خورشید در تمام روز و در تمام نواحی به شکل یکنواخت نمی‌تابد. بنابراین صفحات خورشیدی می‌توانند نیاز برق را در طول روز مرتفع سازند، ولی بدون وجود روش مناسبی برای ذخیره سازی این انرژی، نمی‌توان از آن به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی در تمام مدت شبانه روز استفاده کرد.

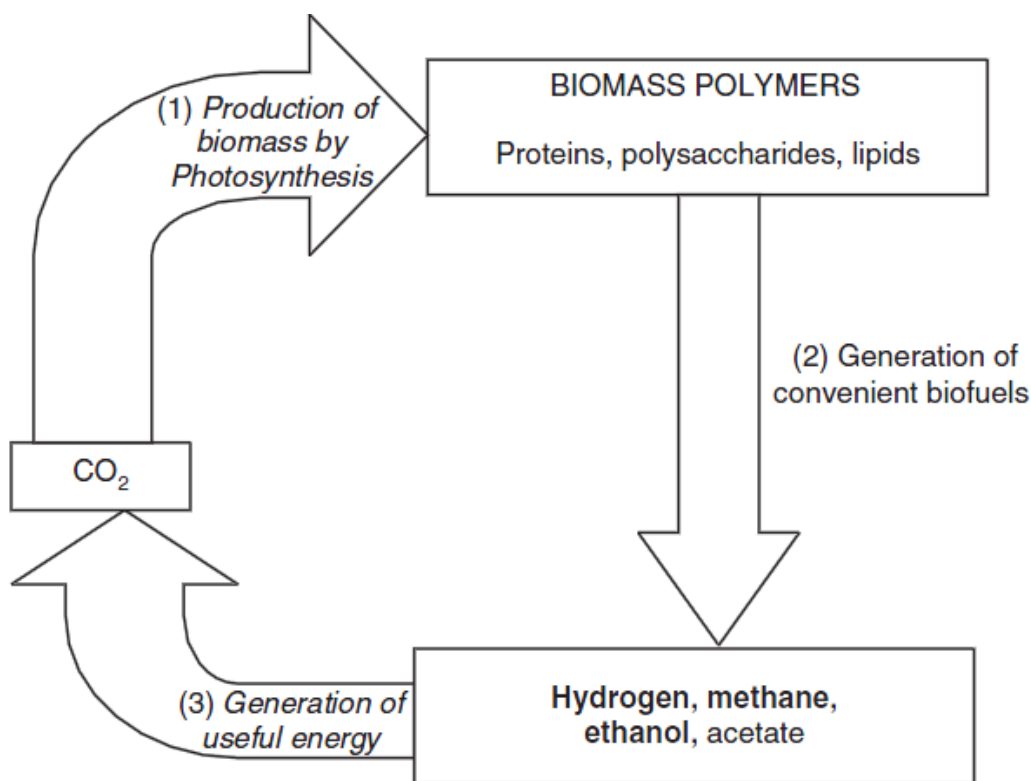
انرژی زیست توده شکلی از انرژی خورشیدی گرفته شده می‌باشد که در آن انرژی خورشیدی جهت فراوری و نقل و انتقال راحت تر به صورت فشرده در زیست توده ذخیره شده است. این ذخیره سازی از طریق فرایند فتوسنتز و جذب انرژی نور خورشید در پیوند مولکول‌های آلی زیست توده‌ها انجام می‌گیرد.

شکل ۱-۲ نمایی کلی از چرخه انرژی تجدید پذیر بر پایه زیست توده را نشان می‌دهد. در این شکل، میکروارگانسیم‌ها زیست توده را به سوخت تبدیل می‌نمایند. این چرخه شامل سه بخش اصلی است:

- تولید زیست توده توسط نور خورشید و فتوسنتز
- تولید سوخت زیستی مناسب
- تولید انرژی مفید از سوخت زیستی

در این چرخه، فتوسنتز انرژی خورشیدی را گرفته و طی یک فرایند کاهشی با حضور کربن دی اکسید، زیست توده را به شکل گیاه و جلبک ایجاد می‌نماید [۳]. در واقع در این مرحله انرژی خورشیدی به شکل انرژی پیوندهای مولکولی در مواد آلی تشکیل دهنده گیاهان و جلبک‌ها ذخیره می‌گردد.

در بیشتر موارد زیست توده‌ای که به عنوان منبع سوخت زیستی به کار می‌رود، از پلیمرهایی شامل پروتئین‌های، لیپیدها و پلی ساکاریدها ساخته شده است. این پلیمرهای پیچیده معمولاً برای استفاده مستقیم در تولید انرژی مناسب نیستند [۳]؛ زیرا شکستن و تجزیه آن‌ها به سختی صورت می‌گیرد. بنابراین یک سری واکنش‌های



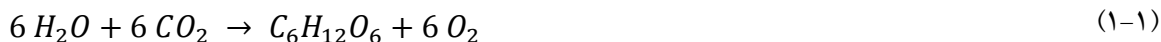
شکل ۱-۲: نمایی کلی از چرخه تولید انرژی بر پایه زیست توده [۳]

میکروبیولوژیکی جهت تبدیل زیست توده به سوخت زیستی مناسب مانند متان، هیدروژن و اتانول مورد نیاز است. استات نیز یک سوخت زیستی مفید به شمار می‌آید. این سوخت‌ها دارای ساختار مولکولی ساده‌تر بوده و به سهولت اکسید می‌گردند. فرایند تبدیل زیست توده به سوخت‌های زیستی شامل مجموعه‌ای از فرایندهای هیدرولیز، تخمیر، اسید زایی و متان زایی می‌باشد که در قسمت‌های آتی به آن‌ها پرداخته می‌شود. میکروارگانیسم‌ها می‌توانند در هر کدام از این فرایندها حضور داشته باشند.

سوخت‌های نهایی می‌توانند پس از جمع‌آوری، با اکسیژن واکنش داده و انرژی مفید تولید نمایند [۳]. این فرایند در واقع همان اکسیداسیون سوخت زیستی می‌باشد که در نهایت منجر به تولید انرژی مفید می‌گردد. این اکسیداسیون شامل سوزاندن سوخت زیستی و تولید گرما و یا اکسیداسیون مستقیم آن‌ها در پیل سوختی و بازیابی انرژی به شکل جریان الکتریکی است. کربن دی‌اکسید تولید شده طی سوخت و ساز میکروبی و فرایند اکسیداسیون سوخت‌های زیستی به ترتیب در بخش‌های دو و سه، نیز توسط فرایند فتوسنتز بازیافت شده و بنابراین فرایندهای بر پایه زیست توده از دیدگاه تولید کربن اضافی خنثی می‌باشند.

### ۱-۲-۱ تولید زیست توده توسط فرایند فتوسنتز

فتوسنتز یک واکنش بیوشیمیایی است که انرژی نور را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کند. مواد اولیه برای فتوسنتز آب و کربن دی‌اکسید است که تشکیل دهنده بخش نخست در چرخه شکل ۱-۲ می‌باشد. یک واکنش فتوسنتز برای تولید گلوکز در زیر مشخص شده است.



اگرچه واکنش ۱-۱ از نظر ترمودینامیکی نامطلوب است، ولی اندام‌های فتوسنتزی در سلول‌های زیستی انرژی نور را گرفته و انرژی لازم برای انتقال الکترون از آب به کربن دی‌اکسید (به ازای هر مول گلوکز ۲۸۷۰ کیلوژول انرژی) را تأمین می‌نمایند [۳].

با توجه به طبیعت واکنش فتوسنتزی (واکنش ۱-۱) و مصرف انرژی نور خورشید در آن، می‌توان گفت که هدف کلیه سامانه‌های تولید انرژی از زیست توده، به جلو بردن واکنش فتوسنتزی در جهت عکس آن می‌باشد. روش بدست آوردن انرژی از زیست توده به نوع زیست توده بستگی دارد.

### ۲-۲-۱ هیدرولیز و تخمیر

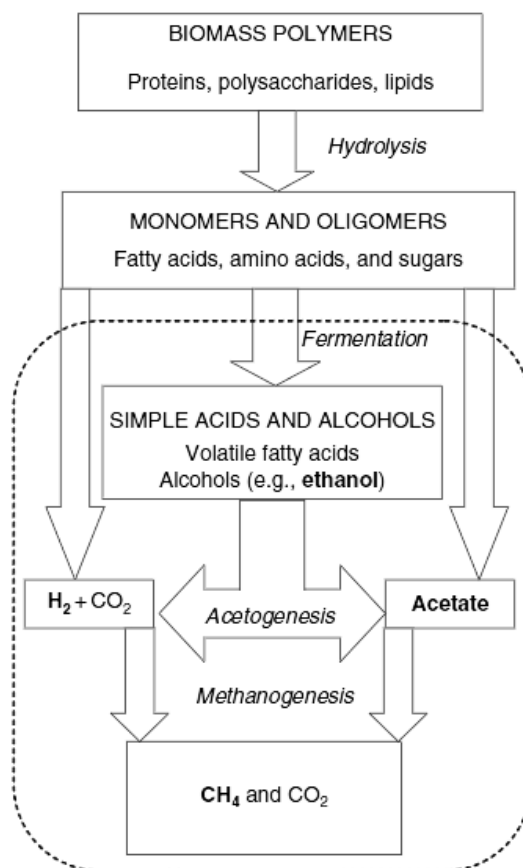
هیدرولیز نخستین گام در تبدیل زیست توده‌هایی مانند پساب‌ها و پسماندهای کشاورزی به سوخت‌های زیستی ارزشمند می‌باشد. طی فرایند هیدرولیز، جامدات آلی و مولکول‌های بزرگ پلیمری به مولکول‌های قابل حل و قابل نفوذ در سلول‌های زیستی تبدیل می‌شوند. در این فرایند، میکروارگانیسم‌ها آنزیم‌هایی را تولید می‌نمایند که پلیمرهای بزرگ مانند پروتئین‌ها و لیپیدها را به مونومرها و ساختارهای کوچک‌تر تبدیل می‌نمایند [۳]. این دسته از مولکول‌های کوچک‌تر برای سوخت و ساز میکروبی در مراحل بعدی مفید و قابل استفاده می‌باشند.

فرایند تخمیر نیز با باز آرای پیوندهای مولکولی و شکستن آن‌ها به محصولات کوچک‌تر، سوخت‌های زیستی را تولید می‌نماید. مجموعه فرایندهای هیدرولیز، تخمیر و محصولات و مواد اولیه متناظر با هر کدام از آن‌ها در شکل ۳-۱ مشاهده می‌گردد.

محصولات فرایند تخمیر می‌تواند شامل اسیدهای چرب فرار، الکل‌های ساده، استات، هیدروژن و کربن دی‌اکسید باشند. در صورت تشکیل اسیدهای چرب فرار و الکل‌ها، در گام بعدی استات، هیدروژن و کربن دی‌اکسید توسط فرایند اسید زایی تولید می‌گردند. برای مثال اتانول از تخمیر مستقیم شکرها مانند گلوکز طبق واکنش زیر به دست می‌آید [۳].



همان‌گونه که در شکل ۳-۱ مشخص است، متان در آخرین مرحله فرایندهای زیست‌شناختی و طی فرایند متان‌زایی تولید می‌گردد. میکروبهایی که در فرایند متان‌زایی شرکت می‌کنند، متان‌زاها<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. این میکروبه‌ها شامل دو دسته می‌باشند که یکی از آن‌ها هیدروژن تولیدی و دیگری استات تولیدی از فرایندهای تخمیر و اسید زایی را به متان تبدیل می‌نمایند. این واکنش‌ها به ترتیب در زیر آمده‌اند [۳]:



شکل ۳-۱: نمایی از فرایندهای هیدرولیز، تخمیر، اسید زایی و متان‌زایی، محصولات و مواد اولیه هر کدام [۳]

<sup>1</sup> Methanogens



با توجه به شکل ۱-۳، می‌توان گفت تمام الکترون‌های محصولات تخمیر از طریق هیدروژن و استات در نهایت به متان با عدد اکسیداسیون ۴- منتقل می‌شوند.

با احتراق گاز متان تولید شده می‌توان، انرژی منتقل شده به آن را آزاد نمود. علاوه بر این امر می‌توان با اکسیداسیون مستقیم محصولات پیش از متان مانند استات و هیدروژن در پیل‌های سوختی، انرژی و الکترون‌های ذخیره شده را بازیابی نمود.

### ۳-۱ نیاز به منابع آب و تصفیه پساب‌ها

در کنار بحران انرژی و محیط زیست که شرح آن در بخش ۱-۱ به تفصیل رفت، بحران آب و کمبود منابع آن نیز از مسائل مهم پیش روی جوامع است؛ لذا حفاظت از منابع آب شیرین جهت برآورده سازی نیاز افزایش یافته جوامع بسیار حیاتی است و بیش از این نمی‌توان منابع نهفته آبی را هدر داد. برای مثال پساب‌های صنعتی و خانگی در همه جا وجود دارند و منبع نهفته‌ای از آب و انرژی به شمار می‌آیند.

پساب‌ها یک منبع ارزشمند قابل بازیافت آب می‌باشند. اگرچه آن‌ها شامل مواد خطرناک و آلوده‌ای برای محیط زیست و سلامت عموم می‌باشند، ولی در حدود ۹۹٪ آن‌ها را آب تشکیل می‌دهد؛ لذا ایجاد و توسعه فناوری‌هایی برای تصفیه و جداسازی مواد آلوده پساب‌ها و ورود مجدد پساب‌های تصفیه شده به شبکه توزیع آب یک امر ضروری به نظر می‌رسد.

از طرفی پساب‌ها به شکل مواد آلی زیست تخریب پذیر، حاوی انرژی می‌باشند؛ این در حالی است که ما به جای بازیابی آن، انرژی اضافی را جهت تصفیه و جداسازی مواد آلاینده پساب به کار می‌گیریم.

تخمین زده می‌شود که پساب‌های خانگی و پساب صنایع فراوری غذایی در آمریکا حاوی ۱۷ گیگاوات انرژی باشند. این مقدار تقریباً معادل میزان انرژی است که در حال حاضر برای کل زیر ساخت‌های آبی در آمریکا مصرف می‌شود [۱]. بنابراین اگر بتوان این میزان انرژی را بازیابی نمود، زیرساخت‌های آبی از لحاظ انرژی خود کفا خواهند شد.

تا کنون فناوری‌های مختلفی جهت تصفیه پساب‌ها به وجود آمده‌اند که معروف‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها تصفیه زیست شناختی به روش لجن فعال می‌باشد. این فرایند قادر است تقاضای اکسیژن زیستی<sup>۱</sup> بالاتر از ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر را به کمتر از ۵ میلی گرم بر لیتر کاهش دهد. با گندزدایی بیشتر می‌توان تا ۹۹/۹۹٪ باکتری‌های

<sup>۱</sup> Biological Oxygen Demand (BOD)

موجود را حذف نمود [۲]. فناوری‌های پیشرفته تصفیه نیز مانند میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته جهت حذف آلاینده‌هایی به کار می‌روند که طی تصفیه‌های عادی و مرسوم از بین نمی‌روند. در این فرایندها تنها با صرف انرژی، مواد آلاینده و خطرناک از پساب جدا شده ولی انرژی نهفته در آن بازیابی نمی‌گردد. در راستای بازیابی هم‌زمان آب و انرژی از پساب‌ها، فرایند هضم بی‌هوازی با تولید متان می‌تواند یک گزینه مناسب باشد. با این وجود این فرایند به دمای بالا (۳۶ درجه سانتی‌گراد)، زمان اقامت بالا و پساب‌هایی با غلظت زیاد نیاز دارد.

با توجه به مطالب عنوان شده، برای مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، ایجاد و توسعه فناوری‌هایی که قادر به بازیابی هم‌زمان آب و انرژی از پساب‌ها و یا زیست توده‌هایی با محتوی آب بالا باشند، ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۴-۱ پیل‌های سوختی میکروبی<sup>۱</sup>

فرایند پیل سوختی میکروبی در یک دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند مواد آلی موجود در پساب‌ها و یا زیست توده‌ها اکسید شده و ضمن حذف از پساب‌ها، تولید انرژی می‌نمایند. بنابراین از دیدگاه بازیابی هم‌زمان آب و انرژی یک فناوری جذاب و جالب توجه به شمار می‌آید.

شکل ۴-۱، نمایی کلی و ساده از فرایند پیل سوختی میکروبی را نشان می‌دهد. به طور کلی پیل‌های سوختی میکروبی از دو محفظه جدا از هم آندی و کاتدی تشکیل شده‌اند. این دو محفظه توسط غشا تبادل یون که بین آن‌ها قرار دارد، از نظر فیزیکی از یکدیگر جدا شده‌اند. در هر محفظه یک الکتروود قرار دارد که از طریق یک مدار خارجی و یک مقاومت الکتریکی خارجی به یکدیگر متصل شده‌اند. مایع موجود در محفظه آند، آنولیت و مایع موجود در محفظه کاتد، کاتولیت نامیده می‌شود. واسطه عبور یون‌ها، شامل غشا و محیط مایع بر سر راه آن‌ها، نیز الکترولیت نام دارد.

در یک پیل سوختی میکروبی، میکروارگانیسم‌های موجود در محفظه آندی طی یک نیم واکنش افزایشی، مواد آلی موجود در آنولیت را شکسته و جریانی از الکترون‌ها را تولید می‌نمایند که با عبور از مراحل سوخت و ساز سلولی در میکرووب‌ها، برای آن‌ها انرژی تولید می‌نمایند. مواد آلی موجود در واقع همان سوبسترا (سوخت) پیل را تشکیل می‌دهند. همان گونه که در شکل ۴-۱ نیز مشخص است، با اکسید شدن سوبسترا درون توده میکروبی جریانی از الکترون‌ها، پروتون‌ها و کربن دی‌اکسید تشکیل می‌شود.

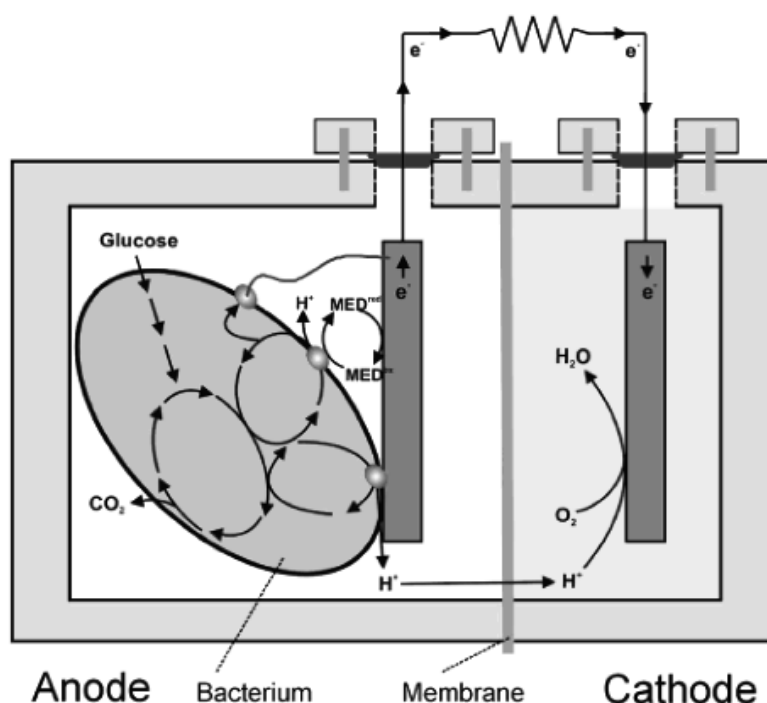
الکترون‌ها پس از خروج از سلول میکروبی به سطح آند پیل منتقل شده و از طریق الکتروود آند وارد مدار خارجی می‌گردند و با عبور از مقاومت الکتریکی خارجی توان الکتریکی تولید می‌نمایند. در این جا جریان

<sup>1</sup> Microbial Fuel Cells (MFCs)

الکتریکی معرف میزان و تعداد الکترون‌های تولید شده در واحد زمان و اختلاف پتانسیل الکتریکی نیز بیانگر انرژی قابل حمل توسط هر بار الکتریکی می‌باشد.

الکترون‌های تولیدی پس از عبور از مقاومت (بار) خارجی و از دست دادن انرژی خود از طریق الکتروود کاتد وارد محفظه کاتدی می‌شوند. در آن جا با حضور یون‌های هیدروژن نفوذ کرده از طریق الکترولیت، و طی یک نیم واکنش کاهش، با یک پذیرنده نهایی الکترون (مانند اکسیژن) ترکیب شده و محصولات نهایی (مانند آب) تولید می‌گردند. پس از طی این مراحل واکنش‌های افزایش/کاهش تکمیل شده و در نهایت با مصرف سوپسترا انرژی الکتریکی، گاز کربن دی اکسید و آب تولید می‌شود.

غشا تبادل یون علاوه بر جداسازی فیزیکی محفظه‌های آنود و کاتد و جلوگیری از ترکیب مستقیم گونه



شکل ۱-۴: نمایی کلی از پیل سوختی میکروبی و مراحل انجام فرایند آن - [۶]

الکترون دهنده و الکترون گیرنده، امکان عبور گزینشی یون‌های را از یک محفظه به محفظه دیگر فراهم می‌آورد. سمت و سوی انتقال این یون‌های بستگی به نوع غشای به کار رفته دارد.

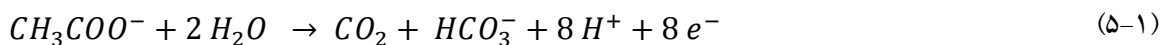
با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت، میکروب‌هایی که در محفظه آنودی رشد می‌کنند، فرایند انتقال الکترون از مولکول ماده آلی به الکتروود آنود را کاتالیز نموده و نقش بیوکاتالیست را برای فرایند بازی می‌نمایند [۲]. از این رو یکی از مزایای استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی این است که میکروب‌ها در آن به عنوان کاتالیست خودکفا بوده و پس از غیر فعال شدن، با تکثیر میکروبی، خود به خود جایگزین می‌شوند [۱].

برخی از میکروب‌ها می‌توانند الکترون ناشی از اکسیداسیون سوبسترا درون سلول خود را پس از طی زنجیره تنفسی به بیرون از سلول خود و در نهایت به یک الکترون گیرنده انتقال دهند. این گونه میکروب‌ها با عنوان میکروب‌های برون الکترون زا<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند [۱] و می‌توانند برای تولید توان الکتریکی در پیل‌های سوختی میکروبی مورد استفاده قرار گیرند. آن‌ها انرژی مورد نیاز خود را از طریق انتقال الکترون در یک سری واکنش‌های افزایش/کاهش درون سلول خود (زنجیره تنفسی<sup>۲</sup>) بدست می‌آورند. میکروب‌های موجود در آند به صورت بی‌هوازی تنفس می‌نمایند و لذا باید تا حد امکان از حضور اکسیژن در محفظه آند جلوگیری به عمل آورد. این میکروب‌ها در محفظه آندی می‌توانند به دو صورت معلق در آنولیت و یا به شکل بیوفیلم چسبیده به سطح الکتروکاتود وجود داشته باشند. البته طبق پژوهش‌های انجام شده بیوفیلم‌ها نقش اساسی را در کاتالیز نمودن فرایند واکنش اکسیداسیون در آند بر عهده دارند و در صورت نبود میکروارگانیسم‌های معلق عملکرد سامانه تغییر چندانی نمی‌کند [۴؛ ۵].

در فرایند تولید متان از زیست توده‌ها، نام‌گذاری به کار رفته برای فرایند، میکروارگانیسم‌ها و راکتور مربوطه به ترتیب به صورت متان زایی<sup>۳</sup> (و یا هضم بی‌هوازی)، متان زا<sup>۴</sup> و هضم کننده‌های بی‌هوازی<sup>۵</sup> می‌باشد؛ به روش مشابه می‌توان فرایند تولید الکترون از زیست توده را الکترون زایی<sup>۶</sup> با باکتری‌های برون الکترون زا در راکتور پیل سوختی میکروبی نام‌گذاری نمود [۱].

با توجه به شکل ۱-۳، مواد آلی مختلف پیش از تشکیل متان از جمله پروتئین‌ها، اسیدهای چرب، شکرها و استات می‌توانند به عنوان الکترون دهنده و یا سوبسترا (سوخت) در یک پیل سوختی میکروبی مورد استفاده قرار گیرند. پذیرنده‌های نهایی الکترون نیز می‌تواند شامل اکسیژن، پتاسیم هگزا سیانوفرات<sup>۷</sup> (و یا فریسیانید) و نیترات<sup>۸</sup> بوده و در محفظه کاتدی به صورت الکتروشیمیایی و یا بیوالکتروشیمیایی کاهش یابند [۲]. استفاده از فریسیانید به جای اکسیژن در نهایت موجب دست‌یابی به پتانسیل بالاتر برای پیل می‌گردد [۶].

اگر از استات به عنوان الکترون دهنده و از اکسیژن به عنوان الکترون گیرنده نهایی استفاده گردد، نیم‌واکنش‌های آندی و کاتدی به ترتیب ذیل خواهند بود [۳]:



<sup>1</sup> Exoelectrogens

<sup>2</sup> Respiratory chain

<sup>3</sup> Methanogenesis

<sup>4</sup> Methanogens

<sup>5</sup> Anaerobic digesters

<sup>6</sup> Electrogenesis

<sup>7</sup>  $K_3Fe(CN)_6$

<sup>8</sup>  $NO_3^-$