

برونداد تخصصی

# انرژی‌های تجدیدپذیر





برونداد تخصصی

## انرژی‌های تجدیدپذیر

ویژه‌نامه انرژی زیست توده (۱)

عنوان پروژه: رصد فن‌آوری به‌منظور شناخت جدیدترین دستاوردها و فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر

کارفرما: سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا)

پژوهشگر: پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی پشتیبان: گروه انرژی‌های تجدیدپذیر

پژوهشکده پشتیبان: پژوهشکده انرژی و محیط‌زیست

مدیر پروژه: مهندس ثریا رستمی

مجری پروژه: دکتر حمیدرضا لاری

ناظر پژوهشگاه: دکتر محمد چمنی

ناظر کارفرما: دکتر اکبر شعبانی‌کیا

همکاران این گزارش:

دکتر مهسا صدیقی- مهندس ثریا رستمی - مهندس سارا جوکار

شماره ۶- آذرماه ۱۴۰۲

۴.....	جزئیات برنامه مشترک وزارت نیرو و صنایع برای توسعه تجدیدپذیرها
۶.....	محورهای شاخص انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۴ و استارت‌آپ‌های نوآور
۲۰.....	استراتژی ایالات متحده در مدیریت زیست‌توده و زباله جامد شهری
۲۴.....	مروری بر فناوری‌های زیست‌توده و افق پیش‌رو
۴۱.....	بیوگاز و بیومتان، منبع ارزشمند انرژی پاک
۴۷.....	تولید بیوالکتروشیمیایی متان (BEP2G)
۵۰.....	بیومتان: سوختی تجدیدپذیر برای آینده‌ای پایدار
۵۴.....	کمپسیون انرژی ویولیا و واگا، یکی از بزرگ‌ترین واحدهای تولید بیومتان در اروپا
۵۶.....	سوخت زیستی جلبک
۵۷.....	بیودیزل، منبع محلی انرژی تجدیدپذیر
۶۳.....	زیست‌شناسی مصنوعی و فناوری‌های کشف سوخت زیستی
۶۶.....	نماهای جلبکی و افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان
۷۰.....	همکاری هند و سوئد در مزارع هوشمند خورشیدی
۷۳.....	سیستم نمک‌زدایی خورشیدی کارآمد محققان مؤسسه علوم هند
۷۵.....	آغاز ساخت ۴۵۰۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی با بازگشایی اسناد مناقصه
۷۶.....	تفاهم‌نامه اعطای تسهیلات توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر بین ساتبا و صندوق نوآوری و شکوفایی
۷۸.....	اولین زمین‌بازی کودکان در دنیا مجهز به سیستم تصفیه هوای فتوسنتتیک

## جزئیات برنامه مشترک وزارت نیرو و صنایع برای توسعه تجدیدپذیرها



وارد مدار کردن ۴۰۰۰ مگاوات انرژی تجدیدپذیر به شبکه سراسری برق از جمله برنامه‌های توسعه‌ای وزارت نیرو در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر است که در قالب مشارکت با صنایع در حال اجرا است و در همین رابطه تاکنون بالغ بر ۳۵۰۰ مگاوات پروانه احداث نیروگاه توسط وزارت نیرو صادر شده است. وزارت نیرو بنا دارد تا در قالب برنامه‌ای تحت عنوان توسعه نیروگاهی جهت تأمین برق صنایع به دو روش متفاوت و در تعامل با صنایع اقدام به توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر کند که امید می‌رود در پی به نتیجه رسیدن این اقدامات، علاوه بر افزایش ظرفیت تولید برق کشور، میزان تأمین برق صنایع به‌ویژه در فصل تابستان افزایش یابد. بر اساس این اقدام صنایع می‌توانند در زمین‌هایی که مالکیت آن را در اختیار دارند، در هر نقطه از کشور که مایل باشند و البته زیر ساخت‌های فنی و مهندسی احداث نیروگاه در آن فراهم باشد، اقدام به احداث نیروگاه تجدیدپذیر نمایند و پس از تحویل برق تولیدی آن به شبکه سراسری، معادل همین برق را در محل صنعت خود از شبکه تحویل بگیرند. اتفاقی که علاوه بر کاهش قابل توجه هزینه‌های انتقال برق برای صنایع، به آن‌ها اجازه می‌دهد تا از دیگر تسهیلاتی که در همین زمینه وزارت نیرو برای آن‌ها در نظر گرفته است، بهره‌مند شوند. از جمله این تسهیلات در اولویت قرار گرفتن این صنایع برای تأمین برق پایدار در فصل گرم سال است. علاوه بر این موارد و با هدف افزایش جذابیت احداث نیروگاه تجدیدپذیر

توسط صنایع، عدم اعمال محدودیت در دوران مدیریت بار معادل ۳۰ درصد بالاتر از ظرفیت تولیدی نیروگاه احداث شده مشمول صنایع خواهد شد.

مجموعه اقدامات و برنامه‌هایی که سبب شده است تا هم اکنون بالغ بر ۳۵۰۰ مگاوات پروانه احداث نیروگاه تجدیدپذیر برای صنایع صادر شود و پیش‌بینی می‌شود در ادامه مسیر به‌واسطه استقبال صنایع از این برنامه شاهد افزایش پروانه‌های صادر شده احداث نیروگاه باشیم. هر چند این همه برنامه‌ها و اقدامات وزارت نیرو و دولت سیزدهم برای جذب مشارکت صنایع در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر نیست و در قالب ماده ۱۶ قانون جهش دانش‌بنیان نیز صناعی که بالای یک مگاوات مصرف انرژی برق دارند، قرار است سالانه یک درصد انرژی خود را از محل انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین کنند و هر سال نیز یک درصد به این ظرفیت اضافه کنند. بر این اساس صناعی که در مسیر تحقق این برنامه با وزارت نیرو تعامل دارند نیز در فصل گرم سال مشمول تسهیلاتی که در جریان توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر از محل قانون مانع‌زدایی از صنعت برق به آن اشاره شد، قرار خواهند گرفت و در صورت عدم مشارکت در این طرح نیز باید معادل این یک درصد برق مورد نیاز را از طریق تابلوی سبز بورس خریداری کنند.

مجموعه روش‌ها و اقداماتی که به آن اشاره شد سبب شده استقبال خوبی از سوی صنایع از برنامه‌های توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور صورت پذیرد و به عنوان نمونه تنها مجموعه فولاد مبارکه اصفهان به تنهایی قرار است ۶۰۰ مگاوات انرژی تجدیدپذیر وارد شبکه سراسری برق کشور کند و شرکت ملی مس نیز توسعه ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر تا ۱۰۰۰ مگاوات را در برنامه خود گنجانده است.

در کنار این برنامه‌ها که عمدتاً مخاطب آن صنایع بزرگ هستند، صنایع کوچک و متوسط نیز قرار است برنامه‌های جداگانه‌ای را در پیش بگیرند که به عنوان نمونه، توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شهرک‌های صنعتی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات تا ۳ مگاوات از جمله این برنامه‌هاست که مشمول تسهیلات در نظر گرفته شده برای صنایع بزرگ نیز خواهد شد.

همچنین توافقی میان وزارت نیرو با شهرک‌های صنعتی صورت گرفته است که به‌موجب آن قرار است شهرک‌های تخصصی خورشیدی ساخته شود که موافقت‌های اولیه این طرح نیز انجام شده و توافقنامه‌های آن امضا شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده تاکنون ۱۹ شهرک تخصصی خورشیدی در این قالب در سفرهای استانی رئیس‌جمهور به تصویب رسیده است و فرایند عملیاتی کردن آن نیز در حال انجام است، اقدام جدید و متفاوتی که در قالب آن نیز امکان ایجاد نیروگاه‌های تا ۳ مگاواتی فراهم می‌شود.

## محورهای شاخص انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۴ و استارت‌آپ‌های نوآور

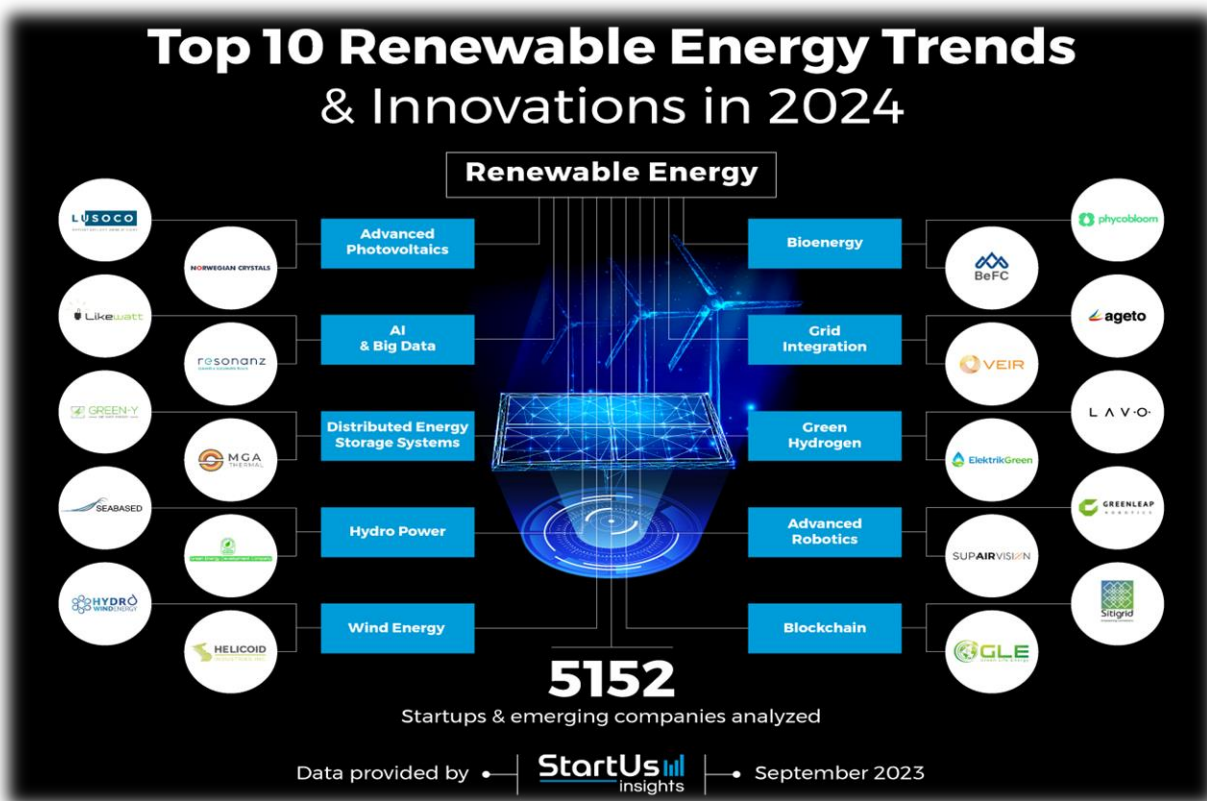


کشف قدرت دگرگون‌کننده انرژی‌های تجدیدپذیر، سنگ بنای یک آینده پایدار است. کسب و کارها در سطح جهان در حال تغییر استراتژیک به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر هستند، حرکتی که نه تنها توسط نگرانی‌های زیست‌محیطی بلکه به دلیل مزایای اقتصادی که ارائه می‌دهند، تشویق می‌شود. آینده انرژی سبز با گرایش‌های کلیدی مانند دیجیتال‌سازی، که انجام هرگونه عملیات را تسهیل می‌کند و ادغام‌های کارآمد انرژی، برای رسیدگی به چالش‌های دسترسی به برق تجدیدپذیر، تقویت می‌شود. درحالی‌که انرژی خورشیدی، بادی و برق‌آبی همچنان پیشتاز بخش تجدیدپذیرها هستند، عرصه‌های نوظهور مانند هیدروژن سبز پیشرفت‌های قابل‌توجهی خواهند داشت. علاوه بر این، اشکال انرژی مانند جریان جزر و مد، موج و اقیانوس، راه‌های جدیدی را در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر باز می‌کنند و نویدبخش راه‌حل‌های انرژی سبز بی‌سابقه برای فردا هستند.

### ❖ ۱۰ فناوری نوآوری انرژی سبز در سال ۲۰۲۴

- فتولتائیک پیشرفته
- هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ
- سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی
- برق‌آبی
- انرژی باد
- انرژی زیستی
- یکپارچه‌سازی شبکه
- هیدروژن سبز
- رباتیک پیشرفته
- بلاک چین

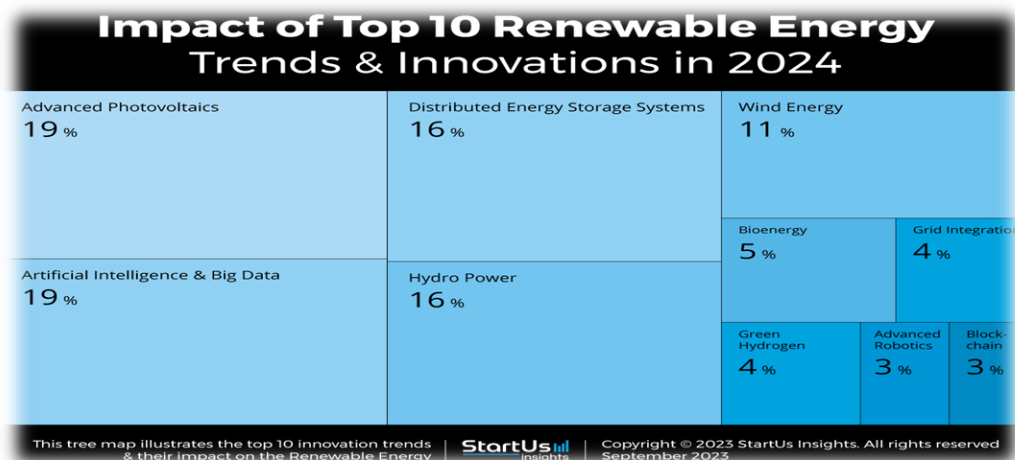
در نقشه نوآوری انرژی‌های تجدیدپذیر در زیر، یک نمای کلی از روندهای نوآوری و استارت‌آپ‌های مرتبط با هدف بهبود تصمیم‌گیری‌های استراتژیک، قابل مشاهده است.



نقشه نوآوری ۱۰ روند برتر انرژی‌های تجدیدپذیر و ۲۰ استارت‌آپ تأثیرگذار

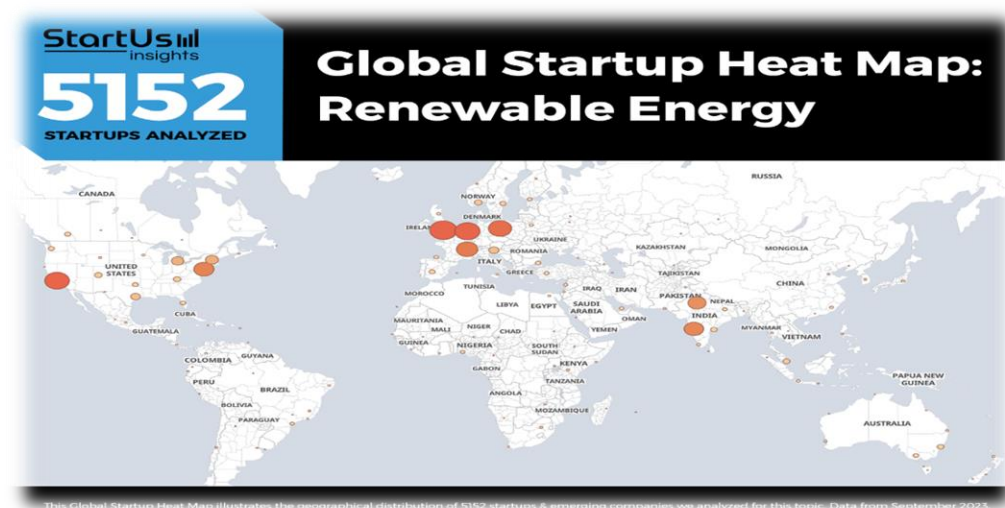
در ادامه نقشه درختی ۱۰ روند برتر انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهد که شرکت‌ها را در سال ۲۰۲۴ تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی انرژی‌های تجدیدپذیر را با هدف توسعه تحت تأثیر مثبت قرار می‌دهند و برنامه‌هایی مانند تعمیر و نگهداری، پیش‌بینی و مدیریت هوشمند را تسهیل می‌کنند. درعین حال، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی توزیع‌شده انعطاف‌پذیری و پایداری را به سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر می‌افزایند.

فن‌آوری‌های یکپارچه‌سازی شبکه تلفات انتقال را کاهش می‌دهد و شبکه را به‌طور مؤثر پایدار می‌کند. این فناوری‌ها استفاده از منابع خارج از شبکه مانند سوخت‌های زیستی، بادی و انرژی آبی را، حتی زمانی که دور از مراکز تقاضا قرار دارند، بهینه‌سازی می‌کند. علاوه بر این، هیدروژن سبز نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کند، انرژی را از انرژی‌های تجدیدپذیر ذخیره می‌کند و هم‌چنین به تولید الکتریسیته کمک می‌کند. در همین حال، انرژی زیستی به دلیل ماهیت غیرمتمرکز آن، جایگاه خود را به‌عنوان یک انتخاب مطلوب حفظ می‌کند.



نقشه درختی ۱۰ فناوری برتر انرژی‌های تجدیدپذیر

نقشه حرارتی<sup>۱</sup> استارت‌آپ‌ها، توزیع جهانی ۵۱۵۲ استارت‌آپ نمونه که برای این تحقیق تحلیل شده‌اند، نشان می‌دهد. مطابق این نقشه، اروپای غربی مهد اکثر این شرکت‌ها است و البته شاهد افزایش فعالیت در ایالات متحده و هند نیز هستیم.



نقشه حرارتی توزیع ۵۱۵۲ استارت‌آپ تجدیدپذیر در جهان

در ادامه ۲۰ مورد از این ۵۱۵۲ استارت‌آپ امیدوارکننده و همچنین راه‌حلی که توسعه می‌دهند، تشریح می‌گردد. این ۲۰ استارت‌آپ بر اساس معیارهایی مانند سال تأسیس، مکان، بودجه جذب‌شده و موارد دیگر انتخاب شدند.

<sup>1</sup> Heat Map

## ۱. فتوولتائیک پیشرفته<sup>۲</sup>

شرکت‌های خورشیدی در حال ادغام سیستم‌های فتوولتائیک با محیط اطراف آنها هستند و درعین حال نیاز به استفاده از زمین را به حداقل می‌رسانند. در نتیجه، فتوولتائیک یکپارچه<sup>۳</sup>، فتوولتائیک شناور<sup>۴</sup> و فتوولتائیک کشاورزی<sup>۵</sup> تغییرات منطقی در این فناوری هستند. علاوه بر این، استارت‌آپ‌ها در حال توسعه سلول‌های لایه‌نازک هستند تا پنل‌های خورشیدی را انعطاف‌پذیر، مقرون‌به‌صرفه، سبک‌وزن و سازگار با محیط‌زیست سازند. برای بهبود عملکرد فتوولتائیک، شرکت‌های نوظهور در حال ابداع فناوری‌هایی برای متمرکز کردن انرژی خورشیدی با استفاده از آینه‌ها و عدسی‌ها هستند. نوآوری در مواد فتوولتائیک، مانند استفاده از پروسکایت، تبدیل انرژی را چندین برابر افزایش می‌دهد. این نوآوری‌ها بیشتر با طرح‌های فتوولتائیک همراه هستند که حداکثر کارایی و بهره‌وری بالا را ممکن می‌سازند. استراتژی جدید در این حوزه بر پایداری از طریق بازیافت، حداقل استفاده از منابع و استفاده از مواد جایگزین متمرکز است.

### • لوسوکو<sup>۶</sup> متمرکز کننده‌های خورشیدی فلورسنت<sup>۷</sup> را ارائه می‌دهد.

استارت آپ هلندی لوسوکو یک فناوری متمرکز کننده خورشیدی را توسعه می‌دهد. این دستگاه از مواد با ضریب شکست بالا مانند شیشه‌ها و پلیمرها به همراه جوهر فلورسنت برای متمرکز کردن نور به لبه‌هایی که سلول‌های خورشیدی لایه‌نازک در آن قرار دارند استفاده می‌کند. علاوه بر این، پوشش فلورسنت نیز در طول شب نور ساطع می‌کند و علائم خودپایدار<sup>۸</sup> را ممکن می‌سازد. این راهکار با حفظ زیبایی‌شناسی، انرژی را جمع‌آوری می‌کند. از این رو شیشه‌های نورانی برای استفاده در خودروها، تابلوها و طراحی داخلی مناسب هستند.

### • نروژین کریستالز<sup>۹</sup> شمش‌های سیلیکونی تک کریستالی کم‌کربن<sup>۱۰</sup> تولید می‌کند.

نروژین کریستالز یک استارت آپ نروژی است که شمش‌های سیلیکونی تک کریستالی کم‌کربن را برای دستگاه‌های فتوولتائیک با کارایی بالا تولید می‌کند. برای تولید این شمش‌ها، سیلیکون با خلوص بالا را با استفاده از تکنیک چوکراسکی<sup>۱۱</sup> ذوب می‌کند. همچنین شمش‌های دوپ شده با گالیوم<sup>۱۲</sup> تولید می‌کند که طول عمر سلول‌های خورشیدی را افزایش می‌دهد

<sup>2</sup> Advanced Photovoltaics

<sup>3</sup> Integrated PV

<sup>4</sup> Floatovoltaics

<sup>5</sup> Agrivoltaics

<sup>6</sup> Lusoco

<sup>7</sup> Luminescent

<sup>8</sup> Self-Sustainable

<sup>9</sup> Norwegian Crystals

<sup>10</sup> Low-Carbon Monocrystalline Silicon Ingots

<sup>11</sup> Czochralski technique

<sup>12</sup> Gallium-doped

و تعداد مراحل تثبیت را در مقایسه با سیلیکون تک کریستالی کاهش می‌دهد. از این طریق، کریستال‌های نروژی ردپای کربن اجزای پانل‌های خورشیدی را در سطوح بسیار پایین کنترل می‌کنند و به مصرف‌کنندگان و کسب‌وکارهایی که پایداری کلی تولید انرژی خورشیدی را در نظر دارند، کمک مهمی می‌کند.

## ۲. هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ<sup>۱۳</sup>

شبکه انرژی یکی از پیچیده‌ترین زیرساخت‌ها است و نیاز به تصمیم‌گیری سریع به‌صورت آنی دارد، که داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های هوش مصنوعی این امکان را برای شرکت‌ها فراهم می‌کنند. فراتر از تجزیه و تحلیل و مدیریت شبکه، کاربردهای هوش مصنوعی در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر شامل پیش‌بینی مصرف انرژی و نگهداری پیش‌بینی‌کننده منابع انرژی تجدیدپذیر است. همچنین برنامه‌های اینترنت اشیا<sup>۱۴</sup> قادر می‌سازند که سطوح ظرفیت شبکه را پیش‌بینی کنند و معاملات و قیمت‌گذاری مستقل مبتنی بر زمان را انجام دهند. با نوآوری‌ها در محاسبات ابری، نیروگاه‌های مجازی<sup>۱۵</sup> تولید برق از خدمات شهری را قابل بررسی می‌کنند. علاوه بر این، استارت‌آپ‌ها از تجزیه و تحلیل داده‌ها و یادگیری ماشین برای طراحی مدل انرژی‌های تجدیدپذیر و تجزیه و تحلیل عملکرد آن‌ها استفاده می‌کنند.

### • لایکوات<sup>۱۶</sup> تجزیه و تحلیل پارامتر انرژی را توسعه می‌دهد.

استارت آپ آلمانی لایکوات، اوپتیوایز<sup>۱۷</sup> را توسعه می‌دهد، یک راهکار نرم‌افزاری ثبت شده که تجزیه و تحلیل پارامترهای انرژی را با استفاده از یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. اوپتیوایز همچنین میزان مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن را محاسبه می‌کند و همچنین دارای ممیزی انرژی‌های تجدیدپذیر و پیش‌بینی آب‌وهوا است. این نرم‌افزار به مصرف‌کنندگان فردی و جمعی اجازه می‌دهد تا الگوهای مصرف آنی را مشاهده کنند. علاوه بر این، تولیدکنندگان برق را قادر می‌سازد تا فناوری‌های مختلف را هیبریدی نموده و اندازه بار را بهینه سازند.

### • رزونانس<sup>۱۸</sup> تجارت هوشمند انرژی را تسهیل می‌کند.

رزونانس یک استارت آپ آلمانی است که تجارت هوشمند انرژی خودکار را امکان‌پذیر می‌کند. ابزارهای نرم‌افزاری استارت‌آپ، آرفلو<sup>۱۹</sup> و آرمایند<sup>۲۰</sup>، داده‌ها را در به‌طور آنی یکپارچه و مدیریت می‌کنند تا تصمیمات الگوریتمی مستقلی ایجاد

<sup>13</sup> AI and Big Data

<sup>14</sup> Internet of Things(Iot)

<sup>15</sup> Virtual Power Plants (VPP)

<sup>16</sup> Likewatt

<sup>17</sup> Optiwise

<sup>18</sup> Resonanz

<sup>19</sup> rFlow

<sup>20</sup> rMind

کنند. علاوه بر این، رابط آردش<sup>۲۱</sup> پیش‌بینی‌های تولید، شاخص‌های قیمت بازار و داده‌های حسابداری را به تصویر می‌کشد که در تصمیم‌گیری حائز اهمیت است. از طریق این محصولات، این استارت‌آپ به فعالان بازار این امکان را می‌دهد که هم‌زمان سهم خود را از انرژی پایدار و بازده افزایش دهند.

### ۳. سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده<sup>۲۲</sup>

سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده، تولید و ذخیره انرژی تجدیدپذیر را محلی می‌سازد و بر بی‌نظمی در تولید غلبه می‌کند. بر اساس نیازهای اقتصادی و سایر الزامات، استارت‌آپ‌ها طیف وسیعی از راه‌حل‌های باتری و بدون باتری را ارائه می‌دهند. به‌عنوان مثال، باتری‌های جریان<sup>۲۳</sup> از انرژی کم و ثابت استفاده می‌کنند، درحالی‌که باتری‌های حالت جامد<sup>۲۴</sup> سبک‌وزن هستند و چگالی انرژی بالایی ارائه می‌دهند. برای کاربردهایی که نیاز به انرژی زیاد دارند، در مدت زمان کوتاهی از خازن‌ها و ابرخازن‌ها نیز استفاده می‌شود. با توجه به نگرانی‌های مربوط به تخلیه، ایمنی و آلودگی محیط‌زیست، استارت‌آپ‌ها در حال ابداع جایگزین‌های ذخیره‌سازی بدون باتری مانند فن‌آوری‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای<sup>۲۵</sup> و هوای فشرده<sup>۲۶</sup> هستند. از سوی دیگر، انرژی مزاد از طریق فناوری Power-to-X (P2X) به اشکال دیگر انرژی مانند گرما یا متان برای ذخیره‌سازی و تبدیل مجدد تبدیل می‌شود.

#### • گرین‌وای انرژی<sup>۲۷</sup> ذخیره‌سازی مکانیکی انرژی را ارائه می‌دهد.

استارت‌آپ سوئسی گرین‌وای انرژی فناوری ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را توسعه می‌دهد. این استارت‌آپ، با افزایش چگالی انرژی درحالی‌که استخراج گرما و سرما را دو برابر می‌کند، حجم ذخیره‌سازی موردنیاز را کاهش می‌دهد و همچنین انرژی گرمایی و سرمایش را برای مصارف خانگی فراهم می‌آورد. این فرآیند همچنین پایدار است؛ زیرا آب‌وهوا تنها سیالات فعال هستند. علاوه بر این، هوای فشرده در مخازن فشار تجاری بادوام و ارزان ذخیره می‌شود و به مدیران ساختمان و صاحبان خانه اجازه می‌دهد تا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را یکپارچه کنند.

<sup>21</sup> rDash

<sup>22</sup> Distributed Energy Storage Systems (DESS)

<sup>23</sup> Flow Batteries

<sup>24</sup> Solid-State Batteries

<sup>25</sup> Pumped Hydro Technologies

<sup>26</sup> Compressed Air Technologies

<sup>27</sup> Green-Y Energy

• **مگاترمال<sup>۲۸</sup> مواد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را تولید می‌کند.**

مگاترمال یک استارت آپ استرالیایی است که ذخیره انرژی حرارتی را امکان‌پذیر می‌کند. محصول این استارت آپ، آلیاژهای شکاف امتزاج‌پذیری<sup>۲۹</sup>، دارای فاز ذوب و فاز جامد است. در کاربرد گرما، جزء فاز ذوب انرژی را ذخیره می‌کند درحالی‌که جزء فاز جامد به‌سرعت گرما را توزیع می‌کند. ساختار بلوک مدولار حاصل، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی بالایی را در دمای ثابت نشان می‌دهد. علاوه بر این، مواد و واحدهای نگهدارنده مورد استفاده قابل بازیافت، ایمن، مقرون‌به‌صرفه و آسان برای استفاده هستند. پتانسیل ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ، شرکت‌های انرژی تجدیدپذیر را قادر می‌سازد تا برق مستمر را حتی در ساعات اوج مصرف تأمین نمایند.

**۴. برق آبی<sup>۳۰</sup>**

انرژی آبی انرژی حاصل از حرکت آب است. برخلاف خورشید و باد، انرژی آبی قابل پیش‌بینی و در نتیجه قابل اعتمادتر است. علاوه بر این، سدهای برق‌آبی، و همچنین انرژی مبتنی بر اقیانوس که از جزر و مد، جریان‌ها و امواج به کار گرفته می‌شود، چگالی انرژی بالایی را ارائه می‌دهد. نوآوری‌ها در این منابع تجدیدپذیر بر مبدل‌های انرژی و بهبود اجزای سازنده برای برداشت بیشتر انرژی متمرکز است. در داخل نیروگاه‌های آبی، سدهای برق‌آبی در مقیاس کوچک و رگبارهای جزر و مدی<sup>۳۱</sup>، تولید انرژی غیرمتمرکز را امکان‌پذیر می‌سازند. تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس<sup>۳۲</sup> انرژی را از طریق گرادیان حرارتی<sup>۳۳</sup> ایجادشده بین سطح و عمق آب مهار می‌کند. برخی استارت‌آپ‌ها نیز شیب شوری<sup>۳۴</sup> ایجادشده به دلیل اختلاف فشار اسمزی بین آب دریا و رودخانه را به انرژی قابل استفاده تبدیل می‌کنند.

• **سی‌بیسد<sup>۳۵</sup> مبدل انرژی موج<sup>۳۶</sup> مدولار ارائه می‌دهد.**

سی‌بیسد یک استارت آپ ایرلندی است که مبدل‌های انرژی امواج مدولار را توسعه می‌دهد. این مبدل‌ها شناورهایی روی سطح هستند که با ژنراتورهای خطی که در بستر دریا قرار دارند، متصل می‌شوند. امواج متحرک، انرژی را برای شناورها فراهم می‌کند و در نتیجه نیروی الکتریکی تولید می‌کند. تابلو برق ثبت اختراع این استارت‌آپ، برق را برای استفاده در شبکه به برق تبدیل می‌کند. علاوه بر این، مبدل انرژی موج مدولار می‌تواند در برابر دریاها بسیار موج مقاومت کند و امکان گسترش

<sup>28</sup> MGA Thermal

<sup>29</sup> Miscibility Gap Alloys

<sup>30</sup> Hydropower

<sup>31</sup> Tidal Barrages

<sup>32</sup> Ocean Thermal Energy Conversion (OETC)

<sup>33</sup> Thermal Gradient

<sup>34</sup> Salinity Gradient

<sup>35</sup> Seabased

<sup>36</sup> Wave Energy Converter (WECs)

موج انعطاف‌پذیر با راندمان بالا را فراهم آورد. بنابراین، راه‌حل‌های سی‌بیسد به شرکت‌های فراساحلی انرژی و جوامع محلی ساحلی اجازه می‌دهد تا انرژی موجی را به‌عنوان جایگزین یا ترکیبی برای باد تولید کنند.

- **شرکت توسعه انرژی سبز<sup>۳۷</sup> میکروتوربین‌ها را طراحی می‌کند.**

شرکت نوپا ایرانی توسعه انرژی سبز میکروتوربین‌هایی را برای تولید پراکنده برق‌آبی از جریان‌های آبی مانند کانال‌ها و رودخانه‌ها ارائه می‌دهد. توربین درام شناور<sup>۳۸</sup> استارت‌آپ از یک چرخ آب زیرشاخ<sup>۳۹</sup> تشکیل شده است که با استفاده از یک لغزش شناور روی جریان آب شناور می‌شود و با کابل‌ها یا بازوهای لولایی لنگر می‌اندازد. چرخش توربین، جریان برق تولید می‌کند. این راه‌حل کم‌هزینه و کارآمد است و تولید پراکنده قابل‌اعتماد را برای برقی‌سازی در مکان‌های دورافتاده و توسعه‌نیافته تضمین می‌کند.

## ۵. انرژی باد<sup>۴۰</sup>

علیرغم اینکه باد یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی است، بخش انرژی بادی به‌سرعت در حال تحول است. استارت‌آپ‌ها در حال ابداع توربین‌های بادی دریایی و هوایی<sup>۴۱</sup> هستند تا تقاضا برای انرژی بادی زمینی را کاهش دهند. نوآوری‌ها در این زمینه اغلب با سایر منابع انرژی مانند توربین‌های بادی شناور<sup>۴۲</sup>، انرژی خورشیدی یا جزر و مد ادغام می‌شوند. برای بهبود بیشتر کارایی، پیشرفت‌های مداومی در طراحی‌های آیرودینامیکی پرها وجود دارد. استارت‌آپ‌ها همچنین ژنراتورها و توربین‌های کارآمدی را برای تبدیل انرژی بالا تولید می‌کنند. پایداری مواد پره یکی از چالش‌هایی است که امروزه صنعت با آن مواجه است. برای مقابله با این موضوع، استارت‌آپ‌ها در حال ایجاد فناوری‌های بدون پره و مواد ترموپلاستیک قابل بازیافت برای تولید پرها هستند.

- **هیدروویند انرژی<sup>۴۳</sup> سیستم هیبریدی هیدرو-بادی<sup>۴۴</sup> را ارائه می‌دهد.**

هیدروویند انرژی مستقر در امارات متحده عربی، انگلستان و ایالات متحده، یک سیستم انرژی هیبریدی ارائه می‌دهد. محصول این استارت‌آپ، اوشن‌هیدرو<sup>۴۵</sup>، با استفاده از کایت‌ها یا روتورهای بادی محور عمودی، بادهای ارتفاعی را مهار می‌کند. سپس برق تولیدی انرژی باد از فشار اقیانوس زیر دریا را برای به دست آوردن انرژی الکتریکی کم‌هزینه و ذخیره‌سازی در

<sup>37</sup> Green Energy Development (GED)

<sup>38</sup> Floating Drum Turbine (FDT)

<sup>39</sup> Undershot Waterwheel

<sup>40</sup> Wind Energy

<sup>41</sup> Airborne Wind Turbines

<sup>42</sup> Floating Wind Turbines

<sup>43</sup> Hydro Wind Energy

<sup>44</sup> Hybrid Hydro-Wind System

<sup>45</sup> OceanHydro

مقیاس شبکه ترکیب می‌کند. از آنجایی که انرژی از زیر دریا در صورت تقاضا در دسترس است، چنین راه‌حل هیبریدی قابل‌اعتمادتر از سیستم‌های انرژی بادی دریایی است. این امر به شرکت‌های انرژی اجازه می‌دهد تا بار پایه مداوم و بالاتری را برای شبکه حفظ کنند.

#### • هلیکونید<sup>۴۶</sup> کیفیت پره‌های بادی را افزایش می‌دهد.

هلیکونید یک استارت آپ مستقر در ایالات متحده است که کیفیت پره را در طول تولید افزایش می‌دهد. پره تقویت‌شده در نتیجه تغییرات در انباشته شدن و چرخش ورق‌های الیاف موازی برای تشکیل ساختار هلیکونیدی تولید می‌شود. این پره‌ها مقاومت بالاتری در برابر ضربه، فرسایش<sup>۴۷</sup> و خستگی<sup>۴۸</sup> دارند و درعین حال استحکام بالاتری نیز دارند. این امر هزینه‌های تعمیر و نگهداری و خرابی را کاهش داده و پره‌های پایدار و کم‌مصرف را برای توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد.

### ۶. انرژی زیستی<sup>۴۹</sup>

انرژی زیستی نوعی انرژی تجدیدپذیر است که از منابع زیست‌توده به دست می‌آید. سوخت‌های زیستی مایع باکیفیت قابل‌مقایسه با بنزین مستقیماً برای استفاده در وسایل نقلیه تهیه می‌شوند. برای دستیابی به این کیفیت، شرکت‌ها فرآیندهای سوخت زیستی را بهبود می‌بخشند و تکنیک‌ها را ارتقا می‌دهند. اکثر فرآیندهای تبدیل سوخت زیستی مانند مایع سازی هیدروترمال<sup>۵۰</sup>، تجزیه در اثر حرارت<sup>۵۱</sup>، فناوری پلاسما<sup>۵۲</sup>، پودرسازی<sup>۵۳</sup> و گازی‌سازی<sup>۵۴</sup> از تبدیل حرارتی برای به دست آوردن سوخت‌های زیستی استفاده می‌کنند. تکنیک‌های ارتقاء مانند جداسازی برودتی<sup>۵۵</sup>، هیدرات<sup>۵۶</sup>، درجا<sup>۵۷</sup> و جداسازی غشایی<sup>۵۸</sup> برای حذف محتوای گوگرد و نیتروژن استفاده می‌شود. فرآیند تخمیر، بیواتانول تولید می‌کند که به راحتی می‌تواند با بنزین مخلوط شود. تخمیر همچنین توانایی تبدیل ضایعات، غلات غذایی و گیاهان را به اتانول زیستی دارد و در نتیجه تنوع مواد اولیه را فراهم می‌سازد. مواد اولیه با انرژی متراکم منجر به کیفیت سوخت بهینه می‌شود. به همین دلیل، استارت آپ‌ها و شرکت‌های بزرگ، مواد اولیه جلبکی و میکروجلبکی را برای استفاده در فرآیندهای تبدیل فوق در نظر می‌گیرند.

<sup>46</sup> Helicoid

<sup>47</sup> Erosion

<sup>48</sup> Fatigue

<sup>49</sup> Bioenergy

<sup>50</sup> Hydrothermal Liquefaction (HTL)

<sup>51</sup> Pyrolysis

<sup>52</sup> Plasma Technology

<sup>53</sup> Pulverization

<sup>54</sup> Gasification

<sup>55</sup> Cryogenic

<sup>56</sup> Hydrate

<sup>57</sup> In-Situ

<sup>58</sup> Membrane Separation

- فیکوبلوم<sup>۵۹</sup> تولیدکننده روغن زیستی جلبکی<sup>۶۰</sup> است.

فیکوبلوم یک استارت آپ بریتانیایی است که از زیست‌شناسی مصنوعی برای تولید روغن زیستی از جلبک‌ها استفاده می‌کند. جلبک‌های دستکاری شده ژنتیکی این استارت‌آپ، این روغن را در محیط اطراف آزاد می‌کنند. از آنجایی که از همان دسته جلبک‌ها مجدداً استفاده می‌شود، این فرآیند سریع و ارزان می‌شود. با توجه به اینکه جلبک‌ها برای رشد فقط به هوا، آب و نور خورشید نیاز دارند، این فناوری همچنین حلقه بین انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید سوخت را تکمیل می‌کند. بنابراین راه‌حل این استارت‌آپ وابستگی بخش حمل‌ونقل به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد.

- پیل‌های سوختی بیوانزوماتیک<sup>۶۱</sup> سلول‌های سوخت زیستی مبتنی بر کاغذ را ارائه می‌دهند.

استارت‌آپ فرانسوی بیوانزوماتیک با استفاده از سیستم پیل سوخت زیستی مبتنی بر کاغذ، برق تولید می‌کند. این سیستم الکترودهای کربن، آنزیم‌ها و میکروسیال‌ها<sup>۶۲</sup> را ترکیب می‌کند. آنزیم‌ها با استفاده از یک ماده کاغذی مینیاتوری<sup>۶۳</sup>، گلوکز و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. این فناوری برای کاربردهای کم‌مصرف مانند جمع‌آوری و انتقال داده‌های حسگر مناسب است. علاوه بر این، فقدان پلاستیک و فلز آن را به شکلی پایدار و غیر سمی از وسایل ذخیره انرژی تبدیل می‌کند.

## ۷. یکپارچه‌سازی شبکه<sup>۶۴</sup>

فن‌آوری‌های یکپارچه‌سازی شبکه در درجه اول شامل انتقال، توزیع و تثبیت انرژی‌های تجدیدپذیر است. افزایش مقیاس تولید انرژی تجدیدپذیر متغیر اغلب از مراکز تقاضا دور است که منجر به تلفات انتقال و توزیع می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، فناوری‌های الکترونیکی شبکه‌ای مانند نیمه‌رساناهای نیتريد گالیوم<sup>۶۵</sup> و کاربید سیلیکون<sup>۶۶</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. چالش فرکانس و نوسانات ولتاژ به دلیل تولید انرژی تجدیدپذیر متغیر از طریق راه‌حل‌های مبتنی بر میکروکنترلر حل می‌شود. با وجود این فناوری‌ها، تثبیت شبکه به دلیل مصرف متناوب انرژی یک چالش بزرگ است. فناوری وسیله نقلیه به شبکه<sup>۶۷</sup> به تثبیت شبکه در ساعات اوج مصرف کمک می‌کند در حالی که راه‌حل‌های شبکه به خودرو<sup>۶۸</sup> از وسیله نقلیه به‌عنوان یک واحد ذخیره‌سازی استفاده می‌کنند. در نتیجه هم در صنعت انرژی و هم در صنعت حمل‌ونقل تأثیرگذار هستند.

<sup>59</sup> Phycobloom

<sup>60</sup> Algal Bio-Oil

<sup>61</sup> Bioenzematic Fuel Cells (BeFC)

<sup>62</sup> Microfluidics

<sup>63</sup> Miniature Paper

<sup>64</sup> Grid Integration

<sup>65</sup> Gallium Nitride (GaN)

<sup>66</sup> Silicon Carbide (SiC)

<sup>67</sup> Vehicle-to-Grid (V2G)

<sup>68</sup> Grid-to-Vehicle (G2V)

• آجتوانرژی<sup>۶۹</sup> کنترل‌کننده‌های ریزشبکه را طراحی می‌کند.

آجتوانرژی یک استارت آپ مستقر در ایالات‌متحده است که کنترل‌کننده‌های ریزشبکه<sup>۷۰</sup> را برای هماهنگی تمام عناصر ریزشبکه تولید می‌کند. کنترل‌کننده ریزشبکه این استارت‌آپ، آرک<sup>۷۱</sup>، به‌عنوان هسته ریزشبکه عمل می‌کند و اجزای مختلف تجدیدپذیر، از جمله اینورترهای انرژی، ژنراتورها، کنتورهای برق و بارهای قابل ریزش<sup>۷۲</sup> را با هم ترکیب می‌کند. آرک در یک محفظه بادوام برای مقاومت در برابر آب‌وهوا و دمای شدید قرار گرفته است. علاوه بر این، امکان نظارت و کنترل آنی ریزشبکه را فراهم می‌کند.

• ویر<sup>۷۳</sup> ابررساناهای با دمای بالا<sup>۷۴</sup> را توسعه می‌دهد.

استارت‌آپ ویر مستقر در ایالات‌متحده ابررساناهایی با دمای بالا ارائه می‌دهد. کابل ابررسانای با دمای بالای این استارت‌آپ تا ده برابر جریان سیم معمولی کار می‌کند و درعین حال ابررسانایی را حفظ می‌کند. برای حفظ این ابررسانا در دمای عملیاتی، ویر از خنک‌کننده برودتی تبخیری<sup>۷۵</sup> استفاده می‌کند که بیست برابر کارآمدتر از خنک‌کننده فرعی مکانیکی<sup>۷۶</sup> است. این امر تولید و انتقال انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ را ممکن می‌سازد.

## ۸. هیدروژن سبز<sup>۷۷</sup>

گاز هیدروژن دارای بالاترین چگالی انرژی در بین تمام سوخت‌ها است و انتشار گازهای گلخانه‌ای آن تقریباً صفر است. با این حال، بیشتر هیدروژن از منابع تجدید ناپذیر به شکل هیدروژن خاکستری و قهوه‌ای به دست می‌آید. در دهه گذشته، تحولات در انرژی‌های تجدیدپذیر و پیل‌های سوختی، تغییر را به سمت هیدروژن سبز سوق داده است. البته این فناوری مشکلات راندمان تبدیل انرژی پایین پیل‌های سوختی و چالش‌های حمل‌ونقل نیز به همراه دارد. به این دلایل، پیشرفت‌های هیدروژن سبز بر بهبود ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و توزیع هیدروژن تمرکز دارد.

<sup>69</sup> Ageto Energy

<sup>70</sup> Microgrid controllers

<sup>71</sup> ARC

<sup>72</sup> Sheddable Loads

<sup>73</sup> Veir

<sup>74</sup> High-Temperature Superconductors (HTS)

<sup>75</sup> Evaporative Cryogenic Cooling

<sup>76</sup> Mechanical Subcooling

<sup>77</sup> Green Hydrogen

- لاوو<sup>۷۸</sup> هیبرید هیدروژن سبز-لیتیوم را ارائه می‌دهد.

استارت آپ استرالیایی لاوو پیل‌های سوختی هیدروژنی سبز را تولید می‌کند که از انرژی خورشیدی و آب برای تولید برق استفاده می‌کنند. راه‌حل ثبت اختراع این استارت آپ، سیستم باتری هیدروژن لاوو<sup>۷۹</sup>، دارای یک مخزن ذخیره‌سازی هیدرید فلزی است که هیدروژن را ذخیره می‌کند. همچنین دارای یک باتری لیتیوم یونی برای زمان پاسخگویی سریع است و در نتیجه یک راهکار هیبریدی است. سیستم باتری بادوام است و در محدوده دمایی وسیع کار می‌کند. در نتیجه، از قطع برق در شرایط آب و هوایی شدید جلوگیری می‌کند و همچنین به کسب‌وکارها و جوامع این امکان را می‌دهد که به‌طور مداوم انرژی را برای روزها ذخیره کنند.

- الکترونیک گرین<sup>۸۰</sup> وسایل نقلیه پیل سوختی مبتنی بر هیدروژن سبز<sup>۸۱</sup> را فعال می‌کند

الکترونیک گرین یک استارت آپ مستقر در ایالات متحده است که از هیدروژن سبز برای شارژ خودروهای سلول سوختی استفاده می‌کند. ایستگاه سوخت‌گیری خانگی این استارت آپ، شارژ وسایل نقلیه پیل سوختی را با افزودن یک پرکننده سوخت به مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن سبز امکان‌پذیر می‌کند. این فناوری تبدیل برق، ذخیره انرژی، نرم‌افزار مدیریت پیش‌بینی، نظارت و سوخت‌گیری را در یک سیستم ساده یکپارچه می‌کند. راهکار الکترونیک گرین همچنین از محله‌های هوشمند برای به حداکثر رساندن مزایای مشترک از طریق انرژی توزیع‌شده پشتیبانی می‌کند.

## ۹. رباتیک پیشرفته<sup>۸۲</sup>

کارایی تولید و فرآیند یک مانع بزرگ در بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر است. رباتیک دقت و استفاده بهینه از منابع را برای غلبه بر این چالش امکان‌پذیر می‌کند. به‌عنوان مثال، پانل‌های خورشیدی خودکار برای به حداکثر رساندن تبدیل انرژی جهت‌گیری می‌کنند. اتوماسیون تجهیزات همچنین فرآیندهای تعمیر و نگهداری را تسریع می‌کند و درعین حال نیاز به نیروی انسانی را کاهش می‌دهد. استفاده از پهپادهای مبتنی بر تصویربرداری اولتراسونیک آرایه فازی برای تشخیص سریع آسیب‌های داخلی یا خارجی در توربین‌های بادی بزرگ است. پهپادها همچنین امکان ایجاد دوقلوهای دیجیتال و نقشه‌های سه‌بعدی را با استفاده از داده‌های مختلف فراهم می‌کنند.

<sup>78</sup> Lavo

<sup>79</sup> Lavo Hydrogen Battery System

<sup>80</sup> ElektrikGreen

<sup>81</sup> Green Hydrogen-based Fuel Cell Vehicles (FCVs)

<sup>82</sup> Advanced Robotics

• **گرین لپ رباتیکز<sup>۸۳</sup> ربات‌های پاک‌کننده پنل خورشیدی را طراحی می‌کند.**

استارت‌آپ هندی گرین لپ رباتیکز یک ربات تمیزکننده مستقل برای پانل‌های خورشیدی توسعه می‌دهد. ربات این استارت‌آپ، از پارچه میکروفیبر بسیار نرم برای از بین بردن گردوغبار و زباله‌ها استفاده می‌کند و امکان تمیز کردن بدون آب را فراهم می‌کند. همچنین از انحرافات در میان پانل‌های خورشیدی عبور می‌کند که منجر به بهبود محدوده تمیز کردن می‌شود. گرین لپ رباتیکز نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ را قادر می‌سازد تا کار فشرده خود را به‌طور خودکار انجام دهند درحالی‌که قادر به کنترل و نظارت از راه دور هستند.

• **سوپرایرویزن<sup>۸۴</sup> تشخیص پره مبتنی بر Drone را ارائه می‌دهد.**

سوپرایرویزن یک استارت‌آپ فرانسوی است که تشخیص دیجیتالی پره باد را ارائه می‌دهد. ابزارهای نرم‌افزاری این استارت‌آپ، شرلوک<sup>۸۵</sup> و ولتا<sup>۸۶</sup>، به ترتیب از هوش مصنوعی برای تشخیص عیوب پرها و تشخیص مسیرهای ردوبرق پرها استفاده می‌کنند. ابزار نرم‌افزاری دیگر، کلاریتی<sup>۸۷</sup>، عیوب ساختاری داخل پره را تشخیص می‌دهد. این ابزارها، امکان عیب‌یابی دقیق را فراهم می‌آورند و در نتیجه زمان خرابی توربین بادی را کاهش می‌دهند. این فناوری با ارائه راه‌حل‌های مدیریتی مقیاس‌پذیر با حداقل نیاز کارکنان به مزارع توربین‌های بادی در مقیاس کاربردی کمک می‌کند.

## ۱۰. بلاک چین<sup>۸۸</sup>

استارت‌آپ‌های انرژی از فناوری بلاک چین برای پیشبرد تراکنش‌های قابل‌اعتماد در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال، قراردادهای هوشمند<sup>۸۹</sup>، تجارت برق هم‌تا به هم‌تا<sup>۹۰</sup> را برای انتقال انرژی به کار می‌گیرند. شبکه‌ها در برابر تهدیدات سایبری آسیب‌پذیر هستند و بلاک چین برای رمزگذاری داده‌های مرتبط با عملیات شبکه و نظارت استفاده می‌شود. بلاک چین از طریق رمزگذاری داده‌ها، تراکنش‌های دیجیتال را تسهیل می‌کند. ارائه‌دهندگان انرژی‌های تجدیدپذیر نیز از بلاک چین برای ردیابی زنجیره نگهداری مواد شبکه استفاده می‌کنند. علاوه بر این، به تنظیم‌کنندگان اجازه می‌دهد تا به‌راحتی به داده‌ها برای انطباق با مقررات دسترسی داشته باشند.

<sup>83</sup> Greenleap Robotics

<sup>84</sup> SupAirVision

<sup>85</sup> Sherlock

<sup>86</sup> Volta

<sup>87</sup> Clarity

<sup>88</sup> Blockchain

<sup>89</sup> Smart Contracts

<sup>90</sup> Peer-to-Peer (P2P) Electricity Trading

- **سیتیگرید<sup>۹۱</sup> تجارت انرژی همتا به همتا را ارائه می‌دهد.**

استارت‌آپ بریتانیایی سیتیگرید تجارت انرژی همتا به همتا را با استفاده از زنجیره اس<sup>۹۲</sup>، ارائه می‌دهد. این استارت‌آپ با استفاده از قراردادهای هوشمند، تجارت برق مازاد در بازار آزاد را تسهیل می‌کند و سابقه معامله را حفظ می‌کند. از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی معاملات استفاده می‌کند، در نتیجه درآمد را برای تولیدکنندگان به حداکثر و هزینه‌ها را برای مصرف‌کنندگان به حداقل می‌رساند.

- **گرین لایف انرژی<sup>۹۳</sup> انرژی‌های تجدیدپذیر را با استفاده از توکن‌های بلاک‌چین ترویج می‌کند.**

استارت‌آپ گرین لایف انرژی مستقر در بریتانیا، بخش انرژی‌های تجدیدپذیر را از طریق فناوری بلاک‌چین ارتقا می‌دهد و از طریق بازار کربن دیجیتال و پلت فرم پرداخت ری‌فی<sup>۹۴</sup> شکاف بین ابزار وب ۳ و صنایع سنتی را پر می‌کند. این پلتفرم امکان کلاهبرداری را کاهش، ایمنی را افزایش می‌دهد و ماهیت معاملات را تأیید می‌کند. برای مقابله با تغییرات اقلیمی و رعایت مقررات زیست‌محیطی، شرکت‌ها به انرژی پاک و پایدار روی آورده‌اند. چالش در مقرون‌به‌صرفه ساختن انرژی‌های تجدیدپذیر با سوخت‌های فسیلی نهفته است. نوآوری‌های سخت‌افزاری مانند فتوولتائیک‌های پیشرفته (نانوالیاف<sup>۹۵</sup> و پانل‌های مبتنی بر تماس واقعی امیتر تک منفعل<sup>۹۶</sup> راندمان تبدیل خورشیدی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، تحقیقات بر روی کاتالیزورهای بدون پلاتین، مانند کربن قلع، پیل سوختی هیدروژن سبز کاهش هزینه را ممکن می‌سازد. شایان ذکر است، گرایش‌ها و استارت‌آپ‌های انرژی‌های تجدیدپذیر که در این بخش بیان شده‌اند، فقط سطح روندهای در حال پیشرفت را نشان می‌دهند و تحقیقات عمیق‌تر لازم و ضروری است.

منبع: startus-insights - Top 10 Renewable Energy Trends in 2024

<sup>91</sup> Sitigrid

<sup>92</sup> S-Chain

<sup>93</sup> Green Life Energy

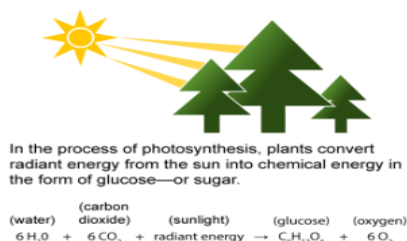
<sup>94</sup> ReFi (Regenerative Finance) Payment Platform

<sup>95</sup> Nanofibers

<sup>96</sup> Mono-Passive Emitter Real Contact (PERC) Based Panels

## استراتژی ایالات متحده در مدیریت زیست‌توده و زباله جامد شهری

### Photosynthesis



Source: Adapted from The National Energy Education Project (public domain)



Source: U.S. Energy Information Administration (public domain)

زیست‌توده یک ماده آلی تجدید پذیر است که از گیاهان و حیوانات به دست می‌آید و حاوی انرژی شیمیایی ذخیره‌شده از خورشید است که توسط گیاهان از طریق فتوسنتز تولید می‌شود. زیست‌توده می‌تواند مستقیماً برای گرما سوزانده شود یا از طریق فرآیندهای مختلف به سوخت مایع و گاز تبدیل شود. تا اواسط ۱۸۰۰ میلادی زیست‌توده بزرگ‌ترین منبع کل مصرف انرژی سالانه ایالات متحده بود. اما در سال ۲۰۲۲، تقریباً ۵ درصد از کل مصرف انرژی اولیه ایالات متحده را تشکیل می‌داد. زیست‌توده برای گرمایش و تولید برق و به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل استفاده می‌شود. این منبع انرژی، هم‌چنین نقش مهمی در بسیاری از کشورها به‌ویژه برای پخت‌وپز و گرمایش در کشورهای در حال توسعه دارد.

### ❖ زیست‌توده حدود ۵ درصد از انرژی ایالات متحده را در سال ۲۰۲۲ تأمین نمود

در سال ۲۰۲۲، زیست‌توده ۵ درصد از مصرف انرژی ایالات متحده یا حدود ۴۹۳۰ تریلیون بی.تی.یو<sup>۹۷</sup> را تشکیل می‌داد. انواع، مقادیر و درصد سهم کل مصرف انرژی زیست‌توده در سال ۲۰۲۲ عبارت بودند از:

- سوخت‌های زیستی: ۲۴۱۹ تریلیون بی.تی.یو - ۴۹٪
- چوب و ضایعات چوب: ۱۹۸۴ تریلیون بی.تی.یو - ۴۳٪
- زباله‌های جامد شهری، کود حیوانی و فاضلاب: ۴۱۱ تریلیون بی.تی.یو - ۸٪

<sup>97</sup> Trillion British thermal units (TBtu)

### ❖ بخش صنعت بزرگ‌ترین مصرف‌کننده زیست‌توده برای انرژی در ایالات متحده است

مقادیر برحسب تریلیون بی.تی.یو و درصد سهم کل مصرف انرژی زیست‌توده ایالات متحده توسط بخش مصرف‌کننده در سال ۲۰۲۲ عبارت بودند از:

- صنعتی: ۲۲۶۶ تریلیون بی.تی.یو - ۴۶٪
- حمل‌ونقل: ۱۵۶۵ تریلیون بی.تی.یو - ۳۲٪
- مسکونی: ۵۳۹ تریلیون بی.تی.یو - ۱۱٪
- برق الکتریکی: ۴۱۳ تریلیون بی.تی.یو - ۸٪
- تجاری: ۱۴۷ تریلیون بی.تی.یو - ۳٪

بخش صنعت، از نظر محتوای انرژی و درصد، بیشترین مصرف سالانه زیست‌توده ایالات متحده را در سال ۲۰۲۲ به خود اختصاص داد. صنایع چوب و کاغذ از زیست‌توده در نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاهی ترکیبی برای گرمای فرآیند و تولید برق استفاده می‌کنند بخش حمل‌ونقل دومین مقدار و درصد مصرف زیست‌توده (به‌عنوان سوخت زیستی) را در سال ۲۰۲۲ به خود اختصاص داد. بخش‌های مسکونی و تجاری از هیزم و پلت‌های چوب برای گرمایش استفاده می‌کنند. بخش تجاری نیز گاز طبیعی تجدیدپذیر تولیدشده در تأسیسات تصفیه فاضلاب شهری و محل دفن زباله را مصرف می‌کند و در برخی موارد، آن را می‌فروشند. بخش برق از ضایعات چوب و زیست‌توده برای تولید برق برای فروش به بخش‌های دیگر استفاده می‌کند.

### ❖ ایالات متحده یک صادرکننده خالص انرژی زیست‌توده است

بر اساس محتوای و میزان انرژی، کل صادرات انرژی زیست‌توده ایالات متحده از کل واردات انرژی زیست‌توده در سال ۲۰۲۲ بیشتر شد. سوخت‌های زیست‌توده متراکم شده (پلت‌های چوب و سایر سوخت‌های زیست‌توده متراکم شده) در سال‌های اخیر به یک کالای صادراتی ایالات متحده تبدیل شده‌اند. در سال ۲۰۲۲، ایالات متحده حدود ۸.۸ میلیون تن پلت سوخت چوب صادر نمود.

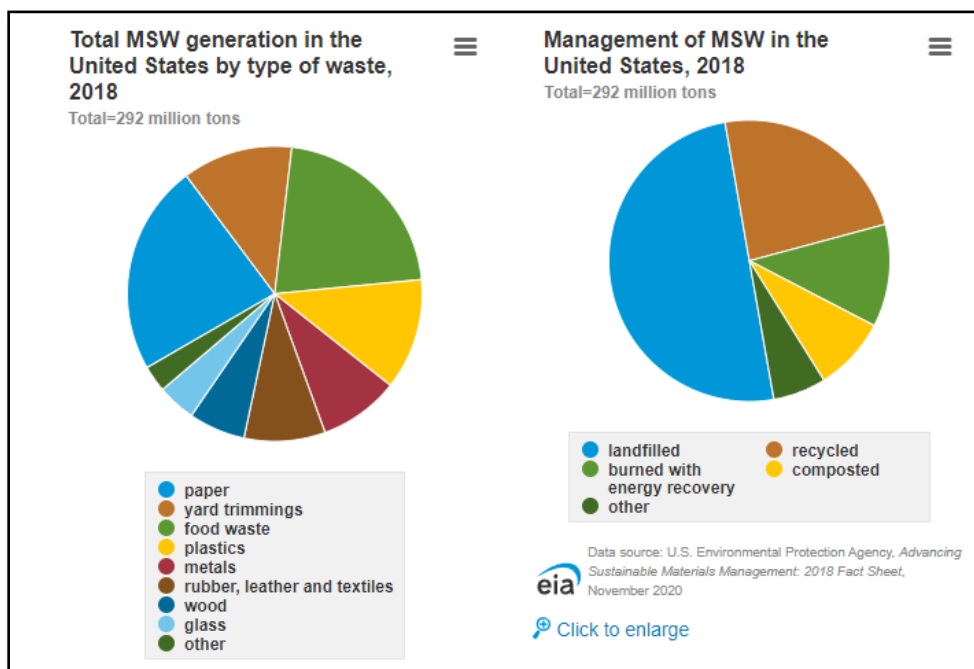
### ❖ انرژی حاصل از زباله‌های جامد شهری<sup>۹۸</sup>

زباله‌های جامد شهری که اغلب زباله نامیده می‌شود، برای تولید انرژی در کارخانه‌های تبدیل زباله به انرژی و در محل‌های دفن زباله در ایالات متحده استفاده می‌شود. زباله‌های جامد شهری شامل:

- زیست‌توده یا بیوژنیک (محصولات گیاهی یا حیوانی)، موادی مانند کاغذ، مقوا، ضایعات مواد غذایی، بریده‌های چمن، برگ‌ها، چوب و محصولات چرمی

<sup>98</sup> Municipal Solid Waste (MSW)

- مواد قابل احتراق غیر زیست‌توده مانند پلاستیک و سایر مواد مصنوعی ساخته‌شده از نفت
- مواد غیرقابل احتراق مانند شیشه و فلزات



تولید و مدیریت زباله جامد شهری در ایالات متحده در سال ۲۰۱۸

در سال ۲۰۱۸، حدود ۱۲ درصد از ۲۹۲ میلیون تن زباله‌های جامد شهری تولیدشده در ایالات متحده در کارخانه‌های تبدیل زباله به انرژی سوزانده شد.

### ❖ تولید بخار و برق با نیروگاه‌های تبدیل زباله به انرژی

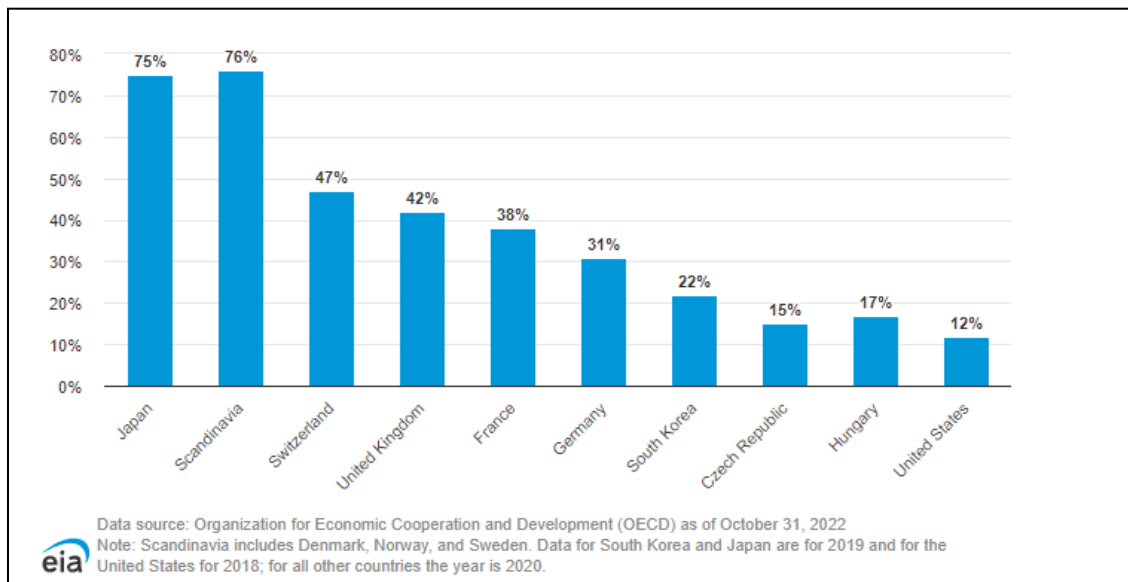
زباله‌های جامد شهری معمولاً در نیروگاه‌های ویژه تبدیل زباله به انرژی که از گرما برای تولید بخار برای تولید برق یا گرم کردن ساختمان‌ها استفاده می‌کنند، سوزانده می‌شود. در سال ۲۰۲۱، ۶۴ نیروگاه در ایالات متحده حدود ۱۳.۶ میلیارد کیلووات ساعت برق از سوزاندن حدود ۲۸ میلیون تن زباله‌های جامد شهری قابل احتراق برای تولید برق تولید کردند. مواد زیست‌توده حدود ۶۱ درصد از وزن زباله‌های جامد شهری قابل احتراق و حدود ۴۵ درصد از برق تولیدشده را تشکیل می‌دهند. باقیمانده زباله‌های جامد شهری قابل احتراق مواد قابل احتراق غیر زیست‌توده، عمدتاً پلاستیک بود. بسیاری از محل‌های دفن زباله بزرگ نیز با استفاده از گاز متان که از تجزیه زیست‌توده در محل‌های دفن زباله تولید می‌شود، برق تولید می‌کنند.

### ❖ مدیریت زباله، راهکار تبدیل زباله به انرژی

تولید برق تنها یک دلیل برای سوزاندن زباله‌های جامد شهری است. سوزاندن زباله همچنین مقدار موادی را که در محل‌های دفن زباله دفن می‌شوند، کاهش می‌دهد. کارخانه‌های تبدیل زباله به انرژی ۲۰۰۰ پوند زباله را به خاکستر با وزن حدود ۳۰۰ پوند تا ۶۰۰ پوند تبدیل می‌کنند و حجم زباله را حدود ۸۷ درصد کاهش می‌دهند.

### ❖ تبدیل زباله به انرژی در سراسر جهان

بسیاری از کشورها از نیروگاه‌های تبدیل زباله به انرژی برای جذب انرژی در زباله‌های جامد شهری استفاده می‌کنند. استفاده از نیروگاه‌های تبدیل زباله به انرژی در برخی از کشورهای اروپایی و ژاپن نسبتاً زیاد است، تا حدی به این دلیل که این کشورها فضای باز کمی برای دفن زباله دارند.

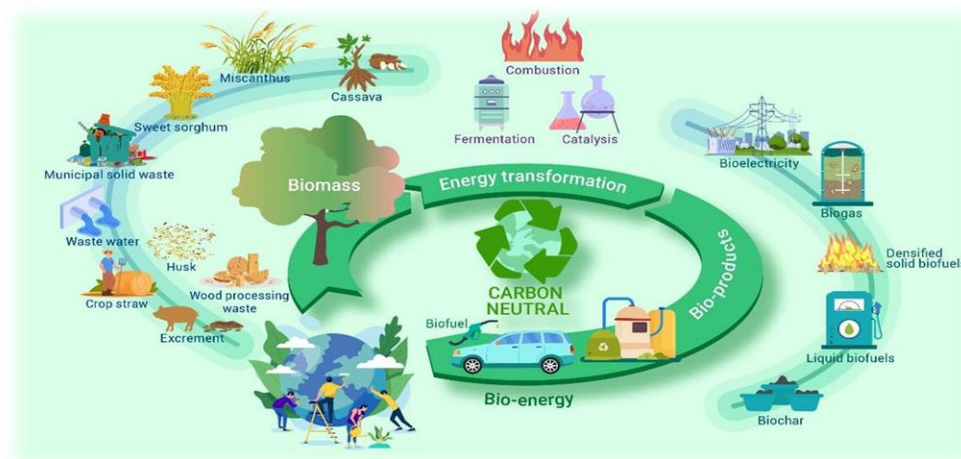


درصد کل زباله‌های جامد شهری که با بازیافت انرژی در کشورهای منتخب سوزانده می‌شوند

منابع:

- eia.gov -Biomass—renewable energy from plants and animals ,2023
- Waste-to-energy (Municipal Solid Waste) - eia.gov,2022

## مروری بر فناوری‌های زیست‌توده و افق پیش‌رو



انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای، آلودگی مرگبار هوا، قیمت‌های بی‌ثبات سوخت‌های فسیلی و رشد شدید تقاضای سوخت حمل‌ونقل در سطح جهانی، تلاش‌های تحقیقاتی گسترده در توسعه انرژی زیستی را تقویت کرده است. مطالعات علمی نشان داده‌اند که می‌توان طیف گسترده‌ای از انرژی زیستی را از باقیمانده‌های زیست‌توده و زباله‌ها تولید کرد، اما هزینه آن قابل رقابت با سوخت‌های پترو<sup>۹۹</sup> و سایر انرژی‌های تجدیدپذیر نیست. تلاش‌های مداوم به طور گسترده برای بهبود فناوری‌های تبدیل<sup>۱۰۰</sup> به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید ادامه دارد. پیشرفت‌های در حال ظهور در دو مسیر تبدیل اولیه، یعنی تکنیک‌های تبدیل ترموشیمیایی (به عنوان مثال، تبدیل به گاز، مایع‌سازی، و تجزیه در اثر حرارت) و بیوشیمیایی (به عنوان مثال هضم بی‌هوازی، تخمیر الکلی و تولید هیدروژن فوتوبیولوژیکی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، ترانس استری کردن، که به نظر می‌رسد ساده‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین مسیر برای تولید بیودیزل در مقادیر زیاد باشد، مورد بحث است. در نهایت، استراتژی‌های تبدیل مستقیم بقایای زیست‌توده و زباله به انرژی الکتریکی زیستی شامل استفاده از احتراق و سلول‌های سوختی میکروبی بررسی می‌شوند. در کشورهای صنعتی، طیف وسیعی از مواد اولیه به‌وفور برای تولید سوخت زیستی در دسترس هستند، از جمله پسماندهای کشاورزی و جنگلداری، زباله‌های ساختمانی و صنعتی و زباله‌های جامد شهری. سوخت‌های زیستی که از این مواد اولیه تولید می‌شوند در دسته سوخت‌های زیستی نسل دوم قرار می‌گیرند. برخلاف

<sup>99</sup> Petro-Fuels

<sup>100</sup> Conversion Technologies

سوخت‌های زیستی نسل اول که از محصولات غذایی خوراکی (مانند نیشکر، گندم، جو، ذرت، سیب‌زمینی، سویا، آفتابگردان و نارگیل) به دست می‌آیند، سوخت‌های زیستی نسل دوم از مواد لیگنوسلولزی<sup>۱۰۱</sup> (مانند جارتروفا<sup>۱۰۲</sup>، کاساوا<sup>۱۰۳</sup>، سوئیچ گرس<sup>۱۰۴</sup>، چوب<sup>۱۰۵</sup> و کاه<sup>۱۰۶</sup>) و باقی‌مانده‌های زیست‌توده تولید می‌شوند. استفاده از پسماندهای زیست‌توده و ضایعات به عنوان منبع اولیه برای سوخت‌های زیستی، پیشنهاد امیدوارکننده‌ای برای کاهش مسائل زیست‌محیطی مربوط به دفع زباله‌ها است. نوع دیگر زیست‌توده، یعنی جلبک‌ها، به دلیل پتانسیل بالا برای تولید مقادیر زیادی لیپید مناسب در تولید بیودیزل، به عنوان ماده اولیه برای سوخت‌های زیستی نسل سوم معرفی می‌شوند. علاوه بر این، این زیست‌توده با رشد سریع می‌تواند به طور مستقیم برای تولید طیف گسترده‌ای از سوخت‌های زیستی استفاده شود.

### ❖ پسماندها و پسماندهای زیست‌توده

برخلاف زیست‌توده‌ای که به طور ویژه برای اهداف انرژی کشت می‌شود، پسماندهای زیست‌توده و ضایعات به عنوان محصولات جانبی زمانی که محصولات خام موردنظر کاشته، پردازش و مصرف می‌شوند، تولید می‌گردند. باقی‌مانده‌های زیست‌توده را می‌توان به گروه‌های اول، دوم و سوم طبقه‌بندی کرد. بقایای اولیه معمولاً در طول کاشت محصولات غذایی هدف و محصولات جنگلی در مزرعه مانند ساقه، برگ و کاه تولید می‌شود. درحالی‌که، پسماندهای ثانویه زمانی تولید می‌شوند که محصولات غذایی به شکل نهایی محصولات فرآوری شوند. تراشه‌های چوب، پوسته قهوه، پوست برنج، باگاس نیشکر و PKC<sup>107</sup> نمونه‌هایی از ضایعات کشاورزی و فرآوری مواد غذایی هستند. از سوی دیگر، باقیمانده‌های درجه سوم پس از مصرف یک محصول مشتق شده از زیست‌توده توسط انسان و یا حیوانات در دسترس می‌شوند و این باقیمانده‌ها ممکن است به شکل زباله‌های جامد شهری ظاهر شوند و بعداً به لجن فاضلاب تبدیل گردند.

تصویر در ادامه، توسعه تولید سوخت زیستی را نشان می‌دهد و سوخت‌های زیستی نسل دوم تولیدشده توسط پسماندهای زیست‌توده و ضایعات و مسیرهای تبدیل آن‌ها برای تولید انواع مختلف انرژی زیستی، از جمله گاز سنتز، نفت زیستی، بیوجار، برق، بیوگاز، بیواتانول، بیوهیدروژن و بیودیزل در میان بقایای زیست‌توده و ضایعات، بقایای چوب و کشاورزی (بقایای زیست‌توده اولیه و ثانویه)، روغن‌های آشپزی (بقایای زیست‌توده سوم) و زیست‌توده ریز جلبک پتانسیل‌های امیدوارکننده خود را نشان داده‌اند.

<sup>101</sup> Lignocellulosic

<sup>102</sup> Jatropha

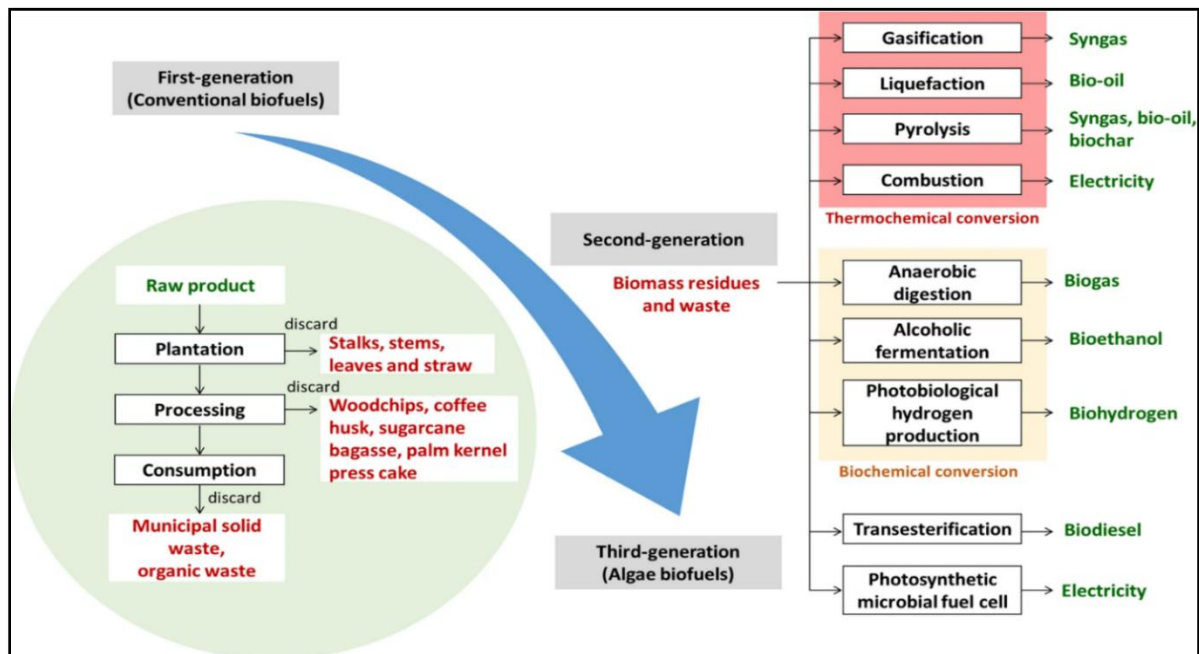
<sup>103</sup> Cassava

<sup>104</sup> Switchgrass

<sup>105</sup> Wood

<sup>106</sup> Straw

<sup>107</sup> Palm Kernel Press Cake



نمودار توسعه تولید سوخت زیستی با نکات برجسته در مورد سوخت‌های زیستی نسل دوم تولیدشده توسط پسماندهای زیست‌توده و ضایعات و مسیرهای تبدیل آن‌ها برای تولید طیف گسترده‌ای از انرژی زیستی

## ❖ بقایای چوب و کشاورزی

ضایعات پردازش چوب مانند خاکاره، تراشه‌های چوب و کنده‌های دور ریخته شده که از طریق کارخانه‌های چوب‌بری و فعالیت‌های پردازش چوب تولید می‌شوند، می‌توانند به عنوان مواد اولیه برای سوخت‌های زیستی استفاده شوند. به عنوان مثال، بقایای چوب و خاکاره تولیدشده از صنعت کارخانه‌های اره و کاغذ می‌تواند به عنوان سوخت دیگ بخار و مواد اولیه برای تولید اتانول استفاده شود. علاوه بر این، کاه ۷۲.۲ درصد از منابع انرژی زیست‌توده در چین را به خود اختصاص داده است. کاه به باقیمانده‌ها یا محصولات جانبی برداشت محصولات غذایی مانند برنج، گندم، ذرت، لوبیا، پنبه و محصولات قندی گفته می‌شود. اجزای ذرت مانند ساقه، دانه و برگ نیز پتانسیل تبدیل شدن به قندهای قابل تخمیر برای تولید بیو‌تانول<sup>۱۰۸</sup> را نشان می‌دهد. در حالی که در کشورهای گرمسیری، بقایای نیشکر، به‌ویژه باگاس نیشکر<sup>۱۰۹</sup> و برگ‌ها، می‌توانند گزینه مناسبی برای استفاده اقتصادی از بسترهای باقیمانده برای تولید بیواتانول و سایر سوخت‌های زیستی مانند بیوجار<sup>۱۱۰</sup> باشند. PKC، باقیمانده‌ای که از استخراج روغن نخل به دست می‌آید، برای تولید بیواتانول از طریق فرآیند تخمیر استفاده می‌شود.

<sup>108</sup> Bio-Butanol

<sup>109</sup> Sugarcane Bagasse

<sup>110</sup> Biochar

## ❖ ضایعات روغن‌های آشپزی<sup>۱۱۱</sup>

درحالی که روغن‌های بکر با کیفیت بالا از مواد اولیه منتخب تولید می‌شوند، بیودیزل کم‌هزینه را می‌توان از روغن‌های زائد مانند روغن‌های پخت‌وپز استفاده‌شده به دست آورد. استفاده از پسماند روغن‌های آشپزی به جای روغن بکر به عنوان مواد اولیه برای تولید بیودیزل روشی کارآمد برای کاهش هزینه مواد است. استفاده از روغن‌های زائد احتمالاً هزینه تولید بیودیزل را ۶۰ تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده مجدد از روغن‌های زائد مشکلات مربوط به دفع مقادیر زیادی روغن سرخ‌کردنی را که به دلیل محتوای بالای اسیدهای چرب آزاد دیگر برای خوراکی مناسب نیستند، کاهش می‌دهد. ترکیب ۲۰ درصد حجمی بیودیزل تولیدشده از روغن‌های زائد و ۸۰ درصد حجمی دیزل (B20) را می‌توان بدون تغییر عمده در موتورها به کار برد. روغن‌های خوراکی استفاده‌شده در مقایسه با روغن‌های استفاده‌نشده از نظر کیفیت تفاوت قابل توجهی ندارند و پیش‌تصفیه‌های ساده مانند فیلتراسیون و حرارت دادن می‌توانند برای حذف آب و ذرات جامد ناخواسته قبل از ترانس‌استریفیکاسیون<sup>۱۱۲</sup> بعدی استفاده شوند.

## ❖ زیست‌توده جلبکی

در یک تقریب اول، جلبک‌ها را می‌توان به دو گروه عمده دسته‌بندی کرد که عبارت‌اند از جلبک‌های بزرگ<sup>۱۱۳</sup> (یا جلبک‌های دریایی) و ریزجلبک‌ها<sup>۱۱۴</sup>. جلبک‌های بزرگ به‌طور کلی به جلبک‌های چند سلولی بزرگی گفته می‌شود که معمولاً در حوضچه‌ها رشد می‌کنند. درحالی‌که ریزجلبک‌ها جلبک‌های تک‌سلولی و ریز هستند که اغلب به‌صورت معلق در بدنه‌های آبی رشد می‌کنند. جلبک‌های بزرگ حاوی طیف گسترده‌ای از ترکیبات فعال زیستی هستند، و با این حال، حاشیه‌های کمتری را در مورد سوخت‌های زیستی می‌توان از جلبک‌های بزرگ نسبت به ریزجلبک‌ها به دست آورد. بنابراین، ریزجلبک‌ها به دلیل تجمع بالای لیپیدها و سرعت رشد سریع، منبع امیدوارکننده دیگری از روغن هستند. علاوه بر این، ریزجلبک‌ها برای زمین‌های کشاورزی و منابع بزرگ آب شیرین مضر نیستند. مشابه بقایای زیست‌توده و ضایعات، زیست‌توده ریزجلبک مصرف‌شده را می‌توان پس از پردازش استخراج محصولات هدف مانند روغن‌ها یا سایر ترکیبات با ارزش بالا، به سوخت زیستی تبدیل نمود.

## ❖ تکنیک‌های تبدیل انرژی زیستی

در حال حاضر، به دلیل شرایط محیطی و اقتصادی موجود، نیاز شدیدی به بازیافت و صرفه‌جویی در انرژی وجود دارد. فن‌آوری‌های متنوعی برای استفاده از زباله برای تولید انرژی زیستی مورد بهره‌برداری و توسعه قرار گرفتند. فناوری تبدیل

<sup>111</sup> Waste Cooking Oils

<sup>112</sup> Transesterification

<sup>113</sup> Macroalgae

<sup>114</sup> Microalgae

زباله به انرژی شامل تبدیل مواد زائد به شکل‌های متعدد سوخت است که می‌تواند برای تأمین انرژی مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر، بهره‌برداری سازگار با محیط‌زیست و تبدیل زباله‌های زیست‌توده به سوخت‌های شیمیایی به عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر مطرح شده است. چندین فناوری و گزینه‌های فرآیندی برای تبدیل انرژی زیست‌توده در دسترس هستند. جدای از تکنیک ترانس‌استریفیکاسیون، تبدیل زیست‌توده زباله به انرژی با استفاده از این دو تکنیک کلی که عبارت‌اند از تبدیل حرارتی<sup>۱۱۵</sup> و بیوشیمیایی<sup>۱۱۶</sup> انجام می‌شود. تبدیل ترموشیمیایی تجزیه اجزای آلی در زیست‌توده با استفاده از گرما است درحالی‌که تبدیل بیوشیمیایی از میکروارگانیسم‌ها یا آنزیم‌ها برای تبدیل زیست‌توده یا ضایعات به انرژی مفید استفاده می‌کند. تبدیل با استفاده از فناوری ترموشیمیایی شامل تجزیه در اثر حرارت، تبدیل به گاز، مایع سازی و احتراق است. از سوی دیگر، تبدیل بیوشیمیایی شامل سه گزینه فرآیندی است که به نام‌های هضم بی‌هوازی، تخمیر الکلی و واکنش فوتوبیولوژیکی شناخته می‌شوند.

### ❖ تبدیل ترموشیمیایی

تبدیل از طریق فناوری ترموشیمیایی شامل فرآیند اصلاح شیمیایی در دمای بالا است که نیاز به شکستن پیوند و تبدیل مواد آلی به بیوجار (جامد)، گاز سنتز و روغن زیستی بسیار اکسیژنه<sup>۱۱۷</sup> (مایع) دارد. در تبدیل ترموشیمیایی، سه فرآیند اصلی موجود است که عبارت‌اند از گازی سازی<sup>۱۱۸</sup>، پیرولیز<sup>۱۱۹</sup> و مایع سازی<sup>۱۲۰</sup>. انتخاب نوع تبدیل می‌تواند تحت تأثیر ماهیت و کمیت مواد اولیه زیست‌توده، نوع ترجیحی انرژی، شرایط کاربر نهایی، اصول محیطی، شرایط مالی و جنبه‌های دقیق پروژه قرار گیرد. بر اساس مطالعات تحقیقاتی متعدد، گزارش شده است که فناوری‌های تبدیل حرارتی به دلیل در دسترس بودن زیرساخت‌های صنعتی برای تأمین تجهیزات تبدیل ترموشیمیایی (که بسیار توسعه یافته است)، زمان پردازش کوتاه، کاهش مصرف آب و مزیت افزوده تولید انرژی از زباله‌های پلاستیکی (که با فعالیت میکروبی قابل هضم نیست) مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

### ➤ گازی شدن

تکنیک گازی شدن شامل واکنش شیمیایی در محیطی است که کمبود اکسیژن دارد. این فرآیند شامل گرمایش زیست‌توده در دماهای بالا (۵۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار اتمسفر تا ۳۳ اینچ و با محتوای اکسیژن کم یا غائب برای تولید

<sup>115</sup> Thermochemical Conversion

<sup>116</sup> Biochemical Conversion

<sup>117</sup> Highly Oxygenated Bio-Oil

<sup>118</sup> Gasification

<sup>119</sup> Pyrolysis

<sup>120</sup> Liquefaction

مخلوط‌های گاز قابل احتراق است. فرآیند تبدیل به گاز، اجزای کربن دار را به گاز سنتز متشکل از هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، متان، هیدروکربن‌های بالاتر و نیتروژن با حضور یک عامل تبدیل به گاز<sup>۱۲۱</sup> و کاتالیزور تبدیل می‌کند. با استفاده از این گاز سنتز، انواع مختلفی از حامل‌های انرژی مانند سوخت زیستی، گاز هیدروژن، گاز بیومتان، گرما، برق و مواد شیمیایی تأمین می‌شود. گازی‌سازی زباله‌های زیستی به عنوان مسیری ایده‌آل برای تبدیل مواد اولیه زیست‌توده مختلف از زباله‌های کشاورزی، صنعتی، آشپزخانه، غذا و مزرعه در نظر گرفته می‌شود.

ترکیب گاز تولیدشده از فرآیند گازی‌سازی با توجه به نوع گازساز<sup>۱۲۲</sup>، عامل تبدیل به گاز<sup>۱۲۳</sup>، نوع کاتالیزور و اندازه ذره متفاوت است. به‌طور کلی، مقدار زیادی کربن دی‌اکسید و کربن مونوکسید از طریق فرآیند گازی‌سازی مواد اولیه که حاوی مقدار زیادی کربن و اکسیژن است، تولید می‌شود. در بین تمام مواد اولیه زباله، زباله‌های جامد شهری و بقایای کشاورزی محتوای کربن دی‌اکسید و کربن مونوکسید بیشتری دارند. در طی فرآیند گازی‌سازی، گوگرد به شکل هیدروژن سولفید<sup>۱۲۴</sup> منتشر می‌شود که باعث پیچیدگی در جداسازی و تصفیه گاز می‌شود. تصویر زیر به‌طور کلی انواع گازساز را برای گازی‌سازی زباله‌های زیستی نشان می‌دهد.

Type of gasifier	Advantages	Type of feedstocks	Operating temperature (°C)
Fixed bed gasifier	<ul style="list-style-type: none"> <li>High tolerance of ash content.</li> <li>Able to withstand high moisture content feedstock.</li> <li>Low tar accumulation.</li> <li>Minimum sensitivity towards feedstock size and quantity.</li> </ul>	Wood	800-900
		Sawdust	650-960
		Palm shell	750
		Sewage sludge	800
Fluidized bed gasifier	<ul style="list-style-type: none"> <li>High heat transfer rate.</li> <li>Thorough mixing of feedstock and bed material.</li> <li>Moderate requirements of gasification medium</li> </ul>	Pine woodchips	700-900
		Beech wood	750-850
		Rice straw	600-800
		Wood and bark waste	300-400
Entrained flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexibility types of feedstock.</li> <li>Short processing time.</li> <li>Uniformity of temperature throughout reactor.</li> <li>Low tar production in gas.</li> </ul>	Straw biomass	900
		Jatropha curcas shell	1000
		Bituminous coal and wheat straw	1300
		Empty fruits bunch	900
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capable to treat both hazardous and non-hazardous wastes.</li> <li>Nontoxic method to destroy hazardous waste.</li> <li>Easy removal of ash as slag.</li> </ul>	MSW and plastic solid waste	1250-1315
		Biomedical waste	1326
		Hazardous waste from oil and gas	1500

انواع رایج گازسازها در گازی‌سازی زباله‌های زیستی

<sup>121</sup> Gasification Agent

<sup>122</sup> Gasifier

<sup>123</sup> Gasification Agent

<sup>124</sup> Hydrogen Sulfide

گازی‌ساز پلاسما یک تکنیک ترموشیمیایی جدید است که برای زباله‌های زیست توده مضر قابل استفاده است. روش گازی‌سازی پلاسما یک روش آلوترمال<sup>۱۲۵</sup> است که از نیروی خارجی برای گرم کردن و حفظ دماهای بالا استفاده می‌کند. محصولاتی که از این فرآیند تولید می‌شوند بیشتر گاز سنتز، اسلاگ<sup>۱۲۶</sup> و خاکستر<sup>۱۲۷</sup> هستند. از آنجایی که این فرآیند از دمای بالا استفاده می‌کند، فرآیند گازی‌سازی پلاسما می‌تواند تقریباً تمام مواد از جمله مواد پزشکی مانند بانداژ، کیت تزریق، ضایعات زیست پزشکی حاوی داروهای سیتوتوکسیک<sup>۱۲۸</sup>، آنتی بیوتیک‌ها و همچنین ضایعات آزمایشگاهی شامل مولکول‌های زیستی یا موجودات مضر برای محیط‌زیست را تجزیه کند. محققان دریافته‌اند که این فرآیند هوای غنی از اکسیژن را به عنوان گاز تشکیل‌دهنده پلاسما مصرف می‌کند و منجر به افزایش راندمان کارخانه بیش از ۲۶٪ می‌شود. این عملکرد به عنوان بهترین نقطه مرجع برای احتراق زمینی متداول تکنیک زباله به انرژی شناخته شده است. آخرین مطالعات بر روی پلاسما تبدیل به گاز زباله‌های زیست پزشکی (بافت استخوانی) و زباله‌های خانگی، نشان داد که غلظت کلی گاز سنتز شده به ترتیب ۶۹.۶ و ۷۱.۱ درصد بود.

### ➤ تبدیل به مایع

مایع‌سازی و تجزیه در اثر حرارت زیست توده دو تکنیکی هستند که محصولات را به عنوان روغن زیستی<sup>۱۲۹</sup> یا ماده خام زیستی<sup>۱۳۰</sup> تبدیل می‌کنند. فرآیند مایع‌سازی ترموشیمیایی شامل تولید روغن زیستی در دمای پایین و فشار بالا با یا بدون حضور کاتالیزور در حضور هیدروژن است. مایع‌سازی هیدروترمال<sup>۱۳۱</sup> به عنوان پیرولیز آبدار<sup>۱۳۲</sup> نیز شناخته می‌شود و یک نوع مایع‌سازی شناخته شده است که از آب زیر بحرانی<sup>۱۳۳</sup> در دمای متوسط بین ۲۵۰ تا ۳۷۴ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۰ تا ۲۲۰ بار برای تبدیل زیست توده به بیولوژیک استفاده می‌کند. فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال شامل واکنش‌های تجزیه و پلیمریزاسیون مجدد برای تبدیل روغن زیستی، مواد شیمیایی محلول در آب، رسوب جامد و گاز است. فشار زیاد در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال به حفظ آب در حالت مایع کمک می‌کند، درحالی‌که ترکیب فشار و دمای بالا منجر به کاهش ثابت دی‌الکتریک و چگالی می‌شود که بر هیدروکربن‌ها برای محلول بودن در آب تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، روش مایع‌سازی هیدروترمال از زیست‌توده‌ای استفاده می‌کند که حاوی رطوبت بالایی است که می‌تواند هزینه فاز خشک کردن یا آبیگری را به حداقل برساند. بنابراین، مواد اولیه‌ای که حاوی محتوای متنوعی از رطوبت هستند، به عنوان مثال زیست توده چوبی،

<sup>125</sup> Allothermal

<sup>126</sup> Slug

<sup>127</sup> Ash

<sup>128</sup> Cytotoxic Drugs

<sup>129</sup> Bio-Oil

<sup>130</sup> Biocrude

<sup>131</sup> Hydrothermal liquefaction (HTL)

<sup>132</sup> Hydrous Pyrolysis

<sup>133</sup> Subcritical Water (SCW)

زباله‌ها و جلبک، برای تولید روغن زیستی مناسب هستند. بر اساس تحقیقات وزارت انرژی و کشاورزی ایالات متحده<sup>۱۳۴</sup>، تقریباً ۷۰۰ میلیون تن مواد اولیه زیست توده خشک سالانه در ایالات متحده تولید می‌شود و این امر می‌تواند به تولید سوخت زیستی کمک کند. در بین منابع، منابع جنگلداری و کشاورزی می‌تواند تقریباً ۳۵۰ میلیون تن زیست توده خشک را شامل شود. بنابراین، از آنجایی که این زباله‌های تولید شده زیستی به مقدار زیادی در دسترس هستند، به عنوان متقاضیان شایسته برای تولید روغن زیستی ظاهر می‌شوند. به نظر می‌رسد زیست توده چوبی به دلیل ترکیبات تشکیل دهنده آن (سلولز<sup>۱۳۵</sup> (۳۰-۵۰٪)، همی سلولز<sup>۱۳۶</sup> (۱۵-۳۵٪) و لیگنین<sup>۱۳۷</sup> (۲۰-۳۵٪)) منبع مناسبی برای مایع سازی هیدروترمال باشد. سلولز در دمای اتاق یک ترکیب غیر قطبی است، اما با افزایش دما محلول است و از قابلیت پلیمریزاسیون بالایی برخوردار است. در مورد همی سلولز، دارای آرایش ضعیف و پیوند هیدروژنی کمتر انعطاف‌پذیر است که باعث تجزیه آسان مولکول‌ها می‌شود. بازده روغن زیستی از زیست توده چوبی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی، با یا بدون حضور کاتالیزور و نوع حلال است. در زیست توده چوبی با استفاده از مایع سازی هیدروترمال، روغن زیستی تولید شده از ۱۷ تا ۶۸ درصد وزنی متغیر است.

لجن فاضلاب<sup>۱۳۸</sup> مشتقی از تصفیه فاضلاب است که شامل پروتئین‌ها، لیپیدها، فیبر، کربوهیدرات‌های غیر فیبری و خاکستر می‌باشد. لجن فاضلاب یک ماده اولیه امیدوارکننده برای فرآیند مایع سازی هیدروترمال است زیرا به راحتی در حجم زیاد در دسترس است. علاوه بر این، گزارش شده است که در مقایسه با لجن خشک، بهره‌برداری از لجن مرطوب می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. چالش در تولید روغن زیستی با کیفیت با استفاده از لجن فاضلاب، رطوبت بالای آن است که بالاتر از ۸۵ درصد می‌باشد. مطالعات متعددی در تلاش برای کاهش رطوبت در لجن انجام شده است که شامل استفاده از کاه خشک<sup>۱۳۹</sup>، هم مایع سازی<sup>۱۴۰</sup>، ان‌هگزان<sup>۱۴۱</sup> برای جداسازی آب محدود، متانول برای استخراج پلیمرهای خارج سلولی و پیش تصفیه آب فوق بحرانی<sup>۱۴۲</sup> برای شکستن سلول‌های لجن، است. در طول فرآیند مایع سازی هیدروترمال، تمام مواد آلی موجود در مواد اولیه به روغن زیستی تبدیل نمی‌شوند. مواد آلی باقی‌مانده در مایع به‌عنوان پساب روان‌سازی پس از هیدروترمال<sup>۱۴۳</sup> باقی می‌ماند که دارای مواد مغذی متعددی هستند. محققان دریافته‌اند که تقریباً ۲۰ درصد کربن از مواد اولیه به پساب روان‌سازی پس از هیدروترمال منتقل می‌شود. کربن منتقل شده بیشتر به شکل مونوساکاریدها، الیگوساکاریدها و اسیدهای آلی مانند اسیدهای استیک خواهد بود. بنابراین، بهبود فناوری که قادر به بازیابی کربن‌های آلی باقی‌مانده از پساب

<sup>134</sup> US Energy and Agriculture Department

<sup>135</sup> Cellulose

<sup>136</sup> Hemicellulose

<sup>137</sup> Lignin

<sup>138</sup> Sewage Sludge

<sup>139</sup> Dry Straw

<sup>140</sup> Co-Liquefaction

<sup>141</sup> n-Hexane

<sup>142</sup> Supercritical Water (SCW) Pre-treatment

<sup>143</sup> Post-Hydrothermal Liquefaction Wastewater (PHWW)

روان‌سازی پس از هیدروترمال و تبدیل آن‌ها به محصولاتی با ارزش بالا باشد، حیاتی است. این فرآیند قطعاً از دوام مقرون‌به‌صرفه و امکان اقتصادی مایع‌سازی هیدروترمال پشتیبانی می‌کند. اخیراً کارهای زیادی در خصوص مایع‌سازی هیدروترمال با استفاده از ریزجلیک‌های مرطوب انجام شده است زیرا مزایای آن در حذف فرآیند خشک کردن و تبدیل بخش‌های چربی، پروتئین و کربوهیدرات به مایع روغن زیستی با یا بدون کاتالیزور است.

### ➤ پیرولیز (آشکافت)

در میان مسیرهای تبدیل ترموشیمیایی زیست توده، تجزیه در اثر حرارت و تبدیل به گاز دو فرآیندی هستند که معمولاً مورد مطالعه قرار می‌گیرند. پیرولیز تجزیه حرارتی زیست توده است که در غیاب اکسیژن با محدوده دمای عملیاتی از ۳۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد که می‌تواند تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد، انجام می‌شود. فرآیند پیرولیز مواد آلی را به مخلوط جامد، مایع و گاز تجزیه می‌کند. تفاوت بین گازی شدن و تجزیه در اثر حرارت در این است که گازی شدن گاز سوختی<sup>۱۴۴</sup> تولید می‌کند که برای تولید گرما قابل احتراق است. درحالی‌که فرآیند پیرولیز سوخت مایعی را تولید می‌کند که به عنوان روغن پیرولیز<sup>۱۴۵</sup> شناخته می‌شود که می‌تواند جایگزینی برای نفت کوره در استفاده از گرمایش ساکن یا در تولید الکتریسیته باشد. مزیت سوخت مایعی که با پیرولیز تولید می‌شود نسبت به گاز سوختی فرآیند گازی‌سازی این است که روغن زیستی تولید شده را می‌توان به راحتی ذخیره و بدون زحمت حمل نمود. سه نوع فرآیند پیرولیز وجود دارد که بر اساس شرایط عملیاتی متفاوت هستند: پیرولیز آهسته<sup>۱۴۶</sup>، سریع<sup>۱۴۷</sup> و فلاش<sup>۱۴۸</sup>. ترکیب محصولات این روش‌ها تحت تأثیر شرایط عملیاتی آن‌ها است. پیرولیز آهسته شامل فرآیند تجزیه است که در دمای پایین، سرعت گرمایش<sup>۱۴۹</sup> و زمان ماند بخار<sup>۱۵۰</sup> طولانی، زغال‌سنگ<sup>۱۵۱</sup> تولید می‌کند. دستاورد کلیدی پیرولیز سریع، روغن زیستی است که در دمای کنترل شده تقریباً ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ماند کوتاه (کمتر از دو ثانیه) و سرعت گرمایش بالا (بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه) رخ می‌دهد. درحالی‌که برای پیرولیز فلاش، زمان واکنش بسیار کوتاه است و سرعت گرمایش بیشتر از پیرولیز سریع است. در حال حاضر، توجه بیشتری به تولید مایع از پیرولیز سریع داده شده است. این امر به دلیل مزایای بازده بالای روغن پیرولیز تا ۷۵ درصد وزنی و فناوری مقرون‌به‌صرفه، بسیار کارآمد در انرژی و سازگاری با محیط‌زیست است. روغن پیرولیز به رنگ قهوه‌ای تیره، با ویسکوزیته بالا است. از ارزش حرارتی پایینی استفاده می‌کند و از چندین ترکیب شیمیایی تشکیل شده است که شامل اسیدها، الکل‌ها،

<sup>144</sup> Fuel Gas

<sup>145</sup> Pyrolysis Oil (py-oil)

<sup>146</sup> Slow Pyrolysis

<sup>147</sup> Fast Pyrolysis

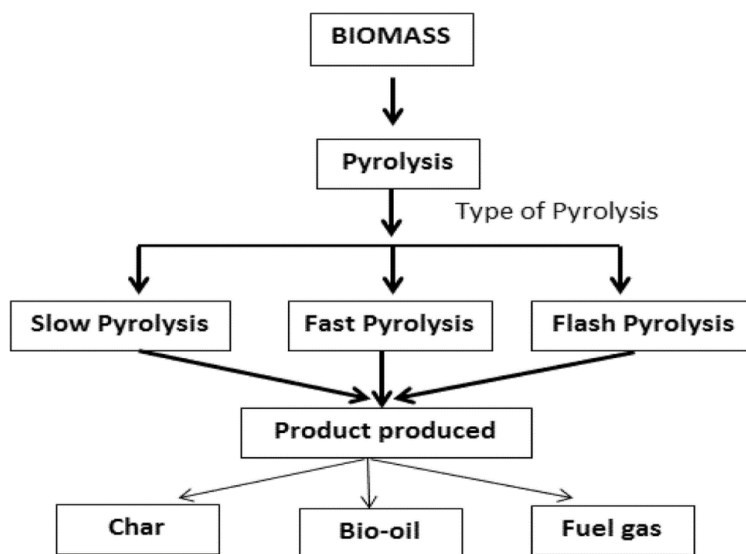
<sup>148</sup> Flash Pyrolysis

<sup>149</sup> Heating Rate

<sup>150</sup> Vapour Residence Time

<sup>151</sup> Char

آلدئیدها<sup>۱۵۲</sup>، فنلها<sup>۱۵۳</sup> و الیگومرها<sup>۱۵۴</sup>ی است که از لیگنین منشأ می‌گیرند. در سال‌های اخیر، بهبود خواص روغن پیرولیز به چالش اصلی تبدیل شده است. پیشرفت روغن پیرولیز مورد نیاز است تا بتوان از آن به عنوان جایگزینی برای نفت خام استفاده کرد. مسی‌های متعددی برای ارتقای روغن پیرولیز وجود دارد که شامل رویکردهای فیزیکی، شیمیایی و کاتالیزوری است.



انواع مختلف فرآیند پیرولیز و فرآورده‌های آن‌ها

### ❖ تبدیل بیوشیمیایی

تبدیل بیوشیمیایی شامل استفاده از مخمر و یا باکتری‌های تخصصی مخمر برای تبدیل زیست توده یا زباله به انرژی مفید است. گزینه‌های فرآیند کلاسیک عبارت‌اند از هضم بی‌هوازی، تخمیر الکلی و تکنیک‌های فوتوبیولوژیکی که منجر به تولید سوخت‌های زیستی مختلف می‌شود.

### ➤ هضم بی‌هوازی<sup>۱۵۵</sup>

از آنجایی که زیست توده ریزجلبک‌ها حاوی مقادیر بالایی از مواد مغذی (مانند کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها) است، استفاده کامل از زیست توده جنبه‌های اقتصادی، پایداری و سبز پالایشگاه‌های زیستی ریزجلبک‌ها را بهبود می‌بخشد. یکی از راه‌های به حداکثر رساندن استخراج مواد مغذی از طریق هضم بی‌هوازی باقیمانده زیست توده به‌دست‌آمده از فرآیند سنتز بیودیزل است. در هضم بی‌هوازی، زیست توده ریز جلبک مصرف‌شده توسط میکروارگانیسم‌ها به بیوگاز تبدیل می‌شود و

<sup>152</sup> Aldehydes

<sup>153</sup> Phenols

<sup>154</sup> Oligomers

<sup>155</sup> Anaerobic Digestion

بیوگاز عمدتاً حاوی متان و کربن دی‌اکسید با مقادیر کمی از هیدروژن سولفید است. بیوگاز دارای محتوای انرژی ۲۰ تا ۴۰ درصد از ارزش حرارتی کمتر از زیست توده است. هضم بی‌هوازی می‌تواند زیست توده مرطوب با رطوبت تا ۹۰ درصد را در خود جای دهد. سه مرحله اصلی در هضم بی‌هوازی وجود دارد که عبارت‌اند از هیدرولیز<sup>۱۵۶</sup>، تخمیر<sup>۱۵۷</sup> و متان‌زایی<sup>۱۵۸</sup>. هیدرولیز، بیومولکول‌های پیچیده موجود در زیست توده را به بیومولکول‌های ساده تجزیه می‌کند و تخمیر از مولکول‌های زیستی ساده برای ساخت الکل‌ها، اسید استیک، اسیدهای چرب فرار و مخلوط گاز هیدروژن و کربن دی‌اکسید استفاده می‌کند. متانوزن‌ها این مخلوط گاز را متابولیزه کرده و بیوگاز شامل متان (۶۰-۷۰٪) و کربن دی‌اکسید (۳۰-۴۰٪) تولید می‌کند. جدا از مواد مغذی اصلی موجود در زیست توده ریزجلبک‌ها (کربن، نیتروژن و فسفر)، عناصر کمیاب (مانند آهن، روی و کبالت) موجود در زیست توده نیز منجر به تشویق متان‌زایی می‌شوند. اگر دانش قبلی در مورد محتوای ترکیبات آلی موجود در زیست توده ریزجلبک صحت داشته باشد، می‌توان تولید نظری متان و آمونیاک از هضم بی‌هوازی را تخمین زد. اگرچه سرعت هیدرولیز در لیپیدها در مقایسه با کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها کندتر است، اما محتوای چربی بیشتر باعث بازده بالاتر متان می‌شود. حداقل مدت زمان هیدرولیز کافی ترکیبات زیستی برای هضم بی‌هوازی به ترتیب ۰.۱۸، ۰.۴۳ و ۳.۲ روز برای کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها محاسبه شده است.

### ➤ تخمیر الکلی<sup>۱۵۹</sup>

اتانول زیستی را می‌توان از طریق تخمیر الکلی باقیمانده‌های زیست توده حاوی قندهای قابل تخمیر که از سلولز و اجزای زیست توده در وجود مخمر یا باکتری تبدیل می‌شوند، به دست آورد. به عنوان مثال، گونه‌های ریزجلبک مانند کلرلا<sup>۱۶۰</sup>، کلامیدوموناس<sup>۱۶۱</sup>، سیندزمز<sup>۱۶۲</sup>، دونالیلا<sup>۱۶۳</sup> و اسپیرولینا<sup>۱۶۴</sup> گزارش شده‌اند که مقادیر زیادی نشاسته، گلیکوژن و سلولز را جمع‌آوری می‌کنند (بیش از ۵۰٪ در روز). این پلی ساکاریدهای پیچیده مواد خام موردنیاز برای تولید بیواتانول هستند. از آنجایی که میکروب‌ها در متابولیسم پلی ساکاریدها با مشکل مواجه می‌شوند، هیدرولیز برای تجزیه پلی ساکاریدها به قندهای ساده قبل از تغذیه انجام می‌شود. رایج‌ترین روش‌های هیدرولیز از اسید/قلیا و آنزیم‌ها استفاده می‌کنند. بهره‌گیری از اسید ارزان و سریع است، اما محیط اسیدی ممکن است قندها را به اشکال نامطلوب تغییر دهد. در مقابل، روش آنزیمی کارآمد

<sup>156</sup> Hydrolysis

<sup>157</sup> Fermentation

<sup>158</sup> Methanogenesis

<sup>159</sup> Alcoholic Fermentation

<sup>160</sup> Chlorella

<sup>161</sup> Chlamydomonas

<sup>162</sup> Scenedesmus

<sup>163</sup> Dunaliella

<sup>164</sup> Spirulina

است و محصولات جانبی نامطلوب تولید نمی‌کند، اما آنزیم‌ها گران و کندتر هستند. روش‌های ازهم‌گسیختگی سلولی<sup>۱۶۵</sup> را می‌توان قبل از هیدرولیز برای افزایش اثربخشی و کوتاه‌تر کردن مدت هیدرولیز انجام داد. الکل خام (۱۰ تا ۱۵ درصد اتانول) تولید شده باید با استفاده از تقطیر مرحله غلظت را طی کند. باقیمانده ضایعات جامد را می‌توان با استفاده از مایع سازی، گازی‌سازی یا تجزیه در اثر حرارت به کمک ماکروویو به محصولات ارزشمند تبدیل کرد. مهندسی ژنتیک سویه‌های ریزجلبک برای افزایش بازده متابولیت‌های ارزشمند یا تغییر به تولید متابولیت‌های متفاوت موردتحقیق قرار گرفته است. یکی از اهداف مهندسی ژنتیک، تبدیل مستقیم کربن دی‌اکسید به سوخت‌های زیستی با استفاده از فتوسنتز است، زیرا این مسیر انرژی را برای جمع‌آوری و تجزیه مولکول‌های زیستی موردنیاز برای ذخیره انرژی و ساختارهای سلولی صرف نمی‌کند.

### ➤ تولید هیدروژن فوتوبیولوژیکی<sup>۱۶۶</sup>

برخی از زیست‌توده‌ها مانند ریزجلبک‌ها توانایی طبیعی تولید گاز هیدروژن را در حضور نور دارند. در فتوسنتز، ریزجلبک‌ها مولکول‌های آب را به اکسیژن و یون هیدروژن تبدیل می‌کنند. سپس آنزیم‌های هیدروژناز<sup>۱۶۷</sup> یون هیدروژن را در شرایط بی‌هوازی به گاز هیدروژن تبدیل می‌کنند. اکسیژن آزاد شده در طول فتوسنتز به سرعت آنزیم‌های هیدروژناز را مهار می‌کند و آزاد شدن گاز هیدروژن را قطع می‌کند. این امر نشان می‌دهد که شرایط بی‌هوازی برای کشت ریزجلبک برای تولید گاز هیدروژن ضروری است. دو روش کلیدی برای استخراج گاز هیدروژن فتوسنتزی با استفاده از ریزجلبک‌ها وجود دارد. رویکرد اول تولید هم‌زمان گاز اکسیژن و هیدروژن در حضور نور است. الکترون‌های تولید شده از اکسیداسیون مولکول‌های آب توسط آنزیم‌های هیدروژناز برای تولید گاز هیدروژن استفاده می‌شود. از نظر تئوری، این روش بازده بالاتری نسبت به روش دوم دارد، اما تولید گاز هیدروژن به سرعت توسط تولید اکسیژن مهار می‌شود. رویکرد دوم استفاده از یک سیستم دوفازی است، که در آن فاز اول کشت ریزجلبک‌ها در شرایط عادی و فاز دوم ترویج تولید مداوم گاز هیدروژن در شرایط بی‌هوازی و فاقد گوگرد است. عدم حضور گوگرد باعث درگیر شدن ریزجلبک‌ها در حالت بقا می‌شود که در آن انرژی موردنیاز سلول‌ها از طریق آزادسازی گاز هیدروژن به دست می‌آید. در سیستم دوفازی، تولید گاز هیدروژن پس از ۶۰ ساعت کار شروع به کاهش می‌کند و حداکثر بازده تئوری گاز هیدروژن می‌تواند به ۱۹۸ کیلوگرم هیدروژن در هکتار در روز<sup>۱۶۸</sup> برسد.

<sup>165</sup> Cell Disruption

<sup>166</sup> Photobiological Hydrogen Production

<sup>167</sup> Hydrogenase

<sup>168</sup> kg ha<sup>-1</sup>·day<sup>-1</sup>

## ❖ تبادل استری ۱۶۹

استفاده از زیست توده بالقوه مانند زیست توده سلولزی برای تولید سوخت زیستی پیچیده‌تر است زیرا خواص و عملکرد روغن استخراج‌شده باید متناسب با خواص سوخت‌های مبتنی بر هیدروکربن تنظیم شود. چالش اصلی در تبدیل روغن و چربی‌های به‌دست‌آمده از این زیست‌توده‌ها به سوخت‌های زیستی مناسب به‌منظور استفاده مؤثر به عنوان جایگزینی برای سوخت معمولی است. سوخت‌های زیستی به‌دست‌آمده از زیست توده مانند مواد لیگنوسلولزی اغلب دارای ویژگی‌های ویسکوزیته بالا، ماندگاری<sup>۱۷۰</sup> کم و ویژگی‌های چندتایی اشباع نشده<sup>۱۷۱</sup> هستند. این مسائل را می‌توان از طریق چندین روش پیش‌تصفیه حل کرد، که بهترین آن روش ترانس استریفیکاسیون است. ترانس استریفیکاسیون واکنشی است که در آن چربی‌ها و روغن‌ها در حضور کاتالیزورها به استرها<sup>۱۷۲</sup> و گلیسرول<sup>۱۷۳</sup> تبدیل می‌شوند. ویژگی‌های فیزیکی متیل استر اسید چرب<sup>۱۷۴</sup> تولید شده با سوخت تجاری نفت قابل مقایسه است و محصول فرعی گلیسرول نیز ارزش تجاری دارد.

## ❖ کاتالیز اسید/باز و آنزیم ۱۷۵

به‌طور کلی، سه گروه از کاتالیزورها برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرند: اسید، باز و آنزیم. کاتالیزورهای آنزیمی سازگارتر با محیط‌زیست هستند و می‌توانند محصولات با کیفیت بالا تولید کنند، اما سرعت واکنش آهسته و هزینه بالای آن نیاز به توسعه بیشتر دارد. بیودیزل معمولاً با استفاده از روش دوم مرحله‌ای استریفیکاسیون-ترانس استریفیکاسیون تولید می‌شود. در تولید بیودیزل که برای موتورهای احتراق داخلی معمولی مناسب است، محتوای گرانول‌های لیپیدی باید به یک نوع ویسکوزیته کمتر تغییر یابد. این کار معمولاً از طریق ترانس استریفیکاسیون تری گلیسرول‌ها برای تولید آلکیل استرهای اسید چرب انجام می‌شود. کاتالیزور ترانس استریفیکاسیون ممکن است یک لیپاز یا یک ماده شیمیایی مانند اسید یا باز باشد. با توجه به مصرف انرژی بالا، حجم زیادی از نمک و آب موردنیاز و الزامات فرآیند ترانس استریفیکاسیون مرسوم، توسعه یک ترانس استریفیکاسیون آنزیمی، که توسط لیپازهای درون‌سلولی یا خارج سلولی کاتالیز می‌شود، توصیه شده است. بسیاری از استراتژی‌ها که شامل مهندسی پروتئین، تثبیت آنزیم و کاتالیزور کل سلولی می‌شوند را می‌توان برای بهبود عملکرد کاتالیزور آنزیمی استفاده کرد. کاتالیزور آنزیمی قادر است در محیط ملایم‌تر، با مصرف انرژی کمتر کار کند و می‌تواند نیاز به مرحله جداسازی پس از ترانس استری را کاهش دهد. کاتالیزورهای آنزیمی قادر به جلوگیری از صابونی‌شدن هستند و تنها به مراحل

<sup>169</sup> Transesterification

<sup>170</sup> Vitality

<sup>171</sup> Polyunsaturated

<sup>172</sup> Esters

<sup>173</sup> Glycerol

<sup>174</sup> Fatty Acid Methyl Ester (FAME)

<sup>175</sup> Acid/base and enzyme catalysis

خالص‌سازی ساده نیاز دارند، با این وجود، سرعت واکنش کند است و مقرون به صرفه نیست. آنزیم‌های مورد استفاده به عنوان کاتالیزور نیز در برابر الکل و دما حساس هستند که همین امر می‌تواند منجر به غیرفعال شدن آن و متعاقباً کاهش بازده بیودیزل شود. در یک مطالعه اخیر، یک فرآیند تک‌مرحله‌ای روش ترانس استری‌سازی مستقیم با استفاده متوالی از کاتالیز اسید-باز برای تولید بیودیزل از نفت خام پوگامیا پیناتا<sup>۱۷۶</sup> توسعه داده شد و این فرآیند با دومرحله‌ای محافظه‌کارانه استری‌سازی-ترانس استری‌سازی ارزیابی شد. روش ترانس استریفیکاسیون مستقیم از ترکیب متانول و متوکسید سدیم به عنوان کاتالیزور پایه و تری فلوراید بور به عنوان کاتالیزور اسیدی استفاده می‌کند. زمان تولید فرآیند ترانس استریفیکاسیون مستقیم ۱.۵ برابر کاهش یافت تا محصول نهایی بیودیزل به دست آید. گزارش شد که تفاوت معنی‌داری بین کیفیت سوخت تولید شده از هر دو روش استریفیکاسیون-ترانس استریفیکاسیون و ترانس استریفیکاسیون مستقیم مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که روش ترانس استریفیکاسیون مستقیم روشی بسیار امیدوارکننده است که می‌تواند زمان پردازش و حلال موردنیاز را کاهش دهد و برای سایر مواد اولیه غیرخوراکی نیز اعمال شود. تحقیقات اخیر اجرای تولید سوخت زیستی پیشرفته بر اساس صنعتی‌سازی سریع و کم‌خطر فرآیندهای نانو کاتالیزوری را مورد بررسی قرار داده است. بیوکاتالیست‌های سبز جدید برای کاهش زمان واکنش و هزینه در مقایسه با استفاده از کاتالیزورهای موجود در حال توسعه هستند. یک مثال کاتالیزور ناهمگن است که سازگار با محیط‌زیست و قابل بازیافت است. این کاتالیزورها قادر به تولید بازدهی بالا بیودیزل هستند و می‌توانند به راحتی از مایع جدا شوند، جدا از اینکه عمر طولانی دارند.

### ❖ روش سیال فوق بحرانی<sup>۱۷۷</sup>

استخراج سیال فوق بحرانی<sup>۱۷۸</sup> یک فرآیند استخراج است که از دی‌اکسید کربن فوق بحرانی (SC-CO<sub>2</sub>) به عنوان حلال استفاده می‌کند. تکنیک استخراج SC-CO<sub>2</sub> یک ابزار ارزشمند برای افزایش عملکرد و مشخصات انتخابی در استخراج ترکیبات آلی از گیاهان است. استخراج سیال فوق بحرانی در مقایسه با روش‌های استخراج معمولی مزایای کمی دارد که شامل انتخاب پذیری بالاتر، زمان پردازش کوتاه‌تر و استفاده از حلال‌های غیر سمی است. از آنجایی که کربن دی‌اکسید یک گاز در دما و فشار اتاق است، این تکنیک برخلاف فرآیندهای استخراج معمولی که نیاز به جداسازی حلال‌ها دارد که باعث تخریب ترکیبات موردنظر می‌شود، نیازی به مراحل پردازش بیشتری برای جداسازی حلال ندارد. حلال‌های فوق بحرانی دیگری که می‌توان استفاده کرد عبارت‌اند از متانول، اتانول، پروپانول، استون، متیل استات و دی‌متیل کربنات. هنگامی که این حلال‌ها به حالت فوق بحرانی می‌رسند، پیوندهای هیدروژنی موجود در حلال‌ها به شدت کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش قطبیت و ثابت دی‌الکتریک می‌شود که به مولکول‌های حلال اجازه می‌دهد تا به عنوان مونومر آزاد<sup>۱۷۹</sup> عمل کنند. با

<sup>176</sup> Pongamia Pinnata

<sup>177</sup> Supercritical Fluid Method

<sup>178</sup> Supercritical Fluid Extraction (SFE)

<sup>179</sup> Free Monomers

توجه به این پدیده، حلال‌های فوق بحرانی می‌توانند تری گلیسییریدهای غیر قطبی را در یک فاز مایع همگن حل کنند تا متیل استر اسید چرب و دی گلیسرید تولید شود.

## ❖ جایگاه تبدیل زیست توده به انرژی الکتریکی در جهان

جدای از تولید سوخت زیستی، انرژی زیستی به شکل برق زیستی که می‌تواند از مواد اولیه تجدیدپذیر تأمین شود، بخشی از طیف فناوری‌های انرژی است. تبدیل مناطق کشاورزی و جنگلی به مواد اولیه زیست توده برای تولید برق و گرمایش منطقه‌ای به عنوان یک شکل بالقوه از انرژی زیستی در حال توسعه است. برق زیستی را می‌توان عمدتاً از طریق احتراق مواد اولیه لیگنوسلولزی که از منابع زیست توده مانند محصولات کشاورزی و بقایای گیاهی، جنگل‌های مزرعه، بقایای کارخانه‌های چوب‌بری و جنگل‌های بومی به دست می‌آید تولید کرد.

- تولید برق از سیستم‌های فعلی جنگلداری و تولیدات کشاورزی در حدود ۱۵ درصد از کل تولید برق در کشور استرالیا را شامل می‌شود که ارتقاء به فناوری‌های نسل اول می‌تواند تولید برق را ۹ درصد افزایش دهد. سیستم‌های تولید انرژی همچنین قادر به کاهش تقریباً ۲۸ درصد از انتشار الکتريسيته و ۹ درصد از انتشار ملی بودند که تأثیر زیادی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد.

- مدل اقتصادی دیگری برای بررسی چشم‌انداز ترکیب بخش‌های کشاورزی و جنگل در ایالات متحده برای افزایش تولید برق زیستی تجدیدپذیر با استفاده از استانداردهای شبیه‌سازی شده استفاده شد. این مدل گزارش داد که بخش‌های کشاورزی و جنگل ظرفیت تأمین ۱۰ تا ۲۰ درصد از مصرف برق آینده در ایالات متحده را دارند، جایی که اکثر مواد اولیه زیست توده از طریق محصولات انرژی‌زا و بقایای محصولات به دست می‌آیند. این مدل همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را حدود ۲۷ میلیون تن کربن دی‌اکسید در یک دوره ۱۵ ساله برآورد کرد.

- علاوه بر این، چشم‌انداز بهره‌گیری از بقایای گیاهی در تولید بیوالکتريسيته در چین نیز نقش مهمی در تشویق جهانی انرژی زیستی ایفا می‌کند. هدف ظرفیت برق زیست توده ۳۰۰۰۰ گیگاوات تا سال ۲۰۲۰ در چین تعیین شد. این امر امکان استفاده کارآمدتر از منابع زیست توده کشاورزی چین را برای تولید برق فراهم می‌کند.

- مطالعه موردی دیگری در مورد پتانسیل عرضه انرژی زیستی در آمستردام، هلند گزارش داد که عرضه انرژی زیستی انعطاف‌پذیر از جریان زباله شهری می‌تواند انرژی تجدیدپذیر را در شهرها تولید کند. یک مدل سیستم برق شهری برای پیش‌بینی تولید برق در آینده توسعه داده شد و کشف شد که در سناریوهای مختلف به حدود ۱۳۰۰-۲۸۰۰ تن زیست توده زباله در روز نیاز است. میانگین زباله روزانه تولید شده در شهر آمستردام حدود ۱۴۰۰ تن است و این امر در معرض تغییر است زیرا تولید زباله متناسب با شهرنشینی و رشد اقتصادی افزایش می‌یابد. این تحلیل‌ها نقش مهمی در حمایت

از سیاست‌گذاری در تولید انرژی زیستی بالقوه از زیست توده در دسترس محلی برای کمک به یک سیستم برق پایدار بازی می‌کنند.

برق زیستی را می‌توان از طریق روش‌هایی تولید کرد که به طور مشابه در سایر تولیدات بیوانرژی استفاده می‌شود، مانند تبدیل ترموشیمیایی. بهبود در انواع مختلف پره‌های توربین یا حالت عملکرد توربین بخار (توربین‌های رفت و برگشتی<sup>۱۸۰</sup> یا پیچی<sup>۱۸۱</sup>) می‌تواند برای بهبود راندمان برق تولید شده انجام شود.

یکی دیگر از فرآیندهای تولید برق زیستی از طریق گازی سازی زیست توده است. مزیت استفاده از گازی‌سازها این است که می‌توان از آن در مناطق روستایی با ضایعات زیست توده محلی استفاده نمود، بنابراین این امکان را فراهم می‌سازد که مسائل مربوط به تأمین برق مناطق روستایی را برطرف نماید. ادغام دیگ‌های بخار احتراق با گازی‌سازها بازده الکتریکی را تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد.

یک فناوری امیدوارکننده اخیر برای تبدیل زیست توده به برق، استفاده از پیل سوختی میکروبی<sup>۱۸۲</sup> است. فناوری پیل سوختی میکروبی شامل تولید بیوالکتریسیت از طریق تبدیل بسترهای آلی<sup>۱۸۳</sup> توسط باکتری‌های الکتروژن<sup>۱۸۴</sup> در شرایط بی‌هوازی است. این پیل سوختی از دو محفظه با آند زیستی<sup>۱۸۵</sup> و کاتد غیر زیستی<sup>۱۸۶</sup> تشکیل شده است که توسط یک غشای تبادل پروتون از هم جدا می‌شوند. MFC می‌تواند به طور هم‌زمان زباله‌های مختلف (ضایعات مواد غذایی، ضایعات مواد غذایی خانگی و زباله‌های جامد شهری) را درحالی‌که برق تولید می‌کند، تصفیه نماید. این فناوری منبع جدیدی از فرآیند انرژی تجدید پذیر است. جریان و چگالی برق تولید شده از طریق MFC را می‌توان با شرایط عملیاتی، از جمله دما، غلظت بستر، pH، نرخ بارگذاری، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، زمان ماند هیدرولیکی و میدان مغناطیسی ساکن تغییر داد. علاوه بر این، بسیاری از پارامترهای مربوط به مواد الکترود، معماری، اثربخشی هزینه و همچنین ویژگی‌های غشا برای ارزیابی بهبود تولید برق MFC مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از الکترود Ti-TiO<sub>2</sub> حدود ۴ برابر چگالی توان بالاتری نسبت به الکترود پلاتین نشان داد. همچنین، استفاده از زیست توده باقیمانده مواد غذایی به عنوان یک بستر در فرآیند MFC به بالاترین چگالی برق نیز دست یافت، که نشان می‌دهد هیدرولیز زیست توده باقی‌مانده مواد غذایی می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد MFC را افزایش دهد. MFC پتانسیل زیادی را به عنوان یک فرآیند سبز و پایدار نشان می‌دهد. اجرای آن می‌تواند بینش جدیدی برای تولید برق زیستی ارائه دهد.

<sup>180</sup> Reciprocating Turbines

<sup>181</sup> Screw-Type Turbines

<sup>182</sup> Microbial Fuel Cell(MFC)

<sup>183</sup> Organic Substrates

<sup>184</sup> Electrogenic Bacteria

<sup>185</sup> Biotic Anode

<sup>186</sup> Abiotic Cathode

## ❖ چالش فعلی و چشم‌اندازهای آینده

بررسی حاضر نشان می‌دهد که بسیاری از مسیرهای فن‌آوری زباله به انرژی زیستی برای تولید انرژی زیستی از مواد اولیه زباله در دسترس هستند. ظاهراً استفاده از زباله، با مزیت مکمل آن در پاک‌سازی محیط، اقتصادی‌ترین فرآیند برای تولید انرژی تجدیدپذیر است. مقادیر قابل توجهی از بقایای زیست توده و ضایعات به‌ناچار از بخش‌های مختلف در سراسر جهان تولید می‌شوند و در صورت توسعه فناوری‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه، این زباله‌ها می‌تواند منبعی امیدوارکننده برای انرژی زیستی باشند. با این حال، محدودیت‌های متعددی برای توسعه پسماندهای زیست توده و زباله به عنوان یک منبع انرژی فوری وجود دارد. اول از همه، تولید زباله به انرژی زیستی هنوز به‌اندازه سوخت‌های فسیلی، بر اساس فناوری‌های فعلی توسعه‌یافته، مقرون‌به‌صرفه نیست. یک مطالعه امکان‌سنجی انجام شده نشان داد که استفاده از زباله‌های جامد شهری برای تولید انرژی زیستی به دلیل هزینه بالای فناوری‌های سوزاندن، گازی‌سازی و تجزیه در اثر حرارت، از نظر اقتصادی سودآور نیست. در مطالعات تحلیلی دیگر در خصوص زباله به انرژی زیستی برای زباله‌های جامد شهری، گازی‌سازی هزینه عملیاتی نسبتاً بالایی دارد. بنابراین، بهینه‌سازی فرآیند امروزه تمرکز تحقیقاتی برای افزایش بازده تولید و کارایی فرآیند است.

اجرای رویکرد زباله به انرژی زیستی باید با کاهش میزان زباله‌هایی که باید دفن شوند، به بهبود محیط‌زیست کمک کند. با این حال، پردازش زباله به انرژی زیستی ممکن است منجر به انتشار محصولات جانبی نامطلوب و مضر در جو شود. به عنوان مثال، انتشار مواد آلی کمیاب مانند فوران‌ها<sup>۱۸۷</sup>، دیوکسین‌های پلی کلره<sup>۱۸۸</sup>، سرب، جیوه و کادمیوم را می‌توان به طراحی ناکافی و یا عملکرد ضعیف سیستم‌های احتراق زباله‌های جامد شهری برای تولید برق نسبت داد. عناصر فرار مانند جیوه ممکن است در طول فرآیند احتراق زباله‌های جامد شهری تبخیر شوند و ممکن است نتوانند به طور مؤثر با استفاده از دستگاه حذف ذرات حذف شوند. انتشار گازهای خطرناک باید هنگام انتخاب فناوری زباله به انرژی زیستی در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، یک زباله‌سوز معمولاً در مقایسه با هضم بی‌هوازی، مقادیر بیشتری آلاینده تولید می‌کند. هضم بی‌هوازی می‌تواند یک انتخاب بهینه برای تبدیل زباله‌های جامد شهری که حاوی رطوبت بالایی است، باشد. در نهایت، طبقه‌بندی مناسب زباله‌ها به همان اندازه برای اطمینان از راندمان بازیافت انرژی بالاتر در تولید برق و به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی مهم است.

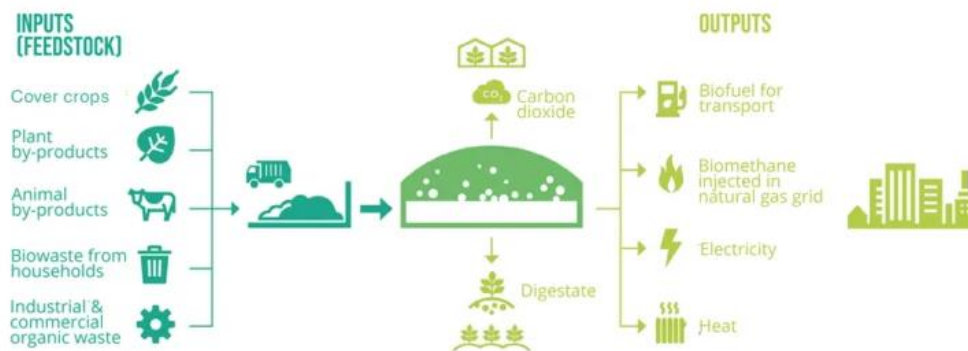
منبع :

Lee, S.Y., Sankaran, R., Chew, K.W. *et al.* Waste to bioenergy: a review on the recent conversion technologies. *BMC Energy* 1, 4 (2019)

<sup>187</sup> Furans

<sup>188</sup> Polychlorinated Dioxins

## بیوگاز و بیومتان، منبع ارزشمند انرژی پاک



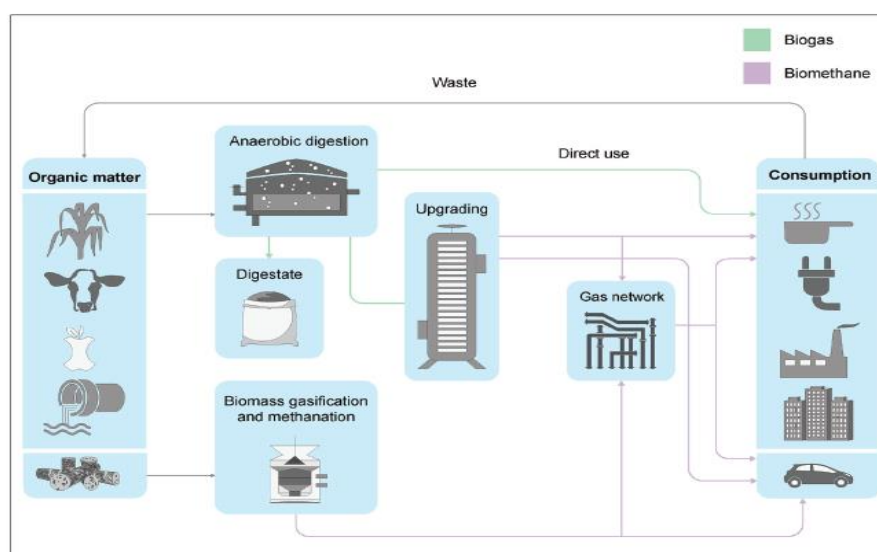
تولید بیوگاز و بیومتان در تقاطع دو چالش بحرانی زندگی امروزی قرار دارد: مقابله با افزایش ضایعات و پسماندهای آلی که توسط جوامع و اقتصادهای مدرن تولید می‌شوند، و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای<sup>۱۸۹</sup>. تبدیل پسماندهای آلی به منابع تجدیدپذیر انرژی (بیوگاز یا بیومتان) دنیایی را به تصویر می‌کشد که در آن منابع به‌طور پیوسته استفاده و بازیافت می‌شوند، و در عین حال که تقاضای فزاینده برای خدمات انرژی تأمین می‌شود؛ فواید زیست‌محیطی فراوانی نیز حاصل می‌شود. بیوگاز می‌تواند یک منبع ارزشمند محلی برای تأمین توان و حرارت باشد؛ در عین حال که می‌تواند سوختی تمیز برای پخت‌وپز باشد و از این رو می‌تواند وابستگی به استفاده متداول از زیست‌توده جامد در بسیاری از کشورهای در حال توسعه را کاهش دهد. علاوه بر این، تولید بیوگاز می‌تواند به لحاظ افزایش بهره‌وری کشاورزی و کاهش جنگل‌زدایی نیز منافی دربر داشته باشد؛ چراکه می‌توان از پسماند هضم‌شده به عنوان کود استفاده کرد. بیومتان (گاز طبیعی تجدیدپذیر) در صورت ارتقاء از گاز طبیعی قابل افتراق نیست و لذا می‌تواند به طریق مشابه انتقال یابد و استفاده شود. بیومتان ضمن اینکه یک سوخت کربن-خنثی محسوب می‌شود می‌تواند مزایای گاز طبیعی را به همراه داشته باشد. بیوگاز و بیومتان می‌توانند تمام زوایای سناریوی توسعه پایدار آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۱۹۰</sup> را که در تطابق کامل با توافق‌نامه پاریس برای حفظ افزایش گرمایش جهانی تا زیر ۲ درجه سانتی‌گراد است، حمایت کنند و دستیابی به اهداف مرتبط با تأمین انرژی و هوای پاک را میسر سازند.

<sup>189</sup> Greenhouse Gases (GHGs)

<sup>190</sup> International Energy Agency Sustainable Development Scenario (IEA SDS)

## ❖ تبدیل پسماندهای آلی به منبع ارزشمند انرژی پاک

جوامع و اقتصادهای مدرن، منابع فزاینده‌ای از ضایعات آلی را تولید می‌کنند که می‌تواند برای تولید منابع انرژی پاک استفاده شود، درحالی‌که مزایای بالقوه متعددی برای توسعه پایدار به همراه دارد. بیوگاز و بیومتان محصولات متفاوتی با کاربردهای متفاوت می‌باشند، ولی هر دو از طیفی از مواد اولیه آلی نشأت می‌گیرند. تولید و استفاده از این گازها، ایده اقتصاد چرخشی را مجسم می‌کند؛ منافع حاصل از کاهش انتشار، بهبود مدیریت پسماند، و بهره‌وری بیشتر منابع. بیوگاز و بیومتان همچنین راهی برای پیوند جوامع روستایی و صنایع با ایجاد تحول در بخش انرژی فراهم می‌کنند.

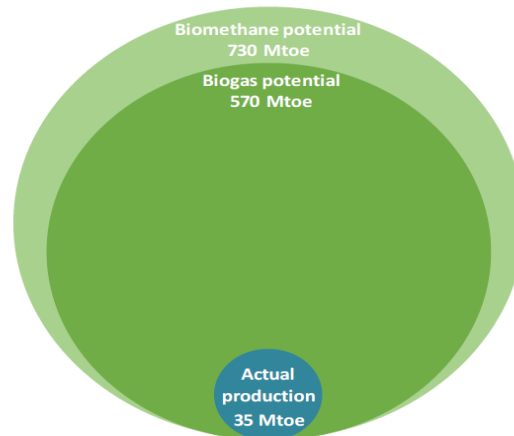


مسیرهای تولید بیوگاز و بیومتان

## ❖ طیف وسیع مواد اولیه برای تولید پایدار بیوگاز و بیومتان و استفاده محدود از این منابع در حال حاضر

مطالعه و بررسی دقیق برای دستیابی به مواد اولیه پایدار در جهان جهت تولید بیوگاز و بیومتان نشان می‌دهد که منابع برای تولید این گازها بسیار زیاد است، ولی تا حد زیادی استفاده نشده است. این منابع اولیه شامل ضایعات کشاورزی، پسماند حیوانی، پسماندهای جامد شهری، فاضلاب، و بقایای جنگلداری (برای تولید مستقیم بیومتان از طریق گازی سازی) است. لازم به ذکر است این ارزیابی تنها منابعی را که با غذا و زمین کشاورزی در رقابت نیستند، مورد توجه قرار داده است. تولید بیوگاز و بیومتان در سال ۲۰۱۸، در حدود ۳۵ میلیون تن معادل نفت<sup>۱۹۱</sup> بود (معادل یک تن نفت نوعی یکای انرژی و برابر با میزان انرژی آزاد شده از سوختن یک تن نفت خام است) که تنها جزئی از پتانسیل کلی برآورد شده می‌باشد. استفاده کامل از پتانسیل موجود، می‌تواند حدود ۲۰٪ نیاز فعلی جهان به گاز را تأمین کند (این آمار مربوط به سال ۲۰۲۰ می‌باشد).

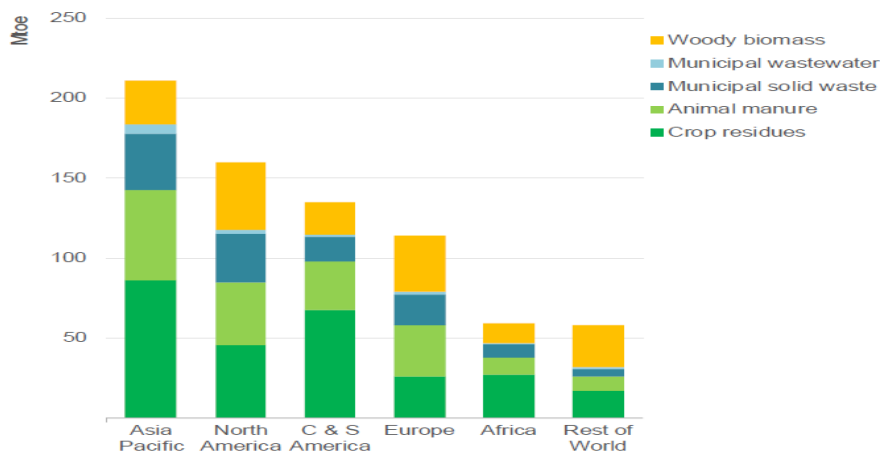
<sup>191</sup> Million tones of oil equivalent (Mtoe)



میزان تولید بیوگاز و بیومتان در سال ۲۰۱۸ در مقابل پتانسیل پایدار موجود

### ❖ توزیع گسترده امکان تولید بیوگاز و بیومتان در جهان

تمام نقاط جهان منابع قابل توجهی برای تولید بیوگاز و بیومتان دارند و دستیابی به مواد اولیه پایدار برای این اهداف تا سال ۲۰۴۰، ۴۰٪ رشد خواهد داشت. بزرگ‌ترین فرصت‌ها مربوط به منطقه آسیا و اقیانوسیه است، جایی که مصرف و واردات گاز طبیعی در سال‌های اخیر به سرعت رشد کرده است. در شمال و جنوب آمریکا، اروپا و آفریقا نیز فرصت‌های قابل توجهی وجود دارد. با توجه به افزایش دسترسی به مواد اولیه متنوع در اقتصاد بزرگ‌تر جهانی، ارتقای سیستم‌های مدیریت ضایعات، و مجموعه برنامه‌های مدون در بسیاری از نقاط جهان، انتظار می‌رود که پتانسیل نهایی تولید بیوگاز و بیومتان در جهان در طی دو دهه آینده به سرعت افزایش یابد.



Notes: C&S America = Central and South America. Woody biomass feedstocks are available only for biomethane production.

پتانسیل تولید بیوگاز یا بیومتان از منابع مختلف در جهان، ۲۰۱۸

## ❖ بیوگاز؛ منبع محلی تولید توان و حرارت، و یک سوخت تمیز برای پخت‌وپز در بخش خانگی

بیوگاز مخلوطی از متان، CO<sub>2</sub> و مقادیر اندکی از گازهای دیگر است که می‌تواند برای تولید توان، تأمین حرارت و برای پخت‌وپز استفاده شود. استفاده و رقابت‌پذیری آن به شرایط محلی وابسته است، ولی به‌طور معمول استفاده از بیوگاز یک روش پایدار برای تأمین نیاز انرژی به‌خصوص در جاهایی است که دسترسی به شبکه‌های محلی با دشواری همراه بوده یا گرمایش زیادی موردنیاز است که با برق تجدیدپذیر امکان تأمین آن وجود ندارد. در کشورهای در حال توسعه، بیوگاز وابستگی به زیست‌توده جامد برای پخت‌وپز را کاهش می‌دهد و سلامت و پیامدهای اقتصادی را بهبود می‌بخشد. در سناریوی توسعه پایدار، بیوگاز تا سال ۲۰۴۰ یک منبع پاک پخت‌وپز برای بیش از ۲۰۰ میلیون نفر را که نیمی از آن‌ها در آفریقا می‌باشند، فراهم خواهد کرد. بیوگاز همچنین می‌تواند ارتقا یابد تا با حذف CO<sub>2</sub> و دیگر ناخالصی‌ها، بیومتان تولید شود.

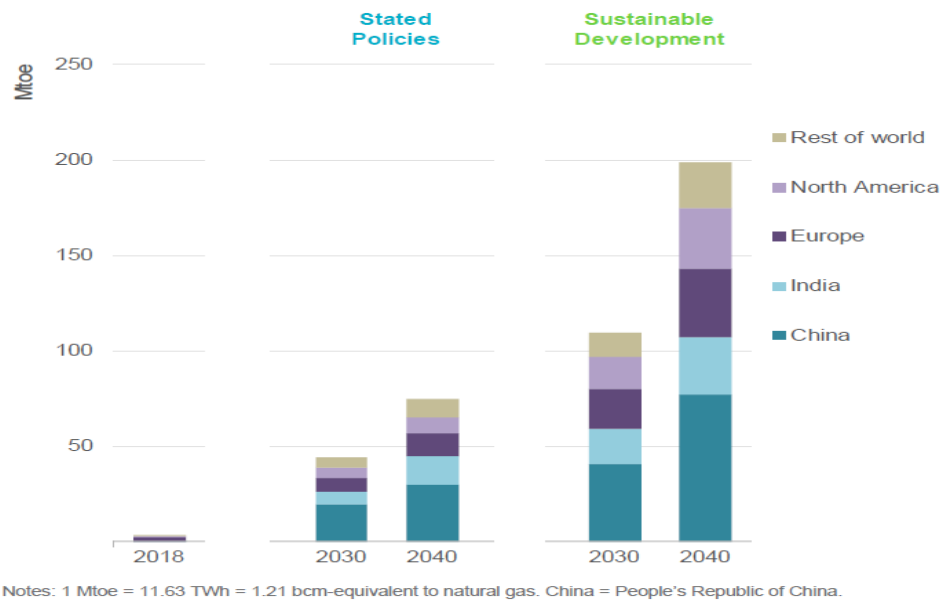


چشم‌انداز مصرف جهانی بیوگاز در بخش‌های مختلف مطابق دو سناریوی توسعه پایدار و سیاست‌های اعلام‌شده سازمان بین‌المللی انرژی

## ❖ بیومتان، دارای مزایای گاز طبیعی بدون انتشار آلاینده‌های مرتبط

بیومتان، منبع تقریباً خالص متان است که یا از طریق ارتقای بیوگاز و یا از طریق گازی‌سازی زیست‌توده جامد تولید می‌شود و از آنجاکه از جریان گاز طبیعی قابل افتراق نیست، می‌تواند مانند گاز طبیعی منتقل شده و استفاده شود، بدون این‌که منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای شود. بیومتان در سناریوهای سازمان بین‌المللی انرژی به سرعت رشد می‌کند. بیومتان امکان کاهش انتشار در بخش‌هایی که کاهش انتشار آن‌ها دشوار است (نظیر صنایع سنگین و حمل‌ونقل بار) را فراهم می‌کند. علاوه‌براین، استفاده از بیومتان کمک می‌کند تا برخی زیرساخت‌های شبکه گازی موجود با انتشار کمتر آلاینده‌ها در آینده،

سازگار شوند. لذا مقرون به صرفه بودن و امنیت انتقال انرژی را در بسیاری از نقاط دنیا، بهبود می بخشد. در سناریوی توسعه پایدار، بیومتان در سال ۲۰۴۰ از تولید ۱۰۰۰ میلیون تن (Mt) از گازهای گلخانه‌ای، ممانعت می کند. این کاهش شامل انتشار CO<sub>2</sub> در صورت استفاده از گاز طبیعی، و همچنین انتشار متان در نتیجه تجزیه مواد اولیه، می شود.



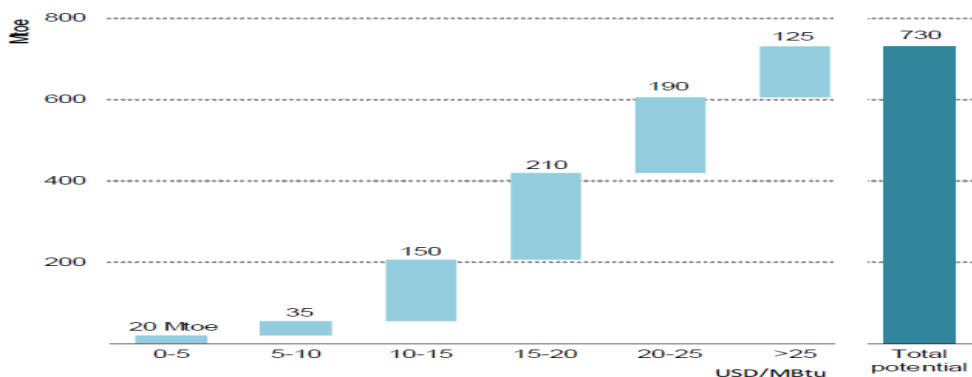
چشم‌انداز مصرف جهانی بیومتان در مناطق مختلف مطابق دو سناریوی توسعه پایدار و سیاست‌های اعلام شده سازمان بین‌المللی انرژی

## ❖ بیشتر منابع بیومتان گران‌تر از گاز طبیعی است، ولی این شکاف هزینه در طی زمان کاهش می‌یابد

به استثنای گاز لندفیل، بیشتر منابع بیومتان در مناطق مختلف از گاز طبیعی گران‌تر است. در حال حاضر متوسط قیمت تولید بیومتان در حدود ۱۹ دلار امریکا به ازای یک میلیون Btu<sup>۱۹۲</sup> می‌باشد. لکن، برآورد می‌شود که در حدود ۳۰ Mtoe (معادل ۴۰ بلیون مترمکعب) بیومتان - بیشتر گاز لندفیل - می‌تواند به قیمتی کمتر از قیمت محلی گاز طبیعی تولید شود، که این حجم ۱۰ برابر بیشتر از کل مصرف بیومتان در حال حاضر می‌باشد.

شکاف قیمت با بهبود فناوری‌های تولید بیومتان در طی زمان و قیمت‌گذاری کربن در برخی مناطق که سبب گران شدن گاز طبیعی می‌شود، کاهش می‌یابد. درک ارزش کاهش انتشار CO<sub>2</sub> و متان، راهی طولانی به سمت بهبود رقابت‌پذیری هزینه‌ای بیومتان در پیش دارد.

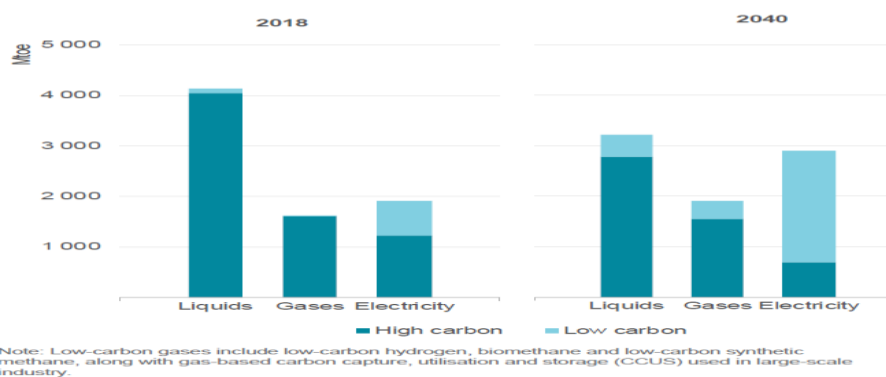
<sup>192</sup> million British thermal units (MBtu)



محدوده‌های قیمتی برای توسعه پتانسیل جهانی تولید بیومتان در حال حاضر

## ❖ ضرورت استفاده از گازهای کم‌کربن (بیومتان و بیهیدروژن) در گذار انرژی و نیاز به سیاست‌های حمایتی برای هموار کردن مسیر بهره‌برداری از آنها

سخت‌ها و فناوری‌های متعددی برای شتاب بخشیدن به روند گذار انرژی موردنیاز هستند و گازهای کم‌کربن (بیومتان و هیدروژن کم‌کربن) نقش اساسی در این روند ایفا می‌کنند. بیومتان بزرگ‌ترین سهم در تأمین گاز کم‌کربن در افق زمانی سناریوهای چشم‌انداز جهانی انرژی<sup>۱۹۳</sup> را داراست. چگونگی تکامل صنایع تولیدکننده بیوگاز و بیومتان براساس وابستگی کشورها به تمرکز حوزه‌ای، میزان دسترسی به مواد اولیه، شرایط بازار، و اولویت‌های سیاست‌گذاری، تغییر می‌کند. ولی در همه حالت‌ها، درک مزایای متعدد بیوگاز و بیومتان نیازمند سیاست‌گذاری‌های هماهنگ در خصوص انرژی، حمل‌ونقل، کشاورزی، محیط‌زیست، و مدیریت پسماند، می‌باشد.

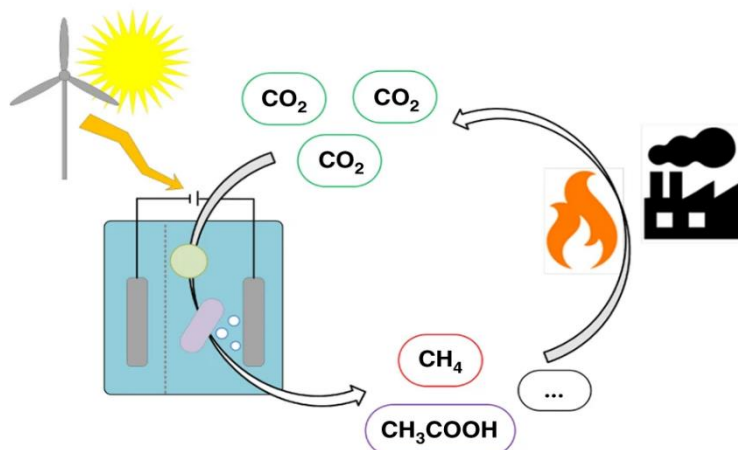


مصرف نهایی انرژی توسط حامل‌های مختلف در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۴۰ در سناریوی توسعه پایدار

منبع: Outlook for biogas and biomethane- IEA 2020

<sup>193</sup> World Energy Outlook (WEO)

## تولید بیوالکتروشیمیایی متان (BEP2G)<sup>۱۹۴</sup>



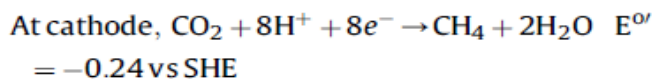
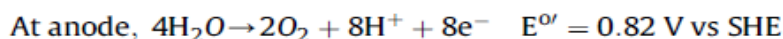
تغییرات اقلیم نیاز به جایگزینی سوخت‌های فسیلی و گاز طبیعی را با منابع تجدیدپذیر انرژی در کانون توجه قرار داده است. سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی یک فناوری در حال رشد برای تصفیه پساب و تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی است. علاوه بر تولید انرژی الکتریکی، این سیستم‌ها کاربردهای دیگری نظیر پالایش بیوالکتروشیمیایی آلاینده‌های آلی مقاوم و آلاینده‌های معدنی را نیز دارند. با این قبیل واکنش‌ها، دی‌اکسید کربن/مواد آلی و جریان الکتریکی به ترکیبات آلی گوناگونی چون سوکسینات، هیدروژن، استات، اتانول، بوتیرات و ... تبدیل می‌شوند. یک مسیر جدید و قابل توجه در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی، تولید متان از طریق تبدیل میکروبی دی‌اکسید کربن و مازاد انرژی الکتریکی است که در ادامه به این فناوری پرداخته شده است.

### ❖ تبدیل بیوالکتروشیمیایی برق به گاز (متان)

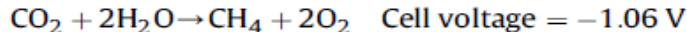
متان یک حامل انرژی سودمند است که در مقایسه با هیدروژن، مشکلات مربوط به ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل را ندارد. متان در طی تبدیل زیستی مستقیم  $CO_2$ ، با استفاده از آند و کاتد زیستی تولید می‌شود. تبدیل بیوالکتروشیمیایی برق به گاز (متان) یک فناوری مدرن برای ذخیره مازاد الکتریسیته تجدیدپذیر به شکل گاز متان است. در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی تولید

<sup>194</sup> Bioelectrochemical Power to Gas

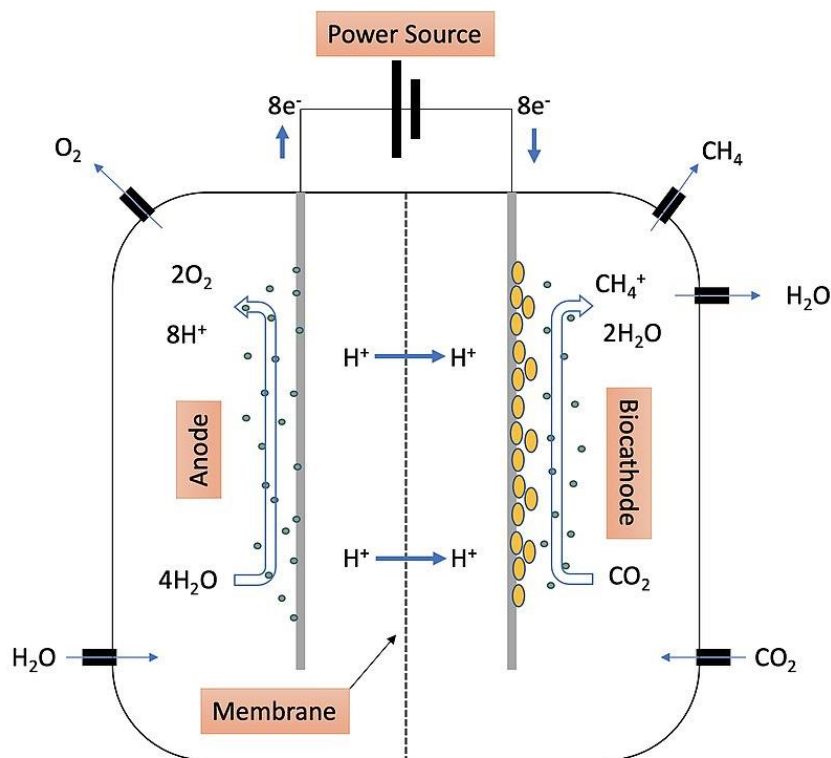
متان، دی‌اکسیدکربن و انرژی الکتریکی با استفاده از الکترودهایی که الکترون یا هیدروژن موردنیاز میکروارگانسیم‌های متانوژنیک را تأمین می‌کنند، به گاز متان تبدیل می‌شوند. این فناوری امکان ذخیره مازاد انرژی الکتریکی تولیدشده از منابع تجدیدپذیر را فراهم می‌سازد. سیستم‌های تبدیل بیوالکتروشیمیایی برق به گاز شامل بخش‌های مختلفی می‌باشد: محفظه آندی که واکنش‌های اکسیداسیون در آن انجام می‌شود، محفظه کاتدی که در آن گاز متان به کمک میکروارگانسیم‌ها تولید می‌شود، و یک جداکننده به شکل غشاء تبادل کاتیونی. به‌طور معمول، سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی تولید متان، اکسیداسیون آب را به احیای میکروبی دی‌اکسیدکربن پیوند می‌زنند؛ واکنشی که برای انجام آن منبع خارجی انرژی الکتریکی موردنیاز است. نیمه‌واکنش‌های احیای بیوالکتروشیمیایی CO<sub>2</sub> به متان در سیستم‌های بیوالکتروشیمیایی به‌صورت زیر است:



The overall reactions is



تبدیل بیوالکتروشیمیایی برق به گاز (متان) در مقایسه با فناوری‌های توسعه‌یافته تبدیل برق به گاز، که از هیدروژن حاصل از الکترولیز همراه با دی‌اکسیدکربن برای تولید متان استفاده می‌کنند، مزایایی دارد: (۱) تولید بیوالکتروشیمیایی متان یک فرآیند یک مرحله‌ای است و مرحله جداگانه‌ای برای الکترولیز و تولید هیدروژن نیاز نمی‌باشد، (۲) تبدیل دی‌اکسیدکربن و هیدروژن به متان در دما و فشار متعادل و با استفاده از میکروارگانسیم‌ها به عنوان کاتالیست‌های تجدیدپذیر انجام می‌شود، حال آن‌که فرآیند متداول تولید متان از طریق تبدیل دی‌اکسیدکربن و هیدروژن (فرآیند Sabatier) به دما و فشار بالا نیاز دارد، (۳) برای تولید بیوالکتروشیمیایی متان نیازی به ضایعات زیست توده به عنوان الکترون‌دهنده نیست، حال آن‌که فرآیند هضم بی‌هوازی برای تولید متان به حضور جریان زیست توده وابسته است، (۴) تولید بیوالکتروشیمیایی متان در مقایسه با گاز تولیدشده از واحد بیوگاز یا لندفیل، منجر به تولید محتوای متان بیشتری می‌شود. در نتیجه، متان تولیدشده برای تزریق در زیرساخت‌های فعلی شبکه گاز مناسب‌تر می‌باشد.



شماتیک سیستم تولید بیوالکتروشیمیایی متان

همان‌گونه که اشاره شد، فناوری تبدیل بیوالکتروشیمیایی برق به گاز (متان)، امکان ذخیره الکتریسیته حاصل از منابع تجدیدپذیر را به شکل متان فراهم می‌آورد که زیرساخت‌های لازم برای استفاده از آن در دسترس می‌باشد. لکن این فناوری هنوز قابلیت کاربرد صنعتی ندارد و زمینه‌های پژوهشی در خصوص آن در مراحل اولیه قرار دارند. از طرفی، نرخ و راندمان تولید متان در این فناوری در مقایسه با دیگر فناوری‌های تولید متان، اندک است. بنابراین نیاز به پژوهش در خصوص این فناوری و بررسی چالش‌های علمی و فنی آن در مقیاس وسیع‌تر، کاملاً محسوس است.

منبع:

Geppert, F., Liu, D., Erten-Jansen M., Weidner, E., Buisman, C., Heijne, A., 2016. Bioelectrochemical Power-to-Gas: State of the Art and Future Perspectives. *Trends in Biotechnology*, 34:879-894.

## بیومتان: سوختی تجدیدپذیر برای آینده‌ای پایدار



افزایش فشارها برای کربن‌زدایی، توسعه سبز، و نزاع‌های ژئوپلیتیک، صنعت گاز اروپا را تحت تأثیر قرار داده است. بیومتان، جایگزینی پایدار برای گاز طبیعی، کلید استراتژی اتحادیه اروپا برای کاهش انتشار CO<sub>2</sub> و اطمینان از تأمین تقاضای انرژی است. مقررات جدید و فناوری‌های در حال ظهور، چارچوبی برای رشد در آینده را ترسیم می‌کنند. از این منظر، فرصت‌ها و تهدیدهایی برای بازیکنان جدید یا فعلی صنعت انرژی متصور است که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

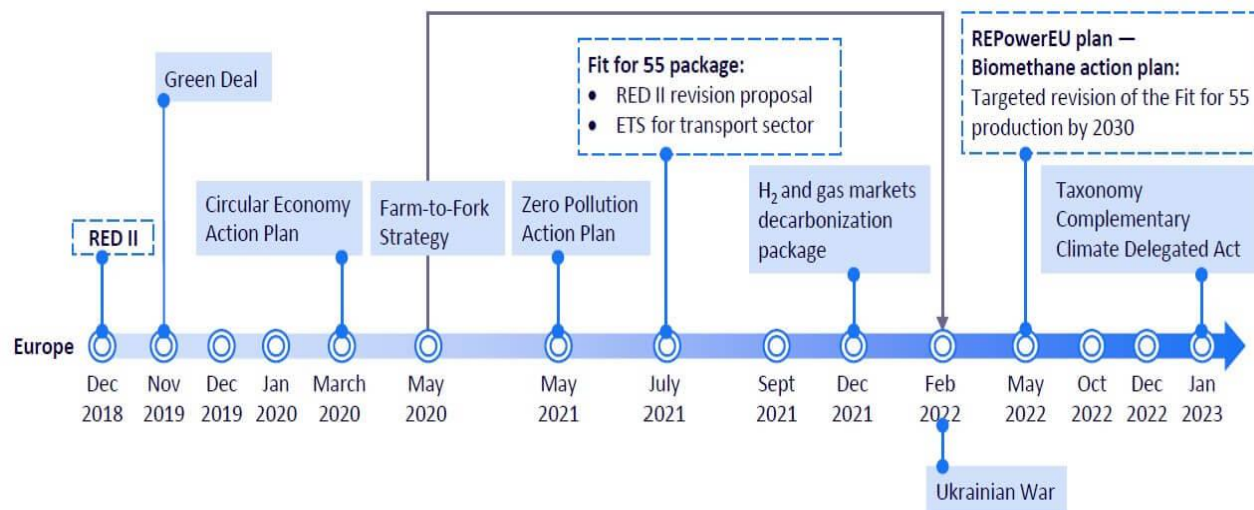
### ❖ فشارهای نظارتی

آشوب‌های ژئوپلیتیک و تصمیم اتحادیه اروپا برای کنار گذاشتن گاز روسیه، ظرفیت اروپا برای تأمین گاز طبیعی را تحت تأثیر قرار داده است. برای محدود کردن وابستگی به واردات گاز طبیعی در آینده، اتحادیه اروپا سیاست‌ها و قوانینی را برای قراردادن بیومتان به عنوان یک جایگزین کلیدی، وضع کرده است.

در سال ۲۰۱۸، قبل از این‌که بیومتان به عنوان جایگزین اصلی مورد توجه باشد، اتحادیه اروپا دومین بازنگری دستورالعمل انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۱۹۵</sup> را در جهت توسعه اهداف انرژی‌های تجدیدپذیر، پذیرفت. عدم برجستگی بیومتان با دو به‌روزرسانی تغییر کرد (Fit for 55) در سال ۲۰۲۱ و REPowerEU (در سال ۲۰۲۲) که هر دو در پاسخ به بحران انرژی اروپا وضع

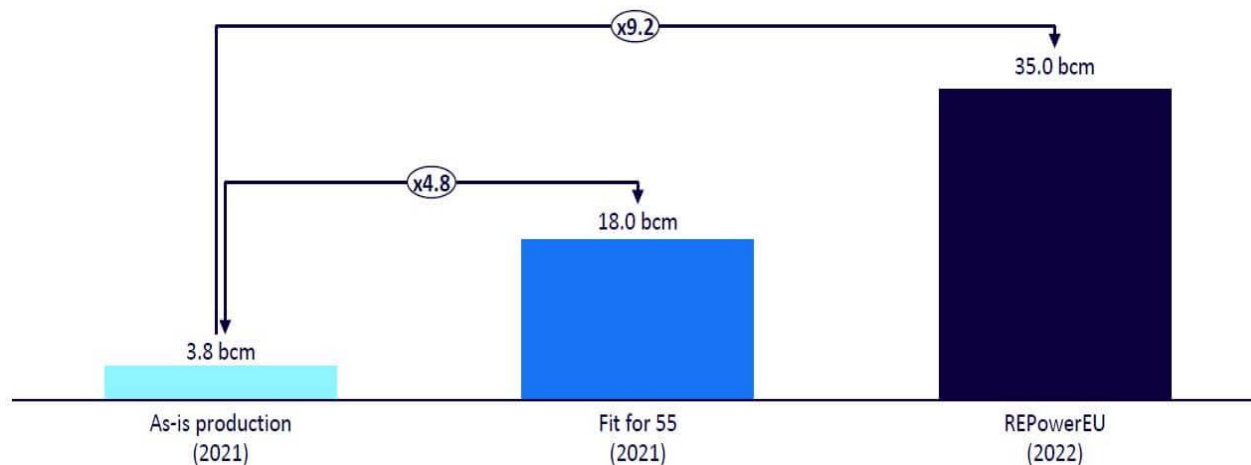
<sup>195</sup> Renewable Energy Directive (RED II)

شدند. ناگهان بیومتان، با هدف افزایش تولید از ۱۸ میلیارد مترمکعب<sup>۱۹۶</sup> به ۳۵ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۳۰، به یک راه‌حل کلیدی برای کاهش نیاز به گاز طبیعی تبدیل شد.



Source: Arthur D. Little, EU regulation

پیشرفت‌های اخیر مقررات بیوگاز و بیومتان در اتحادیه اروپا



Source: Arthur D. Little, EBA, EU regulation

مقایسه اهداف فعلی و ۲۰۳۰ تولید بیومتان در اتحادیه اروپا

<sup>196</sup> billion cubic meters (bcm)

## ❖ تغییر از بیومتان به بیومتان پیشرفته

مؤثرترین روش برای تولید بیومتان، استفاده از محصولات زراعی پربازده نظیر ذرت یا سیب‌زمینی است، ولی این رویکرد بسیار بحث‌برانگیز است. جنگل‌زدایی، کشت محصولات زراعی خاص، و امنیت غذایی مواردی هستند که تولید بیومتان از محصولات زراعی غذایی را با چالش مواجه می‌سازند.

برای جلوگیری از استفاده نامناسب محصولات زراعی غذایی، اتحادیه اروپا بر استفاده از بیومتان "پیشرفته" تأکید دارد که به‌طور عمده از ضایعات (مانند پسماندهای گیاهی، حیوانی، و پساب‌های صنعتی) تولید می‌شود. یارانه‌ها، اهداف تجدیدپذیر، و گواهی‌نامه‌ها، مشوق‌های اصلی برای افزایش تولید بیومتان پیشرفته هستند. از این رو، محدودیتی برای تولید بیومتان بر پایه مواد غذایی وجود ندارد.

اتحادیه اروپا بزرگ‌ترین تولیدکننده بیوگاز و بیومتان در دنیاست. چین، دومین تولیدکننده بزرگ بیوگاز است، جایی که سیاست‌های ملی باعث گسترش هاضم‌های مقیاس خانگی شده است که خروجی آن‌ها برای گرمایش و پخت‌وپز مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایالات متحده آمریکا دومین تولیدکننده بزرگ بیومتان، با بهره‌مندی از گاز لندفیل و تمرکز بسیار بیشتر بر ارتقای بیوگاز به بیومتان، است. دیگر تولیدکنندگان مطرح دنیا شامل تایلند، هند، برزیل، و آرژانتین می‌باشند. بیشتر کشورهای دنیا به جهت بهره‌مندی از مواد اولیه مناسب، پتانسیل زیادی برای تولید بیوگاز و بیومتان دارند.

## ❖ لجن هضم‌شده: فرصت یا تهدید

هضم بی‌هوازی که در حال حاضر متداول‌ترین روش برای تولید بیومتان است، محصولی جانبی تحت عنوان لجن هضم‌شده نیز تولید می‌کند. لجن هضم‌شده اولیه به شکل غیر تفکیک‌شده و شامل مخلوطی از مواد مایع و جامد است که می‌تواند به دو بخش جامد و مایع تفکیک شود. دفع لجن غیر تفکیک‌شده چندان راحت نیست زیرا علی‌رغم این که حاوی ترکیبات مغذی نظیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، و عناصر کمیاب مانند آهن، منگنز، و مس می‌باشد و برای استفاده به عنوان کود و به‌منظور تقویت خاک بسیار مناسب است؛ ولی کشاورزان استفاده از کودهای ساختگی را مقرون به‌صرفه‌تر می‌دانند.

لزوم دفع مناسب لجن هضم‌شده، اتحادیه اروپا را بر آن داشت تا برای کاهش آلودگی خاک، قوانینی را به‌منظور کنترل ضایعات کشاورزی و دامی جهت استفاده به عنوان کود، وضع کند. کشاورزان دیگر نمی‌توانند بدون اندازه‌گیری نیتروژن و سایر مواد مغذی، ماده‌ای را به خاک اضافه کنند. دستورالعمل‌های مدیریت پسماند نیز کشاورزان را ملزم به مدیریت پسماندهای خود می‌کند که این امر هزینه‌های اضافی به آن‌ها تحمیل می‌کند. بدین ترتیب، کشاورزان ترغیب می‌شوند تا پسماندهای خود را به پسماندهای خود را به تولیدکنندگان بیومتان بفروشند و در مقابل بخشی از لجن هضم‌شده را برای استفاده به عنوان کود، پس بگیرند.

علاوه بر این، اتحادیه اروپا قانونی وضع کرده است مبنی بر این که تا سال ۲۰۳۰، ۲۰ درصد کل کود مصرفی باید آلی باشد. لجن هضم شده حاصل از واحدهای تولید بیومتان، ماده اولیه تولید کود آلی است و این امکان را فراهم می کند تا در واحدهای تولید بیومتان، تأسیسات تولید کود آلی توسعه یابد. مقررات و اهداف فوق، فرصت های مناسبی برای توسعه اقتصاد چرخشی فراهم می آورد که در آن با استفاده از یک مدل کسب و کار، سودآوری پروژه متان از طریق تبدیل لجن هضم شده به کود آلی دارای ارزش افزوده، تکمیل می شود. بازار فعلی کودهای آلی بیش از ۱۰۰ یورو در هر تن می باشد و انتظار می رود که با افزایش نیاز به استفاده از کودهای آلی، با کودهای معدنی همگرا شود.

منبع:

Lukáš Výlupek, Luis del Barrio, Martin Rajnoha, Matouš Zaradička, Jan Sova, 2023. THE FUTURE OF BIOMETHANE.

## کمیسیون انرژی ویولیا و واگا، یکی از بزرگ‌ترین واحدهای تولید بیومتان در اروپا



کمیسیون انرژی ویولیا و واگا، بزرگ‌ترین واحد تولید بیومتان فرانسه از محل ذخیره‌سازی زباله‌های غیر سمی است. مرکز صنعتی ویولیا واقع در بزرگ‌ترین سایت تولید بیوگاز در فرانسه، سالانه ۱۲۰ گیگاوات گاز تجدیدپذیر تولید خواهد کرد. این میزان، معادل متوسط مصرف سالانه ۲۰،۰۰۰ خانوار می‌باشد و از انتشار حدود ۲۵،۰۰۰ تن کربن‌دی‌اکسید در هر سال جلوگیری می‌کند. واحد تمام مکانیزه و از راه دور کنترل‌شونده واگا انرژی، با توسعه فناوری واگاباکس ۱۹۷، بیوگاز تولیدشده از پسماندهای دفن زباله را ارتقا داده و به بیومتان، گاز ۱۰۰٪ تجدیدپذیر، تبدیل می‌کند. این گاز سبز سپس مستقیم به شبکه تزریق می‌شود تا انرژی موردنیاز خانه‌ها و کسب‌وکارها در منطقه را تأمین کند و بخش حمل‌ونقل را نیز کربن‌زدایی کند. پروژه فعلی، یکی از ۴ پروژه توسعه‌یافته در طی همکاری مشترک ویولیا و واگا انرژی در فرانسه می‌باشد. این واحد تولید در حال حاضر با دو واحد در حال ساخت دیگر، به بهره‌برداری رسیده است. پس از راه‌اندازی، این ۴ واحد تا سال ۲۰۲۴ ظرفیت تولید بیومتان تا ۱۷۵ گیگاوات‌ساعت در سال را خواهند داشت و امکان جلوگیری از انتشار ۳۵،۰۰۰ تن کربن‌دی‌اکسید در سال را فراهم خواهند کرد. در این پروژه، تلفیق تخصص منحصربه‌فرد مهندسی گاز واگا انرژی با تخصص تصفیه پسماند ویولیا، منجر به توسعه جایگزینی پایدار برای سوخت‌های فسیلی شده است. مجریان این پروژه معتقدند که با تولید بیومتان، اقدامی ملموس در مقابل گرمایش جهانی انجام می‌دهند و به استقلال انرژی کشورشان کمک خواهند کرد.

## ❖ گروه ویولیا

گروه ویولیا مصمم است تا یک شرکت شاخص برای تغییرات زیست‌محیطی باشد. با حدود ۱۷۹,۰۰۰ پرسنل در سراسر جهان، این گروه طراحی و تأمین راهکارهایی را که هم مفید و هم عملیاتی باشند، در حوزه مدیریت آب، پسماند، و انرژی، برعهده دارد. این شرکت از طریق سه طرح تجاری مکمل، در راستای بهبود دسترسی به منابع، محافظت، و بازیابی آنها، اقدامات مهمی انجام داده است. در سال ۲۰۲۰، گروه ویولیا، تأمین آب شرب ۹۵ میلیون نفر و مدیریت پساب ۶۲ میلیون نفر را بر عهده داشته است، در حدود ۴۳ میلیون مگاوات ساعت انرژی تولید کرده است، و ۴۷ میلیون تن پسماند را تصفیه کرده است. درآمد تلفیقی ویولیا در سال ۲۰۲۰، ۲۶/۰۱ میلیارد یورو ثبت شده است ([www.veolia.com](http://www.veolia.com)).

ویولیا در حال حاضر با ۶ تراوات ساعت از منابع اولیه انرژی، یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان انرژی از بیوگاز در دنیاست. به عنوان یک پیشرو در تغییرات زیست‌محیطی، ویولیا مصمم است تا ارتقای بیوگاز به شکل بیومتان را به بیشترین میزان برساند و ذخایر جهانی آن را در قالب رویکرد اقتصاد چرخشی، افزایش دهد. هدف این گروه، شاخص شدن در بخش بیومتان و توسعه ظرفیت‌های تولید انرژی سبز برای کمک به مقابله با تغییرات اقلیمی است.

## ❖ گروه واگا انرژی

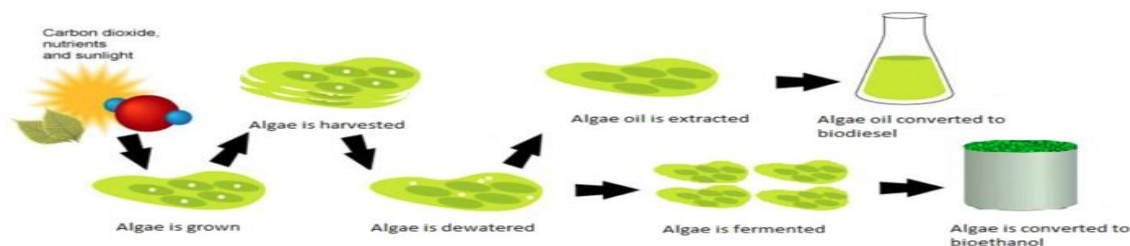
گروه واگا انرژی با استفاده از فناوری خالص‌سازی ثبت شده تحت عنوان واگاباکس، گاز طبیعی تجدیدپذیر یا همان بیومتان را به قیمت رقابتی و از ارتقای گاز لندفیل، تولید می‌کند. گاز طبیعی تجدیدپذیر<sup>۱۹۸</sup> تولیدشده، مستقیم به شبکه‌های توزیع گاز تزریق می‌شود تا جایگزینی برای گاز طبیعی باشد. گروه واگا انرژی، تأمین مالی، ساخت و بهره‌برداری واحدهای واگاباکس خود را از طریق قراردادهای بلندمدت با گردانندگان واحدهای دفن زباله به‌منظور تأمین گاز خام، انجام می‌دهد و با فروش گاز طبیعی تجدیدپذیر تولیدشده، کسب درآمد می‌کند. گروه واگا انرژی، ۱۱ واحد واگاباکس در فرانسه با ظرفیت نصب‌شده ۲۴۰ گیگاوات ساعت در سال دارد. ۱۱ واحد دیگر نیز در حال ساخت در فرانسه، اسپانیا، و کانادا هستند. هر پروژه‌ای که توسط این گروه آغاز می‌شود، در مقابله با گرمایش جهانی سهیم است و به فرایند گذار انرژی کمک می‌کند. واگا انرژی، از ۲۷ اکتبر ۲۰۲۱، در Euronext Paris (بورس فرانسه)، وارد شده است ([waga-energy.com](http://waga-energy.com)).

منبع:

[www.veolia.com](http://www.veolia.com)  
[www.waga-energy.com](http://www.waga-energy.com)

<sup>198</sup> Renewable Natural Gas (RNG)

## سوخت زیستی جلبک ۱۹۹



انواع جلبک‌ها نسل سوم سوخت‌های زیستی را تشکیل می‌دهند. سوخت زیستی سوختی است که از موجودات زنده یا ضایعات موجود زنده ساخته می‌شود و با نام زیست‌توده<sup>۲۰۰</sup> نیز شناخته می‌شود. روغن جلبک‌ها را می‌توان به بیودیزل تبدیل کرد و مواد باقی‌مانده را می‌توان برای تولید بیواتانول استفاده نمود. هم بیودیزل و هم بیواتانول در حال توسعه سوخت‌های زیستی هستند. بیودیزل یک سوخت تجدیدپذیر است که از روغن دانه‌ها ساخته می‌شود. بیواتانول الکلی است که از جلبک، ذرت، نیشکر یا سایر قندهای حاوی مواد اولیه تولید می‌شود. این مواد معمولاً با بنزین ترکیب و در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شوند.

### ❖ تبدیل جلبک به سوخت زیستی

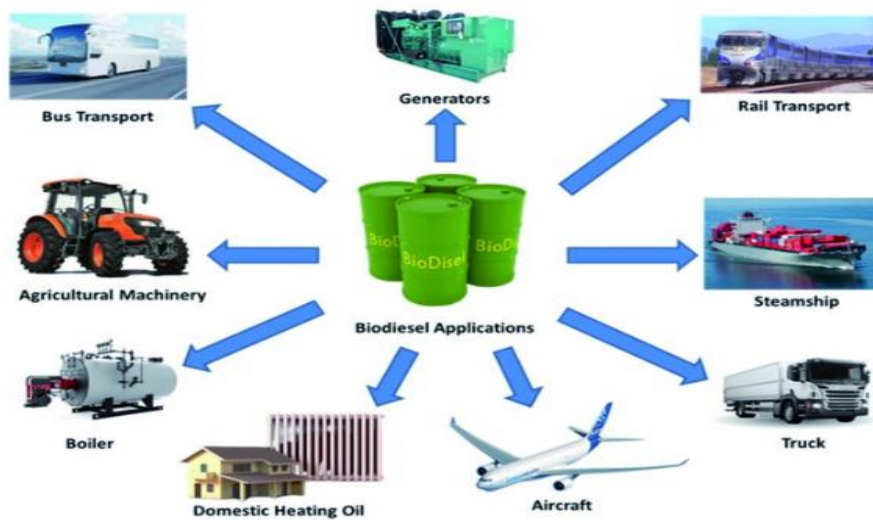
برای تبدیل جلبک به سوخت زیستی، مراحل مختلفی باید طی شود که عبارت‌اند از:

- رشد جلبک<sup>۲۰۱</sup>: پرورش جلبک با استفاده از نور خورشید، دی‌اکسید کربن و مواد مغذی.
- برداشت جلبک<sup>۲۰۲</sup>: برداشت جلبک از چرخه رشد.
- آبگیری جلبک<sup>۲۰۳</sup>: حذف آب از جلبک توسط فرآیندی به نام آبگیری.
- جداسازی روغن<sup>۲۰۴</sup>: استخراج روغن از کیک جلبک خشک‌شده.
- تولید سوخت زیستی<sup>۲۰۵</sup>: تبدیل روغن و جلبک به سوخت زیستی.

منبع: energyeducation.ca

<sup>199</sup> Algae Biofuel  
<sup>200</sup> Biomass  
<sup>201</sup> Growing Algae  
<sup>202</sup> Harvesting algae  
<sup>203</sup> Dewatering Algae  
<sup>204</sup> Oil Separation  
<sup>205</sup> Biofuel Production

## بیودیزل، منبع محلی انرژی تجدیدپذیر



افزایش تقاضای انرژی نه تنها منجر به کاهش گسترده ذخایر نفتی تجدیدناپذیر شده است، بلکه گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی را نیز بدتر کرده است. نگرانی‌ها در مورد کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و زوال محیط‌زیست، مسیر تحقیقات را به سوی جستجوی منابع تجدیدپذیر جایگزین معطوف کرده است. در این میان، بیودیزل<sup>۲۰۶</sup> به عنوان یک سوخت جایگزین امیدوارکننده، توجه محققان را به خود جلب کرده است. بیودیزل یک سوخت زیستی زیست‌تخریب‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست است که پتانسیل ارائه یک منبع انرژی جایگزین برای گازوئیل نفتی را دارد. بیودیزل از منابع بیولوژیکی مانند روغن‌های خوراکی و غیرخوراکی، چربی‌های حیوانی و روغن‌های ضایعاتی پخت‌وپز به دست می‌آید. امروزه، چندین کشور با سیاست‌گذاری و وضع مقررات سعی دارند سوخت‌های جایگزین مانند بیودیزل را از طریق ارائه مشوق‌ها و یا الزام استفاده از آن ترویج کنند. به طور مثال در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۹، اتانول و بیودیزل با ۵ درصد افزایش مقدار، ۳ درصد از کل انرژی موردنیاز در بخش حمل‌ونقل در سطح جهان را تأمین کردند. اگرچه سیستم حمل‌ونقل الکتریکی اخیراً موردتوجه قرار گرفته است، اما اتانول و بیودیزل در مجموع به میزان ۳۳۶/۵ میلیون بشکه در سال، بیش از ۹۰ درصد سوخت‌های تجدیدپذیر در بخش حمل‌ونقل را تشکیل می‌دهند.

## ❖ فرایندهای تولید بیودیزل

بیودیزل را می‌توان از طریق فرایندهای فیزیکی-شیمیایی مختلف تولید کرد. روش‌های اولیه تولید بیودیزل شامل ترانس استری شدن<sup>207</sup>، استریفیکاسیون<sup>208</sup>، پیرولیز<sup>209</sup> و سیالات فوق بحرانی<sup>210</sup> است. در بین تمام این روش‌ها، ترانس استری شدن رایج‌ترین فرآیند تولید بیودیزل است که در آن آلکیل استر اسیدچرب و گلیسرین در واکنش شیمیایی تری‌گلیسرید و الکل در حضور کاتالیزور تولید می‌شود. مواد خام مختلفی مانند روغن‌های گیاهی، روغن‌های جلبکی، چربی‌های حیوانی، روغن‌های میکروبی و روغن‌های زائد می‌توانند بسته به روش تصفیه به عنوان ماده اولیه در تولید بیودیزل استفاده شوند. علاوه بر این، استفاده از بیودیزل می‌تواند به طور قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. اگرچه فناوری‌های متداول مانند ترانس استری شدن مسیر اصلی تولید بیودیزل است، اما عواملی چون هزینه‌های بالا و محدودیت برای بهبود این فرآیند باعث شده است که بیودیزل تولید شده قادر به رقابت اقتصادی با دیزل استخراج شده از نفت در بازار حمل‌ونقل امروزی نباشد. از این رو، تمایل برای تولید بیودیزل با استفاده از فناوری‌های جدید، پاک و بهبودیافته در سال‌های اخیر شدت یافته است. فرآیندهای نوین و سبز باید بتوانند زمان واکنش را با حفظ کیفیت بالای بیودیزل کوتاه کنند. همچنین باید سازگاری بیشتری با محیط‌زیست داشته باشند و با مصرف انرژی کمتری همراه باشند. در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی از جمله اولتراسونیک، مایکروویو، کایتاسیون هیدرودینامیکی، غشاء، پلاسما، تقطیر واکنشی، و راکتورهای فوق بحرانی برای تولید بیودیزل همراه با کاهش زمان واکنش، کاهش مصرف انرژی و کاهش نیازهای کاتالیزوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ریزجلبک‌ها مدت‌هاست که به دلیل محتوای نسبتاً بالای روغن و تولید سریع زیست‌توده، به عنوان منابع بالقوه برای تولید سوخت زیستی شناخته شده‌اند. ریزجلبک‌ها در مقایسه با محصولات گیاهی خیلی سریع رشد می‌کنند. کشت انبوه جلبک را می‌توان در زمین‌های غیر زراعی با استفاده از آب شور غیرشرب و فاضلاب انجام داد. از این رو، استفاده از ریزجلبک‌ها به عنوان یک منبع سوخت زیستی جایگزین برای تولید بیودیزل، مورد توجه محققان، کارآفرینان و عموم مردم است. زیست‌توده جلبکی شامل سه جزء اصلی است: کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها/روغن‌های طبیعی. بخش عمده روغن طبیعی ساخته شده توسط ریزجلبک‌ها به شکل تری‌گلیسرید است که نوع روغن مناسب برای تولید بیودیزل می‌باشد.

برخلاف محصولات کشاورزی که رشد آن‌ها یک فصل طول می‌کشد و تنها حاوی حداکثر حدود ۵ درصد وزن خشک روغن هستند، ریزجلبک‌ها به سرعت رشد می‌کنند و حاوی محتوای روغن بالایی هستند. وزن ریز جلبک‌ها معمولاً هر ۲۴ ساعت دو برابر می‌شود. در طول مرحله اوج رشد، برخی از ریزجلبک‌ها می‌توانند هر سه ساعت و نیم دو برابر شوند. محتوای

<sup>207</sup> Transesterification

<sup>208</sup> Esterification

<sup>209</sup> Pyrolysis

<sup>210</sup> Supercritical Fluids

روغن ریزجلبک‌ها معمولاً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد وزن خشک آن‌ها است، درحالی‌که این مقدار در برخی از سویه‌ها می‌تواند به ۸۰ درصد نیز برسد. به همین دلیل است که ریزجلبک‌ها در عرصه تولید سوخت زیستی موردتوجه قرار گرفته‌اند. بیشتر ریزجلبک‌ها کاملاً فتوسنتتیک هستند، یعنی به نور و دی‌اکسیدکربن به عنوان منبع انرژی و کربن نیاز دارند. این حالت کشت فوتواتوتروفیک نامیده می‌شود. با این حال، برخی از گونه‌های جلبکی می‌توانند در تاریکی رشد کنند و از منابع کربن آلی مانند گلوکز یا استات به عنوان منبع انرژی و کربن استفاده کنند. این حالت کشت هتروتروفیک نامیده می‌شود. به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بالا، کشت جلبک هتروتروف برای تولید بیودیزل به‌سختی توجیه می‌شود. به‌منظور به حداقل رساندن هزینه‌ها، تولید سوخت زیستی جلبکی معمولاً به کشت فوتواتوتروفیک متکی است که از نور خورشید به عنوان منبع آزاد انرژی استفاده می‌کند.



مزرعه کشت ریزجلبک جهت تولید بیودیزل

### ❖ محدودیت‌های تولید بیودیزل

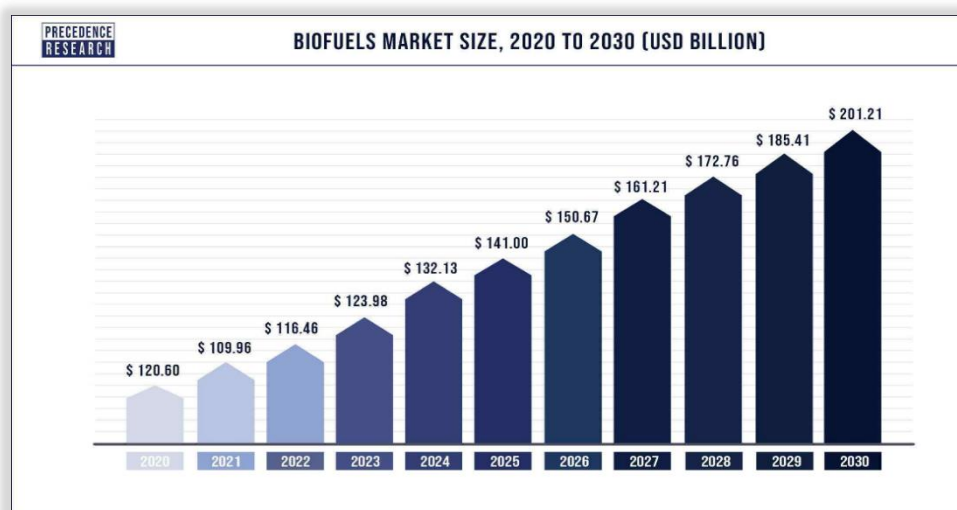
تولیدکنندگان سوخت بیودیزل، در طی سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۷ با مشکل عرضه مواد اولیه روبه‌رو هستند. به طور مثال، تقاضا برای روغن نباتی، ضایعات و روغن‌ها و چربی‌های باقیمانده، با افزایش ۵۶ درصدی تا میزان ۷۹ میلیون تن در این دوره پیش‌بینی می‌شود. سوخت‌های تولید شده از ضایعات و پسماندها تقاضای بالایی دارند، زیرا اهداف سیاستی کاهش گازهای گلخانه‌ای را در ایالات‌متحده و اروپا برآورده می‌کنند. درواقع، انتظار می‌رود که ضایعات و پسماندها برای تولید ۱۳ درصد از سوخت‌های زیستی در سال ۲۰۲۷ استفاده شوند، درحالی‌که این میزان در سال ۲۰۲۱، ۹ درصد بود. با این وجود، بازارها پویا هستند. قیمت‌های بالا، سیگنالی برای جستجوی منابع جدید است که باعث توسعه برنامه‌های دولتی و نوآوری‌های صنعتی برای کمک به جلوگیری از بحران می‌شود.

## ❖ بازار جهانی بیودیزل

بازار جهانی بیودیزل با رشد قابل توجهی در سال‌های آتی مواجه خواهد بود که ناشی از تلاقی عواملی است که به پذیرش جایگزین‌های پایدار برای سوخت‌های فسیلی منجر می‌شود. اندازه بازار جهانی بیودیزل در سال ۲۰۲۲، ۳۶/۴۸ میلیارد دلار تخمین زده شد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۲ به میزان ۷۹/۱۲ میلیارد دلار برسد. بازار جهانی بیودیزل تحت سلطه اروپا است که بیش از ۴۸ درصد مصرف جهانی را در سال ۲۰۲۲ به خود اختصاص داده است. آسیا و اقیانوسیه دومین بازار بزرگ بیودیزل است که ناشی از تقاضای روبه‌رشد چین و هند می‌باشد، درحالی‌که آمریکای شمالی جایگاه سوم را در اختیار دارد. آمریکای لاتین و آفریقا با افزایش سرمایه‌گذاری در تولید بیودیزل به عنوان بازارهای در حال رشد و نوظهور هستند. بازار جهانی بیودیزل با حضور بازیگران تثبیت‌شده و شرکت‌های نوظهور مشخص می‌شود. بازیگران اصلی بازار عبارت‌اند از:

- Bunge Limited (US),
- Archer Daniels Midland Company (ADM) (US),
- Wilmar International Limited (Singapore),
- Neste Corporation (Finland),
- Argent Bioenergy (US),
- REG Sustainable Energy (US),
- Solazyme (US),
- World Energy Biofuels (US),
- NewGen Biofuels (US).

این شرکت‌ها فعالانه در حال گسترش ظرفیت‌های تولید، ایجاد تنوع در مواد اولیه و توسعه فناوری‌های پیشرفته بیودیزل برای به دست آوردن بازارهای رقابتی هستند.



حجم بازار جهانی سوخت زیستی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰

بازار جهانی بیودیزل رشد قابل توجهی را تجربه می کند که توسط همگرایی عوامل محوری پیش می رود. افزایش آگاهی جهانی پیرامون مسائل زیست محیطی همراه با مقررات سخت گیرانه جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، تقاضای فزاینده برای بیودیزل به عنوان جایگزینی پایدار برای سوخت های فسیلی سنتی را تقویت می کند. دولت ها در سراسر جهان فعالانه از این انتقال حمایت می کنند و طیف وسیعی از سیاست های حمایتی از جمله یارانه ها، مشوق های مالیاتی، و دستورات ترکیبی را برای تحریک تولید و مصرف بیودیزل اجرا می کنند. در بخش حمل و نقل، به عنوان یک مصرف کننده کلیدی بیودیزل، افزایش قابل توجهی در تقاضا وجود دارد که ناشی از ترجیح روبه رشد برای توسعه وسایل نقلیه با مصرف سوخت سازگار با محیط زیست است. همزمان، پیشرفت های فناورانه قابل توجه در فرآیندهای تولید بیودیزل، بازده تولید و استفاده از آن را تقویت می کند، هزینه ها را محدود می کند و مجموعه مواد اولیه قابل دوام را گسترش می دهد و در نتیجه امکان رقابت کلی بیودیزل در چشم انداز انرژی را افزایش می دهد. علاوه بر این، پیشرفت ها در شیوه های کشاورزی و سیستم های مدیریت ضایعات باعث افزایش در دسترس بودن مواد اولیه مختلف مانند روغن های گیاهی، چربی های حیوانی و روغن های زائد می شود و پایه های رشد بازار بیودیزل را بیشتر تقویت می کند.

### ❖ عملکرد سوختی بیودیزل و مزایای زیست محیطی آن

بیودیزل به شکل خالص، بیودیزل "نیت"<sup>211</sup> نامیده می شود. مخلوط بیودیزل، شامل بیودیزل خالص و پترودیزل است که با علامت Bxx مشخص می شود و xx میزان حجمی بیودیزل در مخلوط را نشان می دهد. برای مثال، B20 مخلوطی شامل ۲۰ درصد بیودیزل و ۸۰ درصد پترودیزل است. بیودیزل خالص (B100) می تواند جایگزین پترودیزل شود ولی به علت محدودیت هایی چون قیمت و میزان دسترسی، معمولاً به شکل مخلوط ۲ تا ۲۰ درصد مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این، سازندگان موتور، استفاده از بیودیزل خالص را به عنوان سوخت جایگزین، گارانتی نمی کنند. استفاده از بیودیزل حتی در درصدهای پایین B1 یا B2، مزایای زیست محیطی به همراه داشته و روانکاری سوخت دیزل کم سولفور را به شدت بهبود می بخشد. آژانس حفاظت محیط زیست<sup>212</sup>، سطح پایین سولفور در پترودیزل را تأیید می کند و از اوایل سال های ۲۰۰۰ حد مجاز سولفور در سوخت های حمل و نقل جاده ای را از ۵۰۰۰ ppm به ۱۵ ppm تقلیل داده است. حذف سولفور از پترودیزل، روانکاری سوخت را به شدت کاهش می دهد. بیودیزل سولفور ندارد ولی در عین حال روانکاری بسیار خوبی دارد. تنها با استفاده از ۱ درصد بیودیزل (B1)، روانکاری پترودیزل کم سولفور تا ۶۵ درصد بهبود می یابد.

بیودیزل یک حلال عالی است و از این رو، بسیاری از رسوبات در موتورهای دیزلی، انژکتورهای سوخت، خطوط تأمین سوخت، و مخازن ذخیره سازی را که طی سال ها عملکرد موتور با استفاده از پترودیزل، انباشته شده اند؛ حل می کند. دمای

<sup>211</sup> neat

<sup>212</sup> Environmental Protection Agency (EPA)

نقطه اشتعال بیودیزل در حدود ۳۰۰ درجه فارنهایت است که در مقایسه با سوخت دیزل (۱۴۰ درجه فارنهایت)، خطر آتش‌سوزی را بسیار کم می‌کند و امکان ذخیره‌سازی و انتقال ایمن‌تری را فراهم می‌کند.

سوزاندن بیودیزل در یک موتور دیزلی متداول در مقایسه با پترو دیزل، منجر به انتشار سطح بسیار کمتری از هیدروکربن‌های نسوخته، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد ( $SO_x$ )، بو، و دودهای مضر، خواهد شد. اکسیدهای گوگرد با استفاده از بیودیزل B100 عملاً حذف می‌شوند، ولی استفاده از بیودیزل سبب افزایش جزئی در میزان اکسیدهای ازت ( $NO_x$ ) خواهد شد. کاهش اکسیدهای گوگرد بسیار حائز اهمیت است زیرا این گازها در شکل‌گیری باران‌های اسیدی و در توقف عملکرد مبدل‌های کاتالیزوری در موتورهای دیزلی نقش مؤثری دارند.

انتشار دی‌اکسید کربن از احتراق بیودیزل در مقایسه با پترو دیزل در حدود ۱۰ درصد کمتر است، ولی تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی دارای مزایای بسیار بیشتری به جهت تأثیر در انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد. انجام فرایند فتوسنتز در طی رشد گیاهان، دی‌اکسید کربن از محیط به بافت‌های گیاهی کشیده می‌شود؛ در واقع گیاهان اسکراب‌های<sup>۲۱۳</sup> دی‌اکسید کربن هستند. تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی یک فرایند کربن خنثی است. علاوه بر این، گیاهان در محیط اکسیژن نیز آزاد می‌کنند. نشت تصادفی بیودیزل در مقایسه با پترو دیزل مشکلات بسیار کمتری ایجاد می‌کند. بیودیزل خالص کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر است، در واقع در حدود ۹۸ درصد بیودیزل در طی سه هفته تخریب می‌شود. ویژگی‌های زیست‌تخریب‌پذیری بیودیزل آن را به سوختی جذاب برای مکان‌های حساس زیست‌محیطی مانند پارک‌های ملی، جنگل‌ها، و تفرجگاه‌ها تبدیل می‌کند.

محیط پاک‌تر در نتیجه مصرف بیودیزل، به لحاظ تأثیر در سلامت عمومی نیز حائز اهمیت است. افزایش حساسیت‌ها و مشکلات تنفسی نظیر آسم، به افزایش مداوم میزان آلاینده‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در موتورها و نیروگاه‌ها، وابسته است. بی‌شک در صورت استفاده بیشتر از بیودیزل، برنده قطعی محیط‌زیست ماست. آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا، بیودیزل را برای تطابق با لایحه هوای پاک<sup>۲۱۴</sup> مورد بررسی و آزمون قرار داده است. نتایج حاکی از آن است که انتشارات ناشی از سوختن بیودیزل غیر سمی بوده و خطر ناچیزی برای سلامتی انسان‌ها داشته و یا اصلاً بی‌خطر است. بررسی‌ها نشان داده است که امکان ابتلا به سرطان در اثر ذرات معلق ناشی از بیودیزل خالص، در حدود ۹۴ درصد کمتر از پترو دیزل می‌باشد.

منبع:

Maheshwari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., Klemeš, J. J., Bokhari, A., Beg, M., ... & Jaiswal, A. K. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588.

[www.iea.org](http://www.iea.org)

[www.precedenceresearch.com](http://www.precedenceresearch.com)

<sup>213</sup> scrubber

<sup>214</sup> Clean Air Act

## زیست‌شناسی مصنوعی و فناوری‌های کشف سوخت زیستی



مسیری که ما را از مصرف ناپایدار سوخت فسیلی دور می‌کند، مستقیم و منحصر به فرد نیست؛ بلکه پر از شاخه‌های احتمالی است. یکی از این شاخه‌ها، تولید سوخت‌های زیستی و بیوشیمیایی کربن منفی<sup>۲۱۵</sup>، موضوع اصلی پروژه طراحی بیوسیستم است که به‌تازگی توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۲۱۶</sup>، لانزاتک<sup>۲۱۷</sup>، دانشگاه نورث‌وسترن<sup>۲۱۸</sup> و دانشگاه ییل<sup>۲۱۹</sup> راه‌اندازی شده است. به گفته کریس جانسون، دانشمند ارشد انرل و مدیر این پروژه، انرل قصد دارد از توسعه سوبه‌های باکتریایی<sup>۲۲۰</sup> و یادگیری ماشین<sup>۲۲۱</sup> برای تولید سوخت‌ها و مواد شیمیایی کربن‌زدایی استفاده کند. در این مسیر از متخصصان زمینه‌های زیست‌شناسی سیستم‌ها<sup>۲۲۲</sup>، مهندسی ژنوم<sup>۲۲۳</sup>، تبدیل بدون سلول<sup>۲۲۴</sup> و تخمیر گاز<sup>۲۲۵</sup>، بهره‌گیری خواهد شد. هم‌چنین یکی از نمایندگان لانزاتک با اشاره به پروژه‌های زیست‌شناسی مصنوعی<sup>۲۲۶</sup> موفق این شرکت، هدف لانزاتک را از همکاری با انرل، بهره‌گیری از دانش یادگیری عمیق<sup>۲۲۷</sup> متخصصان آن به‌منظور پیش‌بینی و مهندسی آنزیم‌های بهبودیافته برای تبدیل مواد اولیه کربنی، عنوان نمود. لانزاتک بیش از ۱۰۰ محصول را از طریق پلتفرم Synthetic Biology خود به نمایش

<sup>215</sup> Carbon-negative production of biofuels and biochemicals

<sup>216</sup> NREL

<sup>217</sup> LanzaTech

<sup>218</sup> Northwestern

<sup>219</sup> Yale

<sup>220</sup> bacterial strain development

<sup>221</sup> machine learning

<sup>222</sup> systems biology

<sup>223</sup> genome engineering

<sup>224</sup> cell-free conversion

<sup>225</sup> gas fermentation

<sup>226</sup> synthetic biology

<sup>227</sup> Deep learning

گذاشته است. دانشمندان می‌دانند که می‌توانیم با تکیه بر میکروارگانیزم‌هایی که به‌طور طبیعی اکسیدهای کربن را مصرف می‌کنند، از فرآیندهای بیولوژیکی برای ایجاد سوخت‌ها و مواد شیمیایی کربن منفی<sup>۲۲۸</sup> استفاده کنیم. اما هنوز برای تولید این محصولات در مقیاس کافی برای متحول کردن صنعت سوخت و تولید مواد شیمیایی که منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است، چالش‌هایی وجود دارد. منبع فراوانی از کربن در حال حاضر وجود دارد که با این فناوری می‌توان این مشکل را برطرف کرد. یک مطالعه در سال ۲۰۲۰ توسط اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده<sup>۲۲۹</sup>، انتشار ۴.۶ میلیارد تن کربن‌دی‌اکسید در آن سال را تخمین زد. بر اساس گزارش سرویس تحقیقاتی کنگره<sup>۲۳۰</sup> در سال ۲۰۲۲، برخی کارشناسان تأثیر اقتصادی مستقیم محصولات، خدمات و فرآیندهای مبتنی بر زیست<sup>۲۳۱</sup> را تا ۴ تریلیون دلار در سال در سراسر جهان طی ۱۰ سال آینده تخمین می‌زنند.

### ❖ طراحی ژنوم‌های ایده‌آل باکتری‌ها

نورث‌وسترن، یل، لانزاتک و انزل در حال همکاری برای ایجاد باکتری‌های مصرف‌کننده کربن هستند که منجر به تولید سوخت‌های زیستی در مقیاس صنعتی پایدار شود. این تیم به جای تکیه بر روش‌های آزمون و خطای زمان‌بر برای دست‌کاری ژنوم یک باکتری، از یک رویکرد طراحی پیش‌بینی‌کننده استفاده خواهد کرد که مهندسی ژنوم و ابزارهای یادگیری ماشین را در بر می‌گیرد. این تیم این ابزارها را در سه بستر آزمایش بیولوژیکی اعمال خواهد کرد: بی‌هوازی<sup>۲۳۲</sup>، هوازی<sup>۲۳۳</sup> و سیستم‌های بدون سلول<sup>۲۳۴</sup>. هر یک از این سیستم‌های مکمل قادر به تبدیل کربن‌دی‌اکسید به انواع سوخت مفید و واسطه‌های شیمیایی هستند که در حال حاضر توسط منابع پتروشیمی ساخته می‌شوند. جانسون توضیح داد: «اگر بتوانیم سیستم‌هایی طراحی کنیم که در این شرایط عملکرد خوبی داشته باشند، می‌توانیم سوخت‌های زیستی و محصولات زیستی ایجاد کنیم که فرآیند تولید آن‌ها کربن‌دی‌اکسید را از چرخه عمر تولید-مصرف حذف می‌کند. این دستاورد می‌تواند صنعت تولید را در مقیاس تحولی که برای دستیابی به اقتصاد انرژی پایدار نیاز داریم، تحت تأثیر قرار دهد.»

<sup>228</sup> Carbon-negative fuels

<sup>229</sup> U.S. Energy Information Administration

<sup>230</sup> Congressional Research Service report

<sup>231</sup> Bio-based

<sup>232</sup> Anaerobic

<sup>233</sup> Aerobic

<sup>234</sup> Cell-free systems

### ❖ سوخت‌های زیستی کربن منفی برای یک اقتصاد دایره‌ای<sup>۲۳۵</sup>

این پروژه طراحی بیوسیستم از طریق دفتر برنامه علوم ژنومی تحقیقات زیست‌شناسی و زیست‌محیطی وزارت انرژی<sup>۲۳۶</sup> تأمین می‌شود. با توسعه سیستم‌های بیولوژیکی برای تولید سوخت و واسطه‌های شیمیایی کربن منفی، به چالش تولید سوخت‌های زیستی کربن منفی در سطح سیستم‌ها رسیدگی خواهد شد. همچنین جانسون افزود: «از آن‌جا که بودجه بخش دولتی و خصوصی بیشتر بر روی تولید زیستی کربن منفی تمرکز دارد، ما باید بتوانیم راه‌حل‌های خود را مقیاس‌بندی کنیم و این پروژه به ما کمک می‌کند تا این مسیر را طی کنیم.»

منبع: [nrel.gov](http://nrel.gov)

<sup>235</sup> Circular Economy

<sup>236</sup> Department of Energy's Office of Biological and Environmental Research Genomic Sciences Program

## نماهای جلبکی و افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان



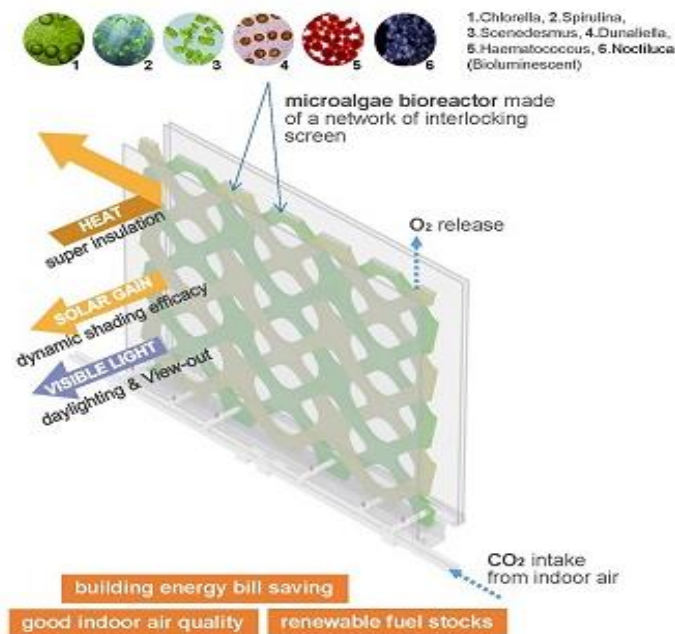
بحران انرژی و تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجهات را به سوی استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی معطوف ساخته است. صنعت ساختمان از جمله تولیدکنندگان عمده گازهای گلخانه‌ای چه در مرحله ساخت و چه در مرحله مصرف انرژی، محسوب می‌شود. این مسئله با رشد جمعیت و افزایش شهرنشینی در دهه‌های اخیر، بسیار شدت یافته است. بیش از ۳۵٪ مصرف انرژی جهانی و در حدود ۴۰٪ از انتشار CO<sub>2</sub> مرتبط با مصرف انرژی، به این صنعت مربوط می‌شود. انتظار می‌رود که انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختمان‌ها در طی بیست سال آینده دو برابر شود. لذا طراحی ساختمان‌هایی با بهره‌وری انرژی بالا برای دستیابی به آینده‌ای کم‌کربن بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

تبدیل زیست‌توده جلبکی به بیوانرژی رویکرد جدیدی برای تأمین انرژی موردنیاز ساختمان‌ها است. شکل‌های مختلف انرژی نظیر الکتریسیته، گرما، و سوخت‌های زیستی از تبدیل زیست‌توده تولید می‌شوند. همزیستی میان ساختمان‌ها و فتوبیوراکتورها می‌تواند در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و به تبع آن کاهش ردپای کربن مؤثر باشد. فتوبیوراکتورها به عنوان عایق حرارتی و جمع‌کننده حرارت خورشیدی عمل می‌کنند و سایه و زیست‌توده تولید می‌کنند. همراه با صرفه‌جویی در مصرف انرژی ناشی از افزایش راندمان حرارتی، ساختمان‌های جلبکی در تصفیه هوا و پساب نیز مؤثر بوده و در نتیجه می‌توانند در تأمین هوای با کیفیت مناسب حائز اهمیت باشند.

## ❖ میکرو جلبک‌ها و تأمین انرژی در ساختمان

در سال‌های اخیر استفاده از میکرو جلبک‌ها در ساختمان‌ها از سوی طراح‌ها و مهندسين معماری مورد توجه قرار گرفته است. جلبک‌ها به علت نرخ رشد سریع می‌توانند در مدت زمان کوتاهی، نمای ساختمان را بپوشانند. علاوه بر این، جلبک‌ها در تمام طول سال قابلیت رشد دارند. با تصفیه پساب و جذب  $CO_2$ ، تولید اکسیژن، و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر، جلبک‌ها می‌توانند برای ساکنین ساختمان بسیار مفید باشند. علاوه بر این، جلبک‌ها به جهت جذب حرارت خورشید در زمستان و ایجاد سایه مؤثر در تابستان، سبب کاهش مصرف انرژی در ساختمان می‌شوند. این مزایای متعدد سبب شده است تا رویکردهای مختلفی برای استفاده از جلبک‌ها در ساختمان‌ها و در مقیاس‌های متفاوت، توسط مهندسين و طراحان ارائه شود.

ساختمان‌هایی که انرژی مورد نیاز خود را از میکرو جلبک‌ها تأمین می‌کنند می‌توانند به عنوان یک سیستم جایگزین مطرح باشند. فرایند انجام شده در این ساختمان‌ها بدین شکل است که ابتدا آب حاوی مواد مغذی وارد فتوبیوراکتورهای نصب شده در نمای ساختمان می‌شود، جایی که نور خورشید و  $CO_2$  از طریق فتوستنتز به زیست‌توده جلبکی تبدیل می‌شوند. سپس زیست‌توده و حرارت تولید شده از طریق یک سیستم بسته به اتاق گلخانه منتقل می‌شوند، جایی که هر دو شکل انرژی (بیوانرژی و حرارت) به ترتیب از طریق یک جداکننده و یک مبدل، تبادل می‌شوند. برای تأمین آب گرم و گرمایش ساختمان، از یک پمپ آب گرم استفاده می‌شود که میزان دمای حرارت تولید شده را تنظیم می‌کند.

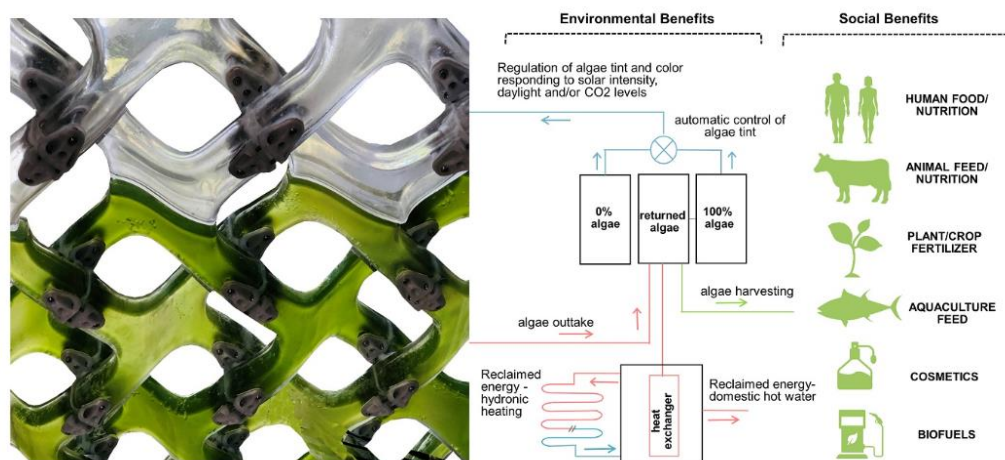


چگونگی عملکرد نماهای جلبکی

## ❖ بهره‌وری انرژی و اثرات زیست‌محیطی

گرمایش و سرمایش محیط، روشنایی، تأمین آب گرم، و سیستم تهویه، بیش از نیمی از مصرف انرژی ساختمان را به خود اختصاص می‌دهند. قسمت عمده اتلاف انرژی به ساختار ضعیف پوشش ساختمان، و سیستم HVAC<sup>۲۳۷</sup> ناکارآمد مربوط می‌شود. عواملی دیگری چون هندسه ساختمان، ویژگی‌های ساختاری دیوارها و پنجره‌ها، نسبت مساحت پنجره‌ها به دیوارها، و عوامل محیطی نظیر سایه یا وجود درخت، در مصرف انرژی اثر دارند. مدیریت انرژی نیازمند استفاده مؤثرتر از انرژی و آب، حفظ کیفیت هوا، و کنترل آلاینده‌ها و پسماندها می‌باشد.

ساختمان‌های جلبکی نه تنها انرژی پاک تولید می‌کنند، بلکه در کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز مؤثر می‌باشند و به عنوان یک فناوری کربن-خنثی در تأمین منابع انرژی شناخته می‌شوند. همراه با اثرات محیط‌زیستی مثبت، این ساختمان‌ها به لحاظ مالی نیز سودآور می‌باشند، چراکه سبب کاهش مصرف انرژی، هزینه‌های عملیاتی، و مالیات می‌شوند. به جهت کنترل بهتر دما، ساختمان‌های جلبکی می‌توانند مصرف انرژی را بیش از ۳۳٪ به لحاظ مصرف سوخت و بیش از ۱۰٪ به لحاظ مصرف الکتریسیته، کاهش دهند.



مزایای اجتماعی و زیست‌محیطی نماهای جلبکی

در یک مطالعه، یک آسمان‌خراش ۹۴ طبقه در شهر نیویورک (The One World Trade Center)، احاطه شده با پنجره‌های جلبکی، برای تخمین صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داد که مصرف انرژی (به منظور گرمایش، سرمایش، روشنایی، و تهویه)، به طور متوسط سالیانه ۲۰٪ کاهش می‌یابد و بیش از ۱ میلیون دلار در هزینه‌های برق صرفه‌جویی می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، نتایج شبیه‌سازی برای تخمین شدت مصرف انرژی (EUI<sup>۲۳۸</sup>)

<sup>237</sup> Heating, Ventilation, and Air Conditioning

<sup>238</sup> Energy Usage Intensity

سالیانه ساختمان‌های جلبکی در نواحی مختلف آب‌وهوایی نیز نشان داد که مصرف انرژی به طور متوسط ۲۰٪ کاهش می‌یابد که این کاهش مصرف ناشی از کاهش بار انرژی مربوط به گرمایش، سرمایش، تهویه، و روشنایی بوده است. این میزان کاهش مصرف انرژی، همچنین سبب کاهش سالیانه ۶۰۰۰ تن CO<sub>2</sub> می‌شود. در کنار کاهش کربن ناشی از کاهش مصرف انرژی، ساختمان‌های مورد مطالعه می‌توانند سالیانه بیش از ۷۰۰۰ تن CO<sub>2</sub> را با نرخ جذب ۵ گرم بر فوت‌مربع، جذب کنند.

### ❖ مزایا و محدودیت‌ها

اگرچه ساختمان‌های جلبکی مزایای متعددی دارند، لکن این فناوری هنوز در ابتدای راه است و چالش‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی زیادی قبل از پیاده‌سازی این سیستم‌ها در مقیاس وسیع باید مورد توجه قرار گیرد. برخی چالش‌های اصلی شامل کارکرد طولانی مدت در رسیدن به بهره‌وری انرژی مطلوب و جذب مؤثر CO<sub>2</sub>، عایق‌سازی حرارتی و صوتی، طول عمر و دوام پنل‌های جلبکی در مقابل تغییرات آب‌وهوایی، کنترل تغییر رنگ جلبک‌ها ناشی از تغییر دانسیته کشت جلبکی، نیاز به تعمیر و نگهداری و هزینه‌های نگهداری، و برخی اثرات منفی محیط‌زیستی نظیر احتمال تولید مواد سمی و بو توسط گونه‌های مضر جلبک، می‌باشد. البته نگرانی در خصوص افزایش هزینه‌ها با توجه به سودآوری در درازمدت نیز مورد توجه است.

### ❖ چشم‌انداز و آینده پیش‌رو

استفاده از جلبک‌ها در نمای ساختمان‌ها، امکان دستیابی به ساختمان‌های بدون انتشار، حفاظت زیست‌محیطی، و کیفیت بهتری از زندگی را فراهم می‌کند. این فناوری در انواع مختلف ساختمان‌ها به خصوص ساختمان‌های با مصرف انرژی بالا نظیر هتل‌ها، بیمارستان‌ها، آرمایشگاه‌ها، و ساختمان‌های اداری، قابل پیاده‌سازی می‌باشد. پوشش جلبکی ساختمان‌ها ضمن صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سبب جذب کربن و تصفیه پساب یا دیگر آلاینده‌ها می‌شود. جنبه‌های زیبایی‌شناختی پوشش‌های جلبکی نیز می‌تواند در هدایت پذیرش عمومی نسبت به این فناوری مؤثر باشد. نماهای سبز در ساختمان می‌توانند سبب بهبود وضعیت جسمی و روانی ساکنین آن شوند. مشوق‌های مالی به جهت اعتبار کربن و تولید محصولات ارزشمند نیز سبب پذیرش گسترده‌تر این فناوری در آینده خواهد شد.

منبع:

M. Sedighi, P. Pourmoghaddam, M. Amidpour, Algae-Powered Buildings: A Review of an Innovative, Sustainable Approach in the Built Environment, *Sustainability*, 15 (2023), 3729.

## همکاری هند و سوئد در مزارع هوشمند خورشیدی



هند و سوئد یک مشارکت نوآورانه با تمرکز بر مزارع هوشمند با انرژی خورشیدی برای بهبود شیوه‌های کشاورزی و پیشبرد پایداری آغاز کرده‌اند. این برنامه نوآورانه اهمیت کشاورزی کوچک در هر دو کشور را نشان می‌دهد. هدف این مشارکت ایجاد انقلابی در کشت زمین کشاورزان از طریق ادغام روش‌های کشاورزی پیشرفته با فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر است. این مشارکت در نظر دارد با استفاده از انرژی خورشیدی، جوامع روستایی را بهبود بخشد، تولیدات کشاورزی را افزایش دهد و مسیر را برای آینده‌ای سبزتر و رفاه بیشتر در بخش کشاورزی هموار سازد. اندازه فعلی بازار کشاورزی هوشمند جهانی در سال ۲۰۲۳، ۲۲.۶۵ میلیارد دلار ارزش گذاری شده و انتظار می‌رود با نرخ رشد مرکب سالانه<sup>۲۳۹</sup> ۱۳.۴ درصد از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۰ گسترش یابد.

### ❖ اهمیت کشاورزی کوچک<sup>۲۴۰</sup> در هند

بافت فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی هند به شدت به کشاورزی کوچک متکی است. بخش قابل توجهی از جمعیت روستایی به کشاورزی وابسته هستند چراکه امنیت غذایی، توسعه روستایی و کاهش فقر را تضمین می‌کند. این مزارع که توسط کشاورزان منفرد یا خانواده‌های کوچک اداره می‌شوند، تولیدات کشاورزی کشور را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. کشاورزی کوچک باعث تشویق شرکت‌های روستایی، خودکفایی و تمرکززدایی از فعالیت‌های کشاورزی می‌شود. همچنین از حیات وحش، میراث فرهنگی و دانش سنتی محافظت می‌کند. هند و سوئد برای استفاده از انرژی خورشیدی و روش‌های

<sup>239</sup>Compound Annual Growth Rate (CAGR)

<sup>240</sup> Small-hold Farming

کشاورزی نوآورانه برای بهبود معیشت کشاورزان و توسعه سیستم‌های کشاورزی پایدار به هم پیوسته‌اند، زیرا هر دوی این کشورها اهمیت تحول این بخش را درک می‌کنند.

### ❖ انرژی خورشیدی، راه‌حل تأمین انرژی برای مزارع کوچک

انرژی خورشیدی بهترین گزینه برای مزارع در مقیاس کوچک است، به‌ویژه در هند، که در آن نور خورشید فراوان است. برای تأمین انرژی بسیاری از وظایف کشاورزی، از جمله آبیاری، تجهیزات و روشنایی، همکاری بین سوئد و هند بر برداشت انرژی خورشیدی با قرار دادن پانل‌ها در مزارع متمرکز است. این منبع انرژی تجدیدپذیر با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی گران‌قیمت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشکلات مرتبط با دسترسی محدود به برق را برطرف نموده است. انرژی خورشیدی کشاورزان را قادر می‌سازد تا با ارائه یک جایگزین مناسب و مقرون‌به‌صرفه، میزان تولید را افزایش و هزینه‌های انرژی و تأثیر کربن خود را کاهش دهند. همچنین انعطاف‌پذیری و پایداری جوامع روستایی را بهبود می‌بخشد. آینده‌ای سبزتر و پایدارتر با تلفیق مزارع با انرژی خورشیدی امکان‌پذیر می‌شود.

### ❖ پیاده‌سازی تکنیک‌های کشاورزی هوشمند<sup>۲۴۱</sup>

سوئد و هند با ادغام فناوری مدرن با روش‌های سنتی، برای بهبود شیوه‌های کشاورزی با یکدیگر همکاری می‌کنند. کشاورزی دقیق<sup>۲۴۲</sup>، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده<sup>۲۴۳</sup> و دستگاه‌های اینترنت اشیا<sup>۲۴۴</sup>، همگی در این راهبرد به کار گرفته می‌شوند.



استفاده از پهپادها و حسگرها در کشاورزی هوشمند

کشاورزان با استفاده از حسگرها، پهپادها و سیستم‌های نظارتی، اطلاعات فعلی را در خصوص رطوبت خاک، سلامت محصول و آب‌وهوا جمع‌آوری می‌کنند. این ویژگی برای کشاورزان این امکان را فراهم می‌سازد که در خصوص آبیاری،

<sup>241</sup> Smart Farming

<sup>242</sup> Precision Farming

<sup>243</sup> Data-driven Decision-making

<sup>244</sup> IoT Devices

کوددهی و کنترل آفات به شیوه‌ای آگاهانه تصمیم بگیرند که منجر به عملکرد قوی‌تر، ضایعات کمتر و کیفیت بهتر محصول می‌شود. فن‌آوری‌ها و تجزیه و تحلیل‌های پیشرفته، بهره‌وری، پایداری و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به ارمغان می‌آورد. پهبادهای آفات و کمبود مواد مغذی را شناسایی می‌کنند. همچنین در این روش به کمک آبیاری خودکار، در استفاده از منابع آبی صرفه‌جویی می‌شود. کشاورزی هوشمند، به کشاورزی پایدار با محصول بالا می‌انجامد و امنیت غذایی را در مقیاس جهانی افزایش می‌دهد.

### ❖ افزایش مقیاس و تکرار موفقیت‌ها



هدف همکاری بین هند و سوئد رسیدگی به چالش‌های کشاورزی در کشورهای مربوطه است و به عنوان طرحی برای سایر کشورهای که با مشکلات مشابه روبرو هستند عمل می‌کند. اجرای موفقیت‌آمیز مزارع هوشمند با انرژی خورشیدی، نمونه‌ای است که می‌تواند الهام‌بخش و تشویق‌کننده سایر کشورها به اتخاذ ابتکارات مشابه باشد. با به اشتراک

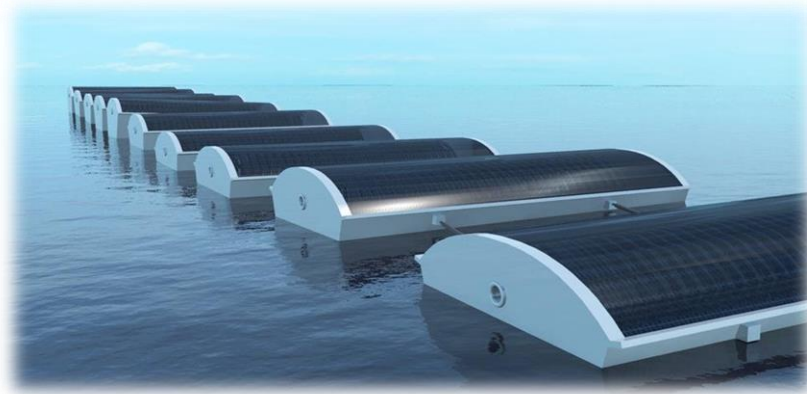
گذاشتن دانش، ایجاد ظرفیت و انتقال فناوری، شیوه‌ها و تجربیات فراگرفته را می‌توان افزایش داد و تکرار نمود، که منجر به پذیرش گسترده‌تر و تأثیر بیشتر در سراسر جهان می‌گردد. این همکاری‌های بین‌المللی در بخش کشاورزی در پیشبرد دستور کار جهانی دستیابی به اهداف توسعه پایدار<sup>۲۴۵</sup>، به‌ویژه کاهش فقر، امنیت غذایی، و اقدامات آب و هوایی ضروری است. کشورها با همکاری و به اشتراک گذاشتن تجربیات موفق می‌توانند به طور جمعی به ایجاد آینده‌ای پایدارتر و انعطاف‌پذیرتر برای کشاورزی و رفاه مردم در سراسر جهان کمک کنند. این اتحاد نمونه‌ای است که چگونه همکاری بین‌المللی می‌تواند در مقابله با مسائل مهم جهانی از جمله امنیت غذایی، تغییرات آب‌وهوا و توسعه روستایی مؤثر باشد. آینده کشاورزی کوچک نویدبخش ایجاد یک بخش کشاورزی انعطاف‌پذیرتر، مؤثرتر و پایدارتر در سطح جهانی است.

منبع:

siliconindia - Transforming Small-Hold Farming: India-Sweden Link up on Solar-powered Smart Farms-6 Jun 2023

<sup>245</sup> Sustainable Development Goals (SDGs)

## سیستم نمک‌زدایی خورشیدی کارآمد محققان مؤسسه علوم هند



محققان مؤسسه علوم هند<sup>۲۴۶</sup>، بنگالورو<sup>۲۴۷</sup>، یک سیستم نمک‌زدایی حرارتی جدید ایجاد کرده‌اند که با استفاده از انرژی خورشیدی کار می‌کند. محققان معتقدند که این واحد از نظر انرژی کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و قابل‌حمل است که راه‌اندازی آن را در مناطق با دسترسی محدود به برق مداوم تسهیل می‌سازد. هدف اصلی از این تحقیق افزایش دسترسی به آب تمیز و آشامیدنی است. رایج‌ترین روش برای نمک‌زدایی، نمک‌زدایی حرارتی<sup>۲۴۸</sup> است. محققان توضیح دادند: «در این فرآیند، آب شور به بخار تبدیل می‌شود. این بخار فاقد نمک و مواد معدنی موجود در آب شور است. بخار، هنگامی که متراکم شود، آب شیرین حاصل می‌شود.» مؤسسه علوم هند، در بیانیه‌ای اعلام نمود که نمک‌زدایی حرارتی انرژی زیادی مصرف می‌کند. سیستم‌های نمک‌زدایی حرارتی با گرم کردن آب شور و سپس متراکم کردن بخار حاصل برای به دست آوردن آب شیرین کار می‌کنند. اما انرژی مورد نیاز برای تبخیر معمولاً از طریق الکتریسیته یا احتراق سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید. یک جایگزین سازگار با محیط‌زیست، استفاده از دستگاه‌های ثابت خورشیدی<sup>۲۴۹</sup> است که در آن از انرژی خورشیدی برای تبخیر آب شور در مخازن بزرگ استفاده می‌شود. در نهایت بخاری که روی سقف شفاف متراکم می‌گردد، جمع‌آوری می‌شود.

سوسمیتا داش<sup>۲۵۰</sup>، استادیار دپارتمان مهندسی مکانیک و نویسنده مسئول این مطالعه، گفت: «به عنوان جایگزینی برای دستگاه‌های خورشیدی، تیم مؤسسه علوم هند طرح جدیدی را برای یک واحد نمک‌زدایی با انرژی خورشیدی ایجاد کرده

<sup>246</sup> Indian Institute of Science (IISc)

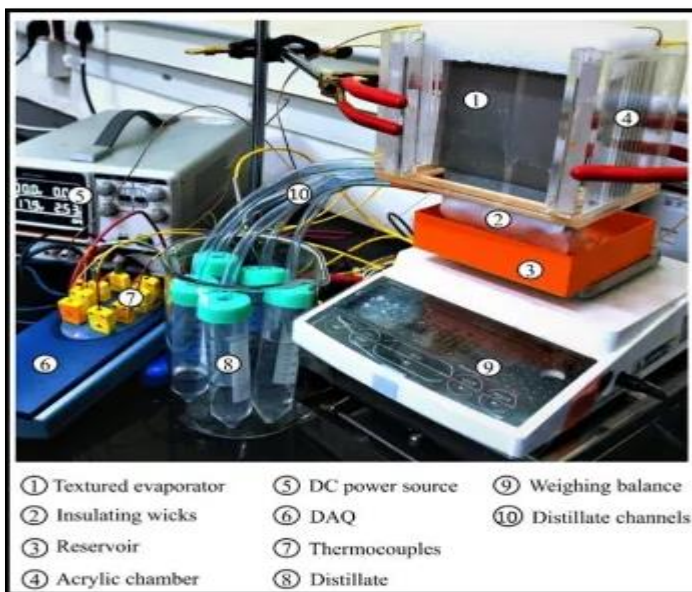
<sup>247</sup> Bengaluru

<sup>248</sup> Thermal Desalination

<sup>249</sup> Solar Stills

<sup>250</sup> Susmita Dash

است که از نظر انرژی کارآمدتر و مقرون به‌صرفه‌تر و قابل حمل است. این دستگاه شامل یک مخزن آب شور، یک اواپراتور<sup>۲۵۱</sup> و یک کندانسور<sup>۲۵۲</sup> است که در یک محفظه عایق محصور شده است تا از اتلاف گرما به هوای محیط جلوگیری نماید.



سیستم نمک‌زدایی خورشیدی طراحی شده توسط محققان موسسه علوم هند

این محصول توسط دش و دانشجوی دکترای او نجاجیت دکا<sup>۲۵۳</sup> طراحی شده است. به غیر از آب دریا، این سیستم می‌تواند با آب‌های زیرزمینی حاوی نمک‌های محلول و همچنین آب تا حدودی شور<sup>۲۵۴</sup> نیز کار کند. همچنین می‌توان آن را به گونه‌ای تنظیم کرد که با موقعیت‌های جابه‌جایی خورشید در طول روز هماهنگ شود. محققان در حال حاضر در حال کار بر روی افزایش مقیاس سیستم و بهبود دوام آن و افزایش حجم آب آشامیدنی تولیدی هستند تا بتوان آن را برای مصارف خانگی و تجاری مستقر نمود.

منبع:

IISc researchers develop energy efficient solar desalination system for areas which do not have continuous supply of electricity" 2023

<sup>251</sup> Evaporator

<sup>252</sup> Condenser

<sup>253</sup> Nabajit Deka

<sup>254</sup> Brackish Water

این اصطلاح به عنوان "تا حدودی شور" شناخته می‌شود و به منبع آبی اطلاق می‌شود که تا حدودی شور است (بیشتر از آب شیرین) اما به اندازه آب دریا شور نیست. مقدار دقیق شوری بسته به عوامل محیطی متفاوت خواهد بود و نمی‌توان به طور دقیق آن را تعریف کرد.

## آغاز ساخت ۴۵۰۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی با بازگشایی اسناد مناقصه



بازگشایی اسناد مناقصه عمومی سرمایه‌گذاری در ساخت و بهره‌برداری ۴۵۰۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی به صورت قانونی، ۵ آذر با حضور اعضای کمیته مناقصات، سرمایه‌گذاران و آقای دکتر محمود کمانی، مدیرعامل سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی‌های برق (ساتبا) انجام شد. پیرو ابلاغ مصوبه شورای اقتصاد در تاریخ ۱۲ مهرماه ۱۴۰۲ و مصوب شدن ساخت ۴۵۰۰ مگاوات انرژی تجدیدپذیر از محل صرفه‌جویی سوخت در دولت سیزدهم، فراخوان ارزیابی کیفی مناقصه عمومی برای ساخت ۴۵۰۰ مگاوات انرژی خورشیدی، طی دو نوبت آگهی در یکی از روزنامه‌های سراسری منتشر شد؛ در این فرایند ۹ شرکت امتیازهای ارزیابی کیفی مورد نیاز را کسب کردند. در نهایت ۷ شرکت شرایط حضور در مناقصه و ارائه پیشنهاد قیمت را دریافت کردند. در ارزیابی متقاضیان، محدودیتی برای حضور شرکت‌ها وجود نداشته است؛ سرمایه‌گذاران متقاضی پس از انتشار فراخوان عمومی از سوی ساتبا، اسناد را دریافت و پس از چند مرحله ارزیابی، تعدادی از آنان، مجاز به شرکت در مناقصه شدند. سرمایه‌گذاران پس از این مرحله به مدت یک ماه فرصت ارائه اسناد مناقصه و قیمت در پنج سبد شامل ۲ سبد ۱۵۰۰ مگاواتی و ۳ سبد ۵۰۰ مگاواتی برای ساخت نیروگاه‌ها داشته‌اند. لازم به ذکر است توزیع ساختگاه‌های مناقصه مذکور در سراسر کشور صورت گرفته است. بازگشایی و اعلام برنده‌های حاضر در مناقصه ساخت ۴۵۰۰ مگاوات انرژی خورشیدی انجام شد. با اجرای این مصوبه، سرمایه‌گذاران متعهد می‌شوند نیروگاه‌ها را با ظرفیت مجموع ۴۵۰۰ مگاوات انرژی برق خورشیدی تا حداکثر پیک برق سال ۱۴۰۳ به شبکه سراسری متصل کنند؛ قیمت خرید برق از محل مصوبه مذکور تا سقف ۷.۳ سنت دلار برای هر کیلووات ساعت برق تولیدی مطابق مصوبه تعیین شده است. موانع و مشکلات پیش روی شرکت‌های حاضر در این مناقصه از جمله تملک زمین‌ها، نحوه اتصال به شبکه و مشکلات زیست‌محیطی در جلسات متعددی با حضور عوامل ساتبا و سرمایه‌گذارها بررسی و رفع شد.

منبع: [www.dolat.ir](http://www.dolat.ir) ، ۵ آذر ۱۴۰۲

## تفاهم‌نامه اعطای تسهیلات توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر بین ساتبا و صندوق

### نوآوری و شکوفایی



تفاهم‌نامه اعطای تسهیلات ریالی به نیروگاه‌های تجدیدپذیر با مقیاس متوسط با ظرفیت حداکثر سه مگاوات بین دکتر محمود کمانی، رئیس سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) و دکتر محمدصادق خیاطیان، مدیرعامل صندوق نوآوری و شکوفایی در محل ساتبا مبادله و امضا شد.

دکتر محمود کمانی، مدیرعامل ساتبا گفت: در ابتدای دولت برنامه توسعه تولید ۱۰ هزار مگاوات توسعه انرژی تجدیدپذیر اعلام شد، اما هم‌زمان در پی جلسات برگزار شده با مقامات ارشد، شورای عالی انرژی، مجمع تشخیص مصلحت نظام و مصوبات برنامه هفتم توسعه ۳۰ هزار مگاوات طی ۵ سال برنامه‌ریزی شد و مقرر شد ظرفیت ۱۰ هزار مگاوات تا پایان کار دولت سیزدهم ایجاد شود. وی افزود: در مجموع روند ساخت حدود ۱۱ هزار مگاوات انرژی تجدیدپذیر در حال انجام است و پیشرفت آن‌ها در حال رصد شدن است.

آقای دکتر کمانی با بیان اینکه یکی از موضوعات مهم در این زمینه تأمین منابع مالی برای ساخت نیروگاه‌های تجدیدپذیر است که برای آن سبدهای مالی مختلفی در نظر گرفته شده است، خاطرنشان کرد: به همین منظور پیش از این تفاهم‌نامه‌ای

با صندوق توسعه ملی به ارزش ۵ میلیارد دلار منعقد شده است تا بخشی از منابع مالی مورد نیاز توسعه حوزه تجدیدپذیر تأمین شود. مقرر شده است منابع مالی برای توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر با مقیاس متوسط تا حداکثر سه مگاوات تأمین شود. وی تصریح کرد: طبق قانون ماده ۱۶ جهش تولید دانش‌بنیان منابعی از صنایع که بالای یک مگاوات مصرف دارند دریافت خواهد شد که این منابع صرف توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌شود. صنعتی که خود احداث‌کننده نیروگاه باشد از پرداخت آن معاف خواهد شد و اگر اقدام نکند یا باید برق خود را از تابلوی برق سبز تأمین کند و یا مبلغی به میزان برق تجدیدپذیر در قبوض برق، درج و از آن‌ها اخذ می‌شود؛ کل این منابع صرف توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌شود؛ ۵۰ درصد مبالغ دریافتی برای پرداخت مطالبات نیروگاه‌های تجدیدپذیر و ۲۵ درصد در اختیار صندوق نوآوری و شکوفایی برای اعطای تسهیلات قرار می‌گیرد.

به گزارش روابط عمومی ساتبا، محمد خیاطیان، مدیرعامل صندوق نوآوری و شکوفایی در ادامه نشست خاطرنشان کرد: در کشور ما نیز توسعه تجدیدپذیرها در اولویت برنامه دولت و ریاست جمهوری قرار گرفته است، بنابراین پرداخت محوری به آن در ساتبا و دولت بسیار مبارک است. مدیرعامل صندوق نوآوری و شکوفایی با اشاره به اینکه برنامه وزارت نیرو، ایجاد زیرساخت برای تولید ۱۰ هزار مگاوات انرژی تجدیدپذیر است، عنوان کرد: صندوق نوآوری و شکوفایی در این زنجیره ارزش، از ظرفیت تکنولوژی و بومی شرکت دانش‌بنیان استفاده می‌کند و باید در این زنجیره به دانش فنی توجه کافی داشته باشیم که اگر این‌گونه نباشیم به کشورهای توسعه‌یافته در این زمینه وابسته می‌مانیم.

خیاطیان اظهار کرد: دولت برای ایجاد ۱۰ هزار مگاوات انرژی تجدیدپذیر برنامه دارد و مقرر گردید با کمک ساتبا از ظرفیت شرکت‌های دانش‌بنیان استفاده شود؛ برای احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر با ظرفیت حداکثر سه مگاوات از دانش تکنولوژیکی دانش‌بنیان‌ها کمک گرفته شود؛ اعتقاد داریم این شرکت‌ها می‌توانند در گلوگاه‌ها به کمک این زنجیره ارزش بیایند و نیازهای آن را رفع کنند. وی با تأکید بر اینکه عاملی مهم در شکل‌گیری این زنجیره، موضوع تأمین مالی است که در این زیست‌بوم حیاتی است، اضافه کرد: اگر به دنبال ایجاد ۱۰ هزار مگاوات هستیم تجمیع منابع مالی بسیار مهم است که خوشبختانه ظرفیت قانونی آن در وزارت نیرو، ساتبا و صندوق نوآوری و شکوفایی ایجاد شده و تجمیع منابع آن برکات زیادی خواهد داشت؛ با اتفاق امروز یکی از مهم‌ترین برنامه‌های کشور مربوط به بهره‌وری و انرژی تجدیدپذیر رقم خواهد خورد.

منبع: [www.dolat.ir](http://www.dolat.ir) ، ۱۴۰۲ آذر

## اولین زمین‌بازی کودکان در دنیا مجهز به سیستم تصفیه هوای فتوسنتتیک



AirBubble یک میکرواقلیم تصفیه‌شده برای بازی کودکان ایجاد کرده است؛ یک حباب واقعی مملو از هوای پاک در مرکز شهر ورشو در کشور لهستان. این پروژه در محوطه فضای سبز عمومی بیرون مرکز علوم کوپرنیک<sup>۲۵۵</sup> اجرا شده است؛ جایی که میزبان نمایشگاه تخصصی نوآوری‌های طراحی و معماری نیز می‌باشد. این زمین‌بازی که توسط شرکت ecoLogicStudio طراحی شده است، فرایند فتوسنتز را به محیط ساختمان پیوند داده است. بر اساس آمار ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی<sup>۲۵۶</sup>، آلودگی هوا بزرگ‌ترین تهدید جهانی در حوزه سلامت است. از آنجاکه ورشو یکی از آلوده‌ترین شهرهای اروپا است، لذا به عنوان اولین مکان برای اجرای این پروژه انتخاب شده است. AirBubble یک نوع معماری نوین را ابداع کرده است. این زمین‌بازی شامل یک ساختار چوبی استوانه‌ای است که با غشایی از جنس ETFE<sup>۲۵۷</sup> جهت محافظت از ۵۲ راکتور شیشه‌ای، پوشیده شده است. این ساختار، یک گلخانه جلبکی واقعی در محیط شهری را خلق کرده است. زمین‌بازی مجهز به طناب‌ها، پمپ‌های پایی و کره‌های فنی می‌باشد و هم به عنوان زمین‌بازی و هم به عنوان یک کلاس در فضای باز کارایی دارد. صدای حباب‌های هوا در سیستم جلبکی، مانع ورود سروصدای محیط شهری اطراف به داخل محوطه شده و فضایی آرام را برای بازی و تعامل فراهم می‌سازد.

<sup>255</sup> Copernicus Science Centre

<sup>256</sup> World Helath Organization (WHO)

<sup>257</sup> Ethylene Tetrefluoroethylene

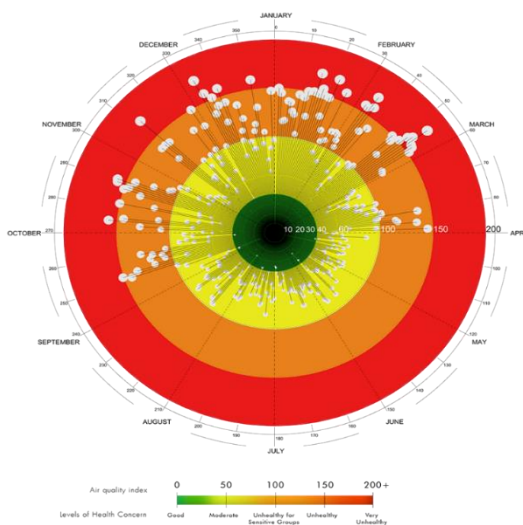


جزئیات بیوراكتورهای شیشه‌ای، سیستم پمپاژ با پا و سیستم تهویه هوا



زمین‌بازی AirBubble در ورشو لهستان با غشاء فوق‌العاده نازک دیواره AirBubble

فرایند تصفیه به علت مرفولوژی معماری به کار گرفته شده در ساختار زمین بازی، بهبود می‌یابد. غشاء ETFE میکرواقلیم داخل AirBubble را کنترل می‌کند. سقف غشاء که به شکل یک مخروط برعکس می‌باشد، گردش هوا و تهویه طبیعی را افزایش می‌دهد که سبب پاک نگه‌داشتن محوطه بازی می‌شود. سیستم پایش در AirBubble، سنسورهای آلودگی هوای شهری را یکپارچه کرده و به یک پلتفرم آنالیز داده متصل می‌کند تا امکان مقایسه داده‌های واقعی و تمرکز بر شاخص کیفیت هوا<sup>۲۵۸</sup> برای ۶ آلاینده اصلی (شامل ذرات معلق PM2.5 و PM10، دی‌اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>)، دی‌اکسید نیتروژن (NO<sub>2</sub>)، ازن در سطح زمین (O<sub>3</sub>)، و مونوکسید کربن (CO))، فراهم شود. AirBubble قادر به جذب ۹۷٪ از نیتروژن و ۷۵٪ از ذرات معلق در هوا می‌باشد. داده‌های اولیه مربوط به ماه می در سال ۲۰۲۱ نشان می‌دهد غلظت ذرات PM2.5 در داخل زمین بازی به خوبی کاهش یافته و در محدوده پیشنهادی WHO قرار گرفته است (منطقه سبز با شاخص کیفیت هوای زیر ۲۰). با استمرار پایش آلاینده‌ها در فصل‌ها و تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف، AirBubble یک آزمایشگاه شهری بی‌همتا برای بررسی کاربرد بیوتکنولوژی در مقابله با آلودگی هوا و کاهش اثرات آن بر سلامت کودکان خواهد شد. همان‌گونه که اشاره شد، AirBubble شامل ۵۲ بیوراکتور شیشه‌ای بزرگ می‌باشد که ۵۲۰ لیتر گونه جلبکی کلرلا<sup>۲۵۹</sup> را دربر می‌گیرند. این مقدار محیط جلبکی قادر به تصفیه جریان هوا با نرخ ۲۰۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد. درحالی‌که محیط کشت مایع ذرات را می‌شوید، گونه جلبکی مولکول‌های آلاینده نظیر دی‌اکسیدکربن را جذب کرده و اکسیژن تازه آزاد می‌کند.



پایش روزانه میکرواقلیم در AirBubble

منبع:

Ecologicstudio. AirBubble. 2018. Available online: <https://www.ecologicstudio.com/projects/airbubble-playground-and-exhibition>.

<sup>258</sup> Air Quality Index (AQI)

<sup>259</sup> Chlorella sp.

برونداد تخصصی

# انرژی‌های تجدیدپذیر



شماره ۶ - آذر ۱۴۰۲