# مروری بر چگونگی تولید و تصفیه گاز زیستی

**الهه بازدار[۱]، جلال شایگان[۲*]**

۱- کارشناس ارشد مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۱

**پیام‌نگار: shayegan@sharif.edu**

**چکیده**

*میان منابع تجدیدپذیر، زیست‌توده تنها منبع تجدیدپذیری است که می‌تواند به همه شکلهای انرژی تبدیل شود. هضم بی‌هوازی منابع زیست توده، حامل انرژی تجدیدپذیر گاز زیستی را فراهم می‌کند. گاز زیستی علاوه بر تجدیدپذیر بودن و سازگاری با محیط زیست دارای منافع اقتصادی- اجتماعی نیز می‌باشد. چرا که متان می‌تواند در حکم جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در تولید گرما و الکتریسیته و نیز سوخت خودرو استفاده شود. در این مقاله، روند تولید گاز زیستی از منبع تا مصرف‌کننده نهایی بررسی شده است. ابتدا به طور کلی زیست‌توده و روش‌های استحصال انرژی از زیست توده، منابع زیست‌توده برای تولید گاز زیستی، تاریخچه تولید گاز زیستی معرفی شده و سپس در سه بخش جداگانه مراحل تولید گاز زیستی، عوامل تأثیرگذار بر تولید گاز زیستی و اصول فناوری تولید گاز زیستی شامل انواع مدل هاضم‌بی‌هوازی با ذکر مزایا و معایب به تفصیل بیان شده است. سرانجام به بررسی چگونگی جمع‌آوری گاز زیستی خروجی از هاضم و روش‌های تصفیه گاز زیستی شامل تصفیه فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای مصرف مستقیم در تأمین انرژی گرمایی و الکتریکی و نیز به عنوان یک گزینه مناسب برای استفاده در مولدهای احتراق داخلی، ریزتوربین‌ها و پیل‌های سوختی به منظور تولید برق، پرداخته شده است.*

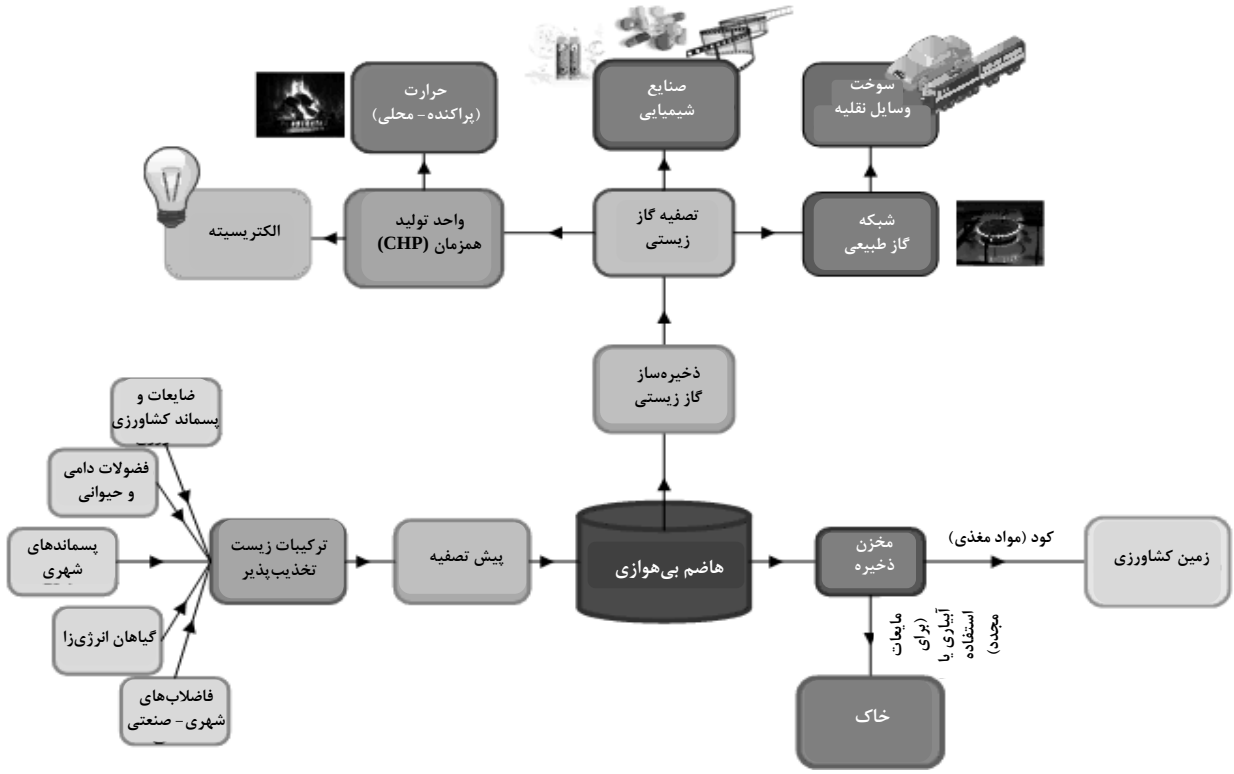
**کلیدواژه‌ها: زیست‌توده، هاضم بی‌هوازی، گاز زیستی، تصفیه گاز زیستی، تولید برق و گرما.**

## ۱. مقدمه

تجدیدناپذیری سوخت‌های فسیلی، تنوع بخشی به منابع انرژی، توسعه پایدار و برقراری امنیت انرژی، مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سوختهای فسیلی از یک سو، و پاک و تجدیدپذیر بودن منابع انرژی‌های نو چون انرژی خورشید، باد، و زیست توده، از سوی دیگر، به توجه جدی جهانیان به توسعه و گسترش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، تولید سوخت‌های جایگزین از منابع زیستی و افزایش سهم این منابع در سبد انرژی جهانی منجر شده است[۲و۱]. تقاضای جهانی انرژی به سرعت در حال رشد است و حدودا ۸۸٪ از این تقاضا در حال حاضر از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود[۳و۲]. تولید گاز زیستی از زیست‌توده به عنوان یک منبع انرژی، نه تنها به دلایل اقتصادی (سوختی که به آسانی و با قیمت ارزان در دسترس است)، بلکه به دلایل زیست محیطی می‌تواند نقش مهمی را در تأمین انرژی آینده ایفا کند[۵و۴]. مصرف انرژی حاصل از گاز زیستی به صورت متداول امروزی، از پس از جنگ جهانی دوم

* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

مطرح شد و کشورهای چین، هندوستان، فیلیپین، هلند، آلمان و آمریکا از جمله کشورهایی‌اند که در بهره‌گیری از گاز زیستی و امکان توسعه و گسترش، دربارهٔ آن به تحقیق و بررسی پرداخته‌اند[۶و۵]. در سال‌های اخیر، هدف از فناوری تولید گاز زیستی علاوه بر بازیابی انرژی، به حفاظت محیط‌زیست متوجه شده است. این پیشرفت در کشورهای توسعه‌یافته‌ای چون دانمارک و هلند که محصولات کشاورزی فراوانی دارند، به‌خوبی قابل مشاهده است. پیشنهٔ مصرف گاز زیستی در ایران به سه قرن پیش (استفاده از سوخت متان در حمام شیخ بهایی اصفهان) برمی‌گردد[۶]. گاز زیستی غنی از متان می‌تواند جایگزین گاز طبیعی، به عنوان منبعی برای تولید فرآورده‌های مختلف (مانند برق و گرما) و نیز در حکم انرژی تجدیدپذیر، به روش‌های گوناگون، بهره‌برداری شود. تولید گاز زیستی از طریق هاضم بی‌هوازی نسبت به شکل‌های دیگر انرژی زیستی از مزایای بیشتری برخوردار است، زیرا فناوری هاضم بی‌هوازی فناوریی با کارایی دامنه‌دار و دوستدار محیط زیست است و گسیل و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، با استفاده از منابع قابل دسترس محلی به‌نحو چشمگیری کاهش می‌دهد[۷و۶و۲]. مواد هضم شده را، می‌توان به عنوان کود بهساز خاک برای رشد گیاهان مصرف کرد[۹و۸و۶]. به طور کلی، گاز زیستی طیف وسیعی از کاربردها، از سنتی تا مدرن، را در بر می‌گیرد. فناوری هاضم بی‌هوازی در حال حاضر پایدارترین روش برای بهره‌گیری از محتوای انرژی، کود و نیز بازیافت مواد مغذی و کمینه‌سازی گسیل گازهای گلخانه‌ای است[۱۱و۱۰و۲]. در این مقاله، روند تولید گاز زیستی از مبدا تا مصرف‌کننده نهایی شامل: انواع منابع زیست‌توده برای تولید گاز زیستی، مراحل تولید گاز زیستی، پارامترهای تأثیرگذار بر تولید گاز زیستی، فناوری‌های مختلف تولید گاز زیستی با توجه به نوع فرایند، نوع همزن و نوع ساختار هاضم بی‌هوازی، چالش‌های سیستم‌های هضم بی‌هوازی، روش‌های جمع آوری، تصفیه و ارتقای گاز زیستی شامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای مصرف در سیستم‌های تولید برق و گرما مرور شده است. در شکل (۱)، مسیر تولید گاز زیستی را مشاهده می‌کنید که در این مقاله دربارهٔ آن بحث و بررسی می‌شود.




**شکل ۱. نموداری از تولید گاز زیستی از منبع تا مصرف‌کننده نهایی.**

## ۲. زیست‌توده و منابع زیست توده

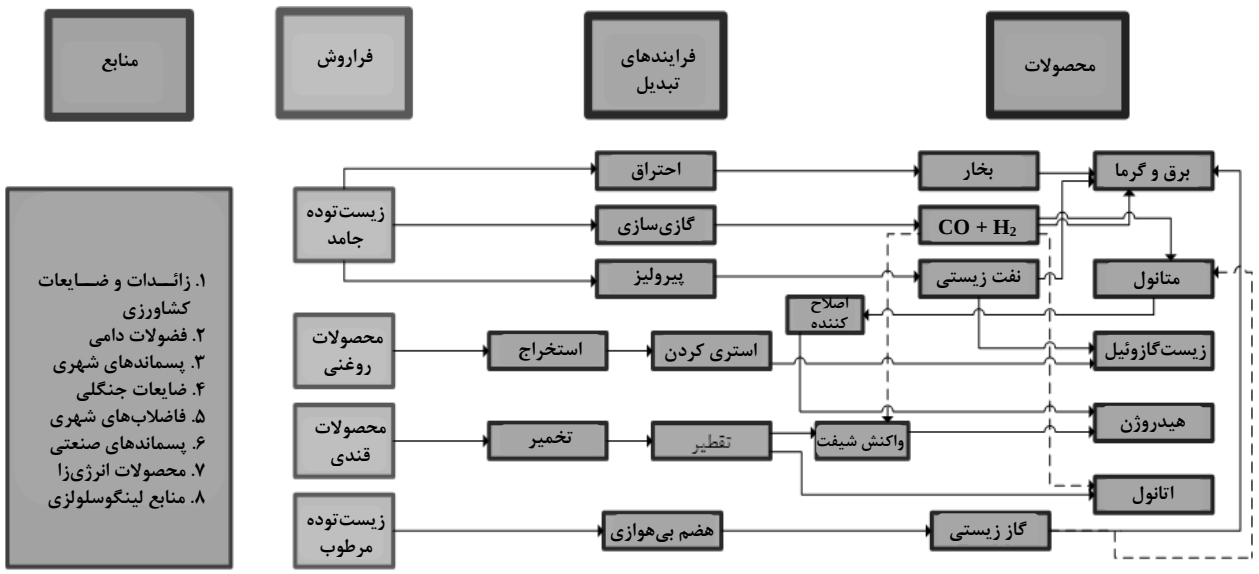
زیست‌توده عبارت است از موادی در طبیعت که در گذشته جاندار بوده یا از موجودات زنده به عمل آمده و یا پسماند، ضایعات و یا فضولات آنهاست[۱۲و۲]. منابع زیست‌توده بر اساس مقادیر کافی آن برای مصارف تجاری، قابلیت تأمین نیازها و قابلیت دسترسی به آن در مناطق مختلف، انتخاب و تقسیم‌بندی می‌شوند[۱۳و۳]. تقسیم‌بندی‌ها و دسته‌بندی‌های مختلفی نیز برای منابع زیست‌توده بیان شده است. یکی از دسته‌بندی‌های ساده، دسته‌بندی ارائه شده در مطالعه پتانسیل زیست‌توده در وزارت نیرو (۱۳۷۹-۱۳۸۰) است. مطابق نتایج مطالعه یادشده، منابع زیست‌توده به شکل:زایدات، ضایعات کشاورزی و جنگلی (هرس‌مانند)، فضولات دامی، زباله‌های (پسماندهای)شهری، فاضلاب‌های شهری، فاضلاب‌ها و پسماندهای صنعتی (عمدتاً صنایع غذایی) دسته‌بندی شده‌اند.

دسته‌بندی دیگر را وزارت انرژی آمریکا در سال ۲۰۰۶ در کتاب اطلاعات انرژی زیست‌توده ارائه کرده است. در کتاب یادشده، منابع زیست‌توده به سه دسته مواد اولیه، ثانویه، و مرتبهٔ سوم به شرح زیر دسته‌بندی شده است:

- مواد اولیه: کلیه گیاهان زمینی را شامل می‌شوند که از فتوسنتز به‌عمل می‌آیند و در خشکی و آب یافت می‌شوند.
- مواد ثانویه: کلیه زایدات (پسماند)، ضایعات و محصولات جنبی صنایع غذایی، چوبی، جنگلی و فضولات دامی را شامل می‌شود.
- مواد مرتبهٔ سوم: کلیه ضایعات، پسماندها و زائدات پس از مصرف، مانند چربی‌ها، روغن‌ها، پسماندهای جامد شهری، نخاله‌های چوبی محیط‌های شهری، زباله‌های بسته‌بندی، فاضلاب‌ها و گاز خاکچال را شامل می‌شود[۱۲و۲].

## ۳. روش‌های استحصال انرژی از زیست‌توده

همان‌گونه که در بخش قبلی اشاره شد، منابع زیست‌توده که برای تولید انرژی مناسب‌اند، طیف گسترده‌ای از مواد را دربر می‌گیرند. هرچند انواع مختلف منابع زیست‌توده شکل و ظاهر مشترکی دارند، اما تنوع چشمگیری را در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بروز می‌دهند که در مصرفشان به عنوان سوخت موثر است[۱۱]. پیشینه فرایند تبدیل زیست‌توده به نخستین آتشی می‌رسد که انسان به‌وسیله چوب افروخت. محصول نهایی فرایند این تبدیل ممکن است یک سوخت مایع، جامد یا گازی باشد؛ این انعطاف در انتخاب شکل فیزیکی سوخت، یکی از مزایای منابع زیست‌توده بر دیگر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌شمار می‌آید[۱۰،۹]. امروزه، برای منابع مختلف زیست‌توده و کاربردهای گوناگون آن، فناوری‌های پرشماری ابداع‌شده و یا در حال ابداع و گسترش‌اند. فناوری‌های تبدیل و استحصال انرژی از منابع زیست‌توده نسبتاً متنوع است، ولی به طور کلی این فناوری‌ها را می‌توان به سه دسته کلی گرماشیمیایی، زیست‌شیمیایی و شیمیایی- فیزیکی (شکل (۲)) تقسیم کرد[۱۴].




**شکل ۲. نمودار مرجع انرژی روش‌های استحصال انرژی از زیست‌توده.**

### ۳-۱ فناوری‌های شیمیایی- گرمایی

در این فناوری‌ها با گرما دادن به پسماندهای زیستی در حضور یا غیاب عوامل کمکی، انرژی تولید می‌شود. انرژی تولید شده می‌تواند به صورت انرژی گرمایی یا انرژی ثانویه باشد که از فرآورده‌های انرژی‌زا به‌دست می‌آید؛ مانند سوخت‌های جامد، مایع و گاز که می‌توانند به انرژی جنبشی یا الکتریسیته تبدیل شوند. عوامل کمکی در این فناوری‌ها می‌تواند بخار، هوا، اکسیژن، هیدروژن و مواد جامد باشند. مهمترین فناوری‌های شیمیایی- گرمایی عبارت‌اند از احتراق، پیرولیز و گازی‌سازی[۱۳].

### ۳-۲ فناوری‌های شیمیایی

فناوری‌هایی‌اند که در آن‌ها بر پایهٔ یک رشته واکنش‌ها محصول نهایی به‌دست می‌آید. از عمده‌ترین این فرایندها، تولید زیست‌گازوئیل بر اساس یک رشته واکنش‌های شیمیایی است[۱۳].

### ۳-۳ فناوری‌های زیست شیمیایی

در این فناوری‌ها، تولیدکننده انرژی عبارت است از فرآورده‌هایی که از طریق عمل سوخت و ساز موجودات زنده پدید می‌آید و به خاطر برخورداری از ارزش گرمایی بالا به عنوان سوخت به کار می‌روند. گاز متان و اتانول از مهمترین فرآورده‌ها از این دست به‌شمار می‌آیند. گاز متان از طریق فرایند هضم بی‌هوازی و اتانول به‌کمک فرایند تخمیر الکلی تولید می‌شود[۱۳و۴].

## ۴. بررسی انواع عمدهٔ منابع زیست‌توده برای تولید گاز زیستی

هرچند انواع مختلف زیست‌توده شکل و ظاهر مشترکی دارند، اما در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تنوع چشمگیری را بروز می‌دهند. به طور کلی، همه نوع زیست‌توده را درصورتی که کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، چربی‌ها و سلولز جزو مواد اصلی آنها باشد، می‌توان به عنوان خوراک هاضم در فرایند هضم بی‌هوازی قرار داد. منابع اولیه اصلی برای تولید گاز زیستی از این قرارند:

۱. ضایعات و پسماندهای محصولات کشاورزی، باغبانی، جنگلی
۲. فضولات دامی وحیوانی
۳. پسماندهای تجزیه پذیر شهری
۴. گیاهان انرژی[زا]
۵. فاضلاب‌ها (شهری- صنعتی)[۱۵و۴و۲].

## ۵. گاز زیستی

وقتی فرایند تجزیه منابع زیست‌توده به‌واسطهٔ باکتری‌ها در شرایط بی‌هوازی قرار گیرد، متان و محصولات جانبی با ارزش گرمایی متوسط(گاز زیستی) تولید می‌شود [۱۲و۲]. منابع زیست‌توده حاوی ترکیبات آلی با مولکول‌های درشت زنجیره است که در طی فرایندهای هضم (داخل خاکچال، داخل مخازن مخصوص و یا رها شده در طبیعت)، مولکول‌های یادشده شکسته و به مولکول‌های ساده‌تر تبدیل می‌شوند. حاصل نهایی این فرایند گازی است قابل اشتعال که گاز زیستی نام دارد. به گاز زیستی، گاز مرداب نیز گفته می‌شود. این گاز دارای دو جز عمده متان (و اندکی سایر هیدروکربورها) و کربن‌دی‌اکسید، به همراه مقادیر جزئی ناخالصی چون هیدروژن، هیدروژن سولفید، آمونیاک، اکسیژن، نیتروژن، و بخار آب است. ارزش گرمایی این مخلوط گازی ۱۵ تا ۲۵ مگاژول به ازای هر مترمکعب است (۴۰ تا ۷۰ درصد ارزش گرمایی گاز طبیعی) و در صورت تبدیل شدن به برق با استفاده از موتورهای گاز زیستی‌سوز موجود، می‌توان ۱/۵ تا ۳ کیلووات ساعت برق از هر مترمکعب آن به‌دست آورد[۱۶].

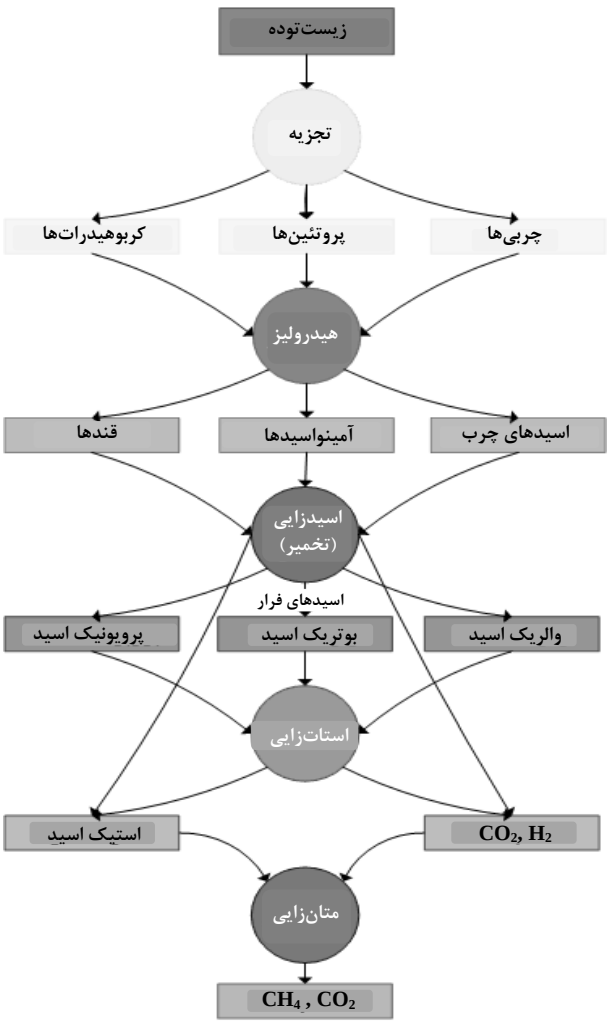
## ۶. تاریخچه تولید گاز زیستی

شناسایی گاز زیستی در جهان بیشینهٔ چندصد ساله دارد. بشر از دیرباز خروج گاه به گاه گاز طبیعی و اشتعال آن را از طبقات زیرین زمین مشاهده کرده است، اما، نخستین گزارش رسمی در این مورد در سال ۱۶۳۰ از جانب وان هلمونت منتشر شد که در آن به گازی قابل اشتعال ناشی از تخمیر مواد آلی اشاره شده است. در سال ۱۶۶۷، دانشمندی به نام شرلی این گاز را با جزئیات بیشتری تشریح کرد و هم اکنون از او به عنوان کاشف گاز مرداب یاد می‌کنند. در سال ۱۷۷۶، الکساندر ولتا دانشمند ایتالیایی به وجود یک گاز قابل اشتعال پی برد که از برکه‌هایی در نزدیکی شهر کومو در شمال ایتالیا گسیل می‌شد. بررسی‌های وی نشان داد که در صورت آمیختن این گاز با هوا، منفجر می‌شود و آتش می‌گیرد. در سال ۱۷۸۰، جوزف پریستلی وجود گازی را گزارش کرد که بر اثر

غوطه‌ور شدن مواد آلی در آب تولید می‌شد. ساختار شیمیایی متان را جان دالتون شیمیدان برجسته در سال ۱۸۰۴ شناسایی و معرفی کرد. در سال ۱۸۰۶، ویلیام هنری نیز تحقیقاتی در این زمینه انجام داد و هویت این گاز را بیشتر مشخص کرد. لویی پاستور و شاگردانش در سال ۱۸۶۸ تلاش کردند نقش ریزاندامگانها را در تولید متان از مواد آلی تعیین کنند. پوپوف در سال ۱۸۷۵ و هرتر در سال ۱۸۷۶، روی فرایند تشکیل متان از ترکیبات مختلف و نیز ترکیب محصول نهایی کار کردند. در سال ۱۸۸۴، دانشجوی لویی پاستور از تخمیر کود در ۳۵ درجه سیلیسیوس ۱۰۰ لیتر گاز متان تهیه کرد. در آن زمان پاستور عقیده داشت که گاز حاصل می‌تواند برای روشنایی و پخت و پز مصرف شود. در سال ۱۸۹۶، برای روشنایی یک خیابان در اکستر انگلستان از گازی بهره می‌بردند که از تصفیه فاضلاب خانگی در مخزن هاضم حاصل می‌شد که دونالد کامرون آن را طراحی کرده بود. در سال ۱۹۰۰، یک هاضم تولیدکننده متان از فاضلاب انسانی در هندوستان ساخته شده، که هدف از آن کنترل آلودگی بوده است. روند مطالعات و تحقیقات روی فرایند هضم بی‌هوازی و تولید متان همواره سیر صعودی پیموده و در سالهای اخیر نیز در بسیاری از کشورها به تناسب فناوری و نیاز، این روند ادامه داشته است[۱۹و۳].

## ۷. مراحل تولید گاز زیستی

سازوکار تولید گاز زیستی در فرایند هضم بی‌هوازی نسبتاً پیچیده و تحت تأثیر عوامل شیمیایی و زیست‌شیمیایی متنوعی است[۱۶و۶]، مطابق شکل (۳) این سازوکار به ۴ مرحله (در برخی مراجع ۳ مرحله) تقسیم می‌شود:




**شکل ۳. مراحل تولید گاز زیستی.**

مرحله اول: هیدرولیز، در این مرحله مواد پیچیده نامحلول به‌واسطهٔ آنزیم‌های خارج سلولی که عمدتاً از باکتریها ترشح می‌شوند، به ترکیبات پیچیده محلول شکسته می‌شوند. این ترکیبات به سیتوپلاسم یا غشاء سیتوپلاسمی باکتری وارد می‌شوند[۲۹و۲۱].

مرحله دوم: اسیدزایی، در این مرحله ترکیبات محلول درون باکتری‌های تخمیرکننده به ترکیبات دیگری تبدیل می‌شوند؛ به عبارتی دیگر در طی این مرحله ترکیبات تکپاری با وزن مولکولی کم به ترکیبات واسطه‌ای مانند پروپیانات، بوتیرات، فورمات و متانول تبدیل می‌شوند[۱۷و۴].

مرحله سوم: استات‌زایی. در این مرحله ریزاندامگانهای خاص، محصولات تخمیری را به استات، هیدروژن و کربنات تبدیل می‌کنند. کلستریدیم‌ها و استوباکترها از جمله باکتری‌های استات‌ساز معروف‌اند[۲۹و۱۷].

مرحله چهارم: متان‌زایی. تمام ترکیبات مرحله قبل به متان تبدیل می‌شوند[۱۷]. در این مرحله، از تجزیه استات حاصل در مرحله قبل که ترکیب حد واسطی است، متان تولید می‌شود[۲۹].

## ۸. عوامل تأثیرگذار بر تولید گاز زیستی

تولید گاز زیستی به مقدار زیادی تحت تأثیر شرایط عملیاتی است، به طوری که با تغییر جزئی در شرایط عملیاتی، کمیت و کیفیت گاز زیستی خروجی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. عوامل متعددی بر تجزیه بی‌هوازی و تولید گاز زیستی، و در نهایت کارآیی تولید متان تأثیر می‌گذارند که در زیر چند نمونه از این عوامل را بیان می‌کنیم[۱۹]:

### ۸-۱ دما

دما به عنوان یکی از مهمترین عوامل محیطی، بر سرعت تولید بیوگاز تأثیر می‌گذارد. باکتری‌های بی‌هوازی نسبت به تغییرات دما بسیار حساس‌اند. در نتیجه، میزان تغییرات دما نباید از ۵ درجه سیلسیوس بیشتر باشد[۱۶]. معمولاً تولید گاز زیستی در سه دمای مختلف اتفاق می‌افتد، زیر ریزاندامگانهای هضم‌کننده قابلیت عملکرد در این دماها را دارند: عمل هضم بی‌هوازی در محدوده دمایی نسبتاً وسیع ۱۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس صورت می‌گیرد. در جدول (۱) محدوده‌های متفاوت عملکرد ریزاندامگانها درج شده است[۱۹].

مناسب‌ترین دما برای تولید گاز زیستی از نظر فنی و اقتصادی حدود ۳۷ درجه سلسیوس است[ ۲۱،۲۰،۱۶،۱۴].

**جدول ۱. حدود دمایی عملکرد ریزاندامگانها[۲۰و۱۹].**

| تخمیر (نوع ریزاندامگان) | حد پایین (°C) | حد متوسط (°C) | حد بالا (°C) | زمان تخمیر |
|---|---|---|---|---|
| سرمادوست[1] | ۴ | ۱۵-۱۸ | ۳۰ | بیش از ۱۰۰ روز |
| میان دما دوست[2] | ۱۵ | ۲۸-۳۳ | ۴۵ | ۳۰-۶۰ روز |
| گرمادوست[3] | ۲۵ | ۵۰-۶۰ | ۸۰ | ۱۰-۱۵ روز |

#### ۸-۱-۱ روش‌های گرمایش هاضم

روش‌های مختلفی برای عمل گرمایش هاضم با دبی بالای خوراک در دسترس است. عمده ترین این روش‌ها عبارت‌اند از عبور مداوم محتویات داخل مخزن از یک مبدل حرارتی نصب شده در بیرون هاضم، عبور آب گرم از درون پیچه‌های حرارتی نصب شده در درون هاضم، عبور آب گرم از درون پوشش اطراف هاضم و تزریق مستقیم بخار آب به درون هاضم[۱۹].

### ۸-۲ اسیدیته

اسیدیته عامل دیگری است که بر تولید بیوگاز تأثیر می‌گذارد[۱۹]. در واقع، در ابتدای راه‌اندازی سیستم، اسیدیته حالت بازی دارد و به تدریج حالت اسیدی پیدا می‌کند. اسیدیته مناسب برای فعالیت بهینه هاضم‌های بی‌هوازی در محدوده ۶/۲ تا ۷/۶ یا همان ۷ خنثی است. در صورتی که اسیدیته از گسترهٔ خنثی خارج شود، با افزودن یک مجموعه مواد آن را کنترل می‌کنند[۲۰و۱۴].

### ۸-۳ ترکیب زیست‌توده ورودی

ترکیب مواد اولیه (نوع مواد و گیاهانی که در تغذیه حیوانات مصرف می‌شود) و این‌که کدام یک از منابع زیست‌توده خوراک را تشکیل دهند، نیز دارای اهمیت زیادی است. هرقدر مواد اولیه از

1. Psychrophil
2. Mesophil
3. Thermopile

لحاظ مواد پروتئینی و سایر مواد مغذی غنی‌تر باشد، شروع فعالیت در سیستم سریع‌تر و میزان گاز تولیدی بیشتر می‌شود[۲۰].

**۸-۴ مواد مغذی**

باکتری‌های بی‌هوازی برای سوخت‌وساز و ادامهٔ حیات و ترمیم سلولهای خود نیاز به مواد غذایی مناسب شامل نیتروژن، فسفر، سولفور، کربن، منیزیم، سدیم، منگنز، کبالت، آهن، روی و امثال آن دارند. مقدار و نسبت این مواد در کنترل و نحوهٔ عملکرد واکنش‌های ریزاندامگانها بسیار مهم است. این مواد معدنی می‌توانند درون فاضلاب یا زیست‌توده ورودی باشد یا اینکه به هاضم اضافه شود[۲۰و۱۴].

**۸-۵ دبی ورودی به راکتور (سرعت بارگیری سیستم)**

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی هاضم، سرعت بارگیری است که بیانگر مقدار مواد جامد تجدید پذیر در واحد حجم خوراک ورودی به هاضم است. بالا بودن بیش از حد سرعت بارگیری، یا به بیان دیگر، پایین بودن بیش از اندازه زمان اقامت در هاضم، باعث کاهش مقداراسیدیته می‌شود و عملکرد باکتری‌هایی متان ساز را متوقف می‌کند و فرایند را به مرحله‌ای سوق می‌دهد که از لحاظ زیست محیطی متوقف شود. وقتی تخمیر اسیدی غالب شود، موادی با بوی زننده نظیر هیدروژن سولفید و آمین‌های نوع اول تولید می‌شوند. بنابراین، ایجاد موازنه بین نسبت تخمیر اسیدی و تخمیر متانی مانع از ایجاد بوی زننده می‌شود[۱۹و۴]. این‌که روزانه چه حجمی زیست‌توده و چه مقدار ماده خشک وارد واحد تولید گاز زیستی شود، خیلی تأثیرگذار خواهد بود. مطالعات نشان داده‌اند که هرچه دبی بیشتر باشد تولید گاز زیستی نیز بیشتر خواهد بود.

**۸-۶ مواد سمی**

بالا بودن غلظت مواد غذایی مورد نیاز ریزاندامگانها بیش از محدوده مورد نیاز آنها و یا وجود یک مجموعه ترکیبات زیانبار، یک ماده سمی تلقی و باعث کاهش در رشد زیستی ریزاندامگانها می‌شود. وجود مواد سمی نظیر آنتی‌بیوتیک‌های موجود در فضولات ماکیان از عوامل بازدارندهٔ فرآیند تخمیر به‌شمار می‌آید و وجود سولفات‌ها می‌تواند باعث کاهش تولید گاز شود. همچنین، سایر موادی که به اختلال در تولید گاز زیستی منجر می‌شوند، شامل اکسیژن، غلظت بالای نیتروژن (مقدار اندک آن لازم است)، فلزات سبک، بنزن‌ها، فنول‌ها و دیگر مواد هستند[۱۹۴و۲].

**۸-۷ تأثیر نسبت کربن- نیتروژن- فسفر**

باکتری‌های بی‌هوازی برای زنده ماندن و انجام فعالیت‌های خود به کربن و نیتروژن نیاز دارند. باکتری‌های بی‌هوازی معمولاً کربن را به عنوان منبع انرژی برای رشد و نمو، نیتروژن را برای ساختن دیواره سلولی خود مصرف می‌کنند؛ مقادیر کافی نیتروژن و فسفر برای فرایند تخمیر بی‌هوازی باید در دسترس باشد؛ نسبت این مواد در کنترل واکنش‌ها بسیار مهم است؛ میزان مصرف کربن نسبت به نیتروژن ۳۰ تا ۳۵ بار سریع‌تر است[۲۲].

**۸-۸ میزان رطوبت و آب مورد نیاز**

میزان آب مواد اولیه که باید تخمیر شوند در حدود ۹۰ درصد وزن کل مواد را تشکیل می‌دهد. افزایش و یا کاهش زیاد از حد رطوبت مواد در مخزن تخمیر، تأثیر بسزایی در تولید گاز دارد[۲۰و۱۴].

**۸-۹ درجه غلظت مواد**

برای این‌که باکتری‌ها بتوانند مواد آلی را جذب کنند، لازم است که مواد به صورت محلولی رقیق درآیند. در مخازن زیست‌گاز، بهترین غلظت مواد برای عملیات تخمیر بی‌هوازی در حدود ۷ الی ۹ درصد مواد جامد است. ازدیاد غلظت مواد موجب افزایش چسبندگی و مانع رشد باکتری‌ها و کاهش غلظت موجب لایه لایه شدن محلول می‌شود، که مستلزم همزدن مداوم محلول است. معمولاً مواد اولیه به‌کار رفته در تخمیر بی‌هوازی غلظت زیادی دارند و لازم است تا با نسبت معینی از آب رقیق شوند[۲۰و۱۹].

**۸-۱۰ مدت زمان ماند مخلوط در مخزن هاضم**

این مدت زمان در واقع فاصله بین زمان ورود حجم مشخصی از خوراک از طریق لوله ورودی به مخزن هاضم، و زمان خروج آن از طریق لوله خروجی به‌شمار می‌آید. زمان ماند بسیار حائز اهمیت است زیرا هرگاه مواد ورودی به اندازه کافی درون مخزن باقی نمانند و روند هضم و تخمیر کامل نشود، زیست‌گازی تولید نخواهد شد. تولید گاز با افزایش زمان ماند، روند افزایشی دارد؛ به بیان دیگر، تولید گاز متان با زمان ماند طولانی‌تر، بیشتر خواهد شد[۱۹و۴و۳].

### ۸-۱۱ اختلاط محتویات

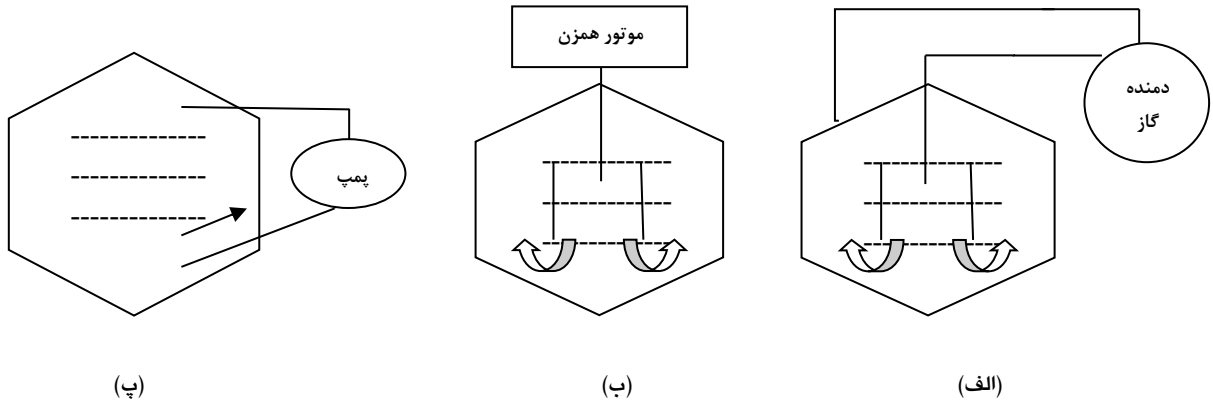
یکنواخت نگه‌داشتن محلول از نظر غلظت و دما در سرعت تکثیر باکتری‌ها تأثیر مثبت دارد. همزدن مواد داخل محفظه تخمیر که با افزودن روزانه مواد به محفظه تخمیر صورت می‌گیرد، موجب تحریک بیشتر باکتری‌ها و در پی آن تولید گاز می‌شود[۲۲]. همزدن محتویات و ایجاد محلولی یکنواخت در هاضم، می‌تواند باعث افزایش تولید گاز و بالا رفتن کارآیی هاضم‌های بی‌هوازی شود[۱۴].

### ۸-۱۱-۱ روش‌های اختلاط در هاضم

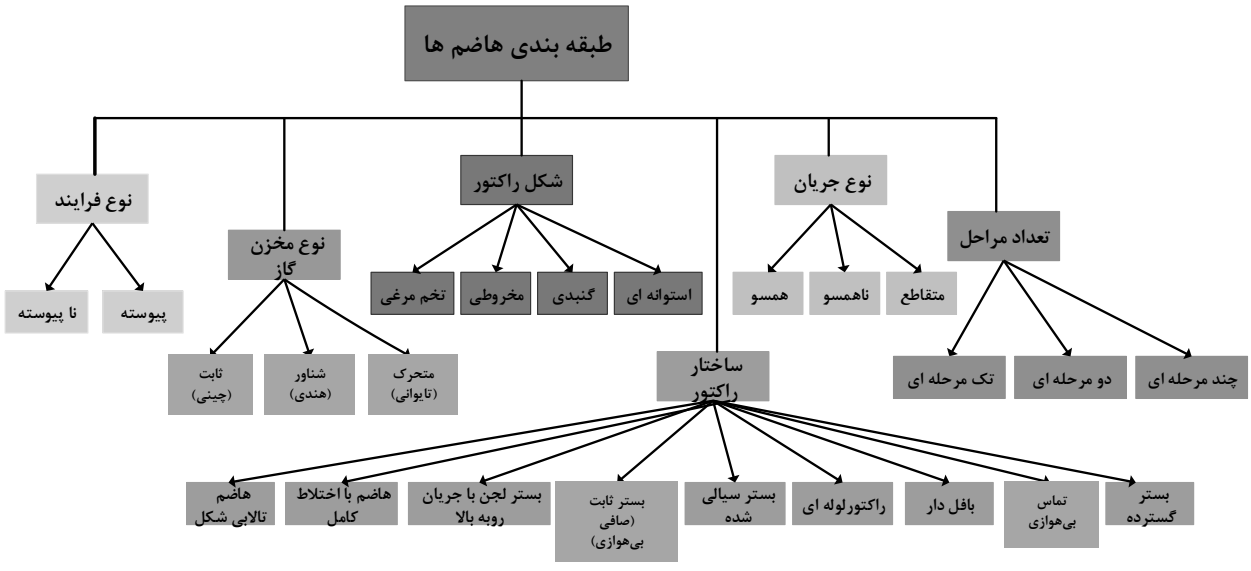
همانطور که در بالا گفته شد، عمل آمیختن مواد درون هاضم باعث افزایش تولید گاز زیستی می‌شود. بنابراین، تجهیزات و روش‌های متفاوتی برای اختلاط نظیر اختلاط به‌واسطهٔ گاز، اختلاط مکانیکی و اختلاط به‌کمک پمپ، پیشنهاد شده است[۱۹] در شکل (۴) انواع سیستم‌های اختلاط در هاضم‌ها را مشاهده می‌کنید.

## ۹. اصول فناوری تولید گاز زیستی

تنوع راکتورهای تولیدکننده گاز زیستی از لحاظ طراحی، سرعت و عملکرد فراوان است[۴و۲]، مثلاً، هاضم بی‌هوازی یک روش زیستی برای تجزیه و ثبات ریزاندامگانها، تجزیه زیستی مواد خام دریک روش کنترل شده است. معیارهای مختلفی برای طبقه‌بندی هاضم‌ها وجود دارد که در شکل (۵) نموده شده‌اند.




**شکل ۴. روش‌های اختلاط در هاضم: (الف) اختلاط به‌کمک گاز؛ (ب) اختلاط مکانیکی؛ (پ) اختلاط با پمپ[۱۹].**




**شکل ۵. طبقه‌بندی هاضم‌ها بر اساس معیارهای مختلف.**

### ۹-۱ طبقه‌بندی هاضم‌ها از نظر نوع فرایند

امروزه تقسیم‌بندی‌های مختلفی مطرح شده‌اند ولی در اینجا متداول‌ترین آنها ذکر شده است.

#### ۹-۱-۱ پیوسته[1]

در هاضم های جریان پیوسته(شکل (۶)- الف)، با توجه به اسمشان، خوراک در فواصل زمانی منظم وارد مخزن می‌شود. در شرایط نظری برای رسیدن به بیشینه بازده، خوراک باید به طور مداوم وارد مخزن شود ولی به دلایل عملی مخزن به طور دائم تغذیه نمی‌شود و متداول‌ترین دوره ورود خوراک روزانه است. برای فراهم آمدن شرایط پایا در سیستم، لازم است به همان میزان تغذیه روزانه عمل تخلیه از مخزن نیز انجام گیرد. در این روش، می‌توان حجم ثابتی از گاز را با خوراک معین به صورت روزانه تولید کرد. در طراحی نیروگاه‌های بزرگ معمولاً از این روش استفاده می‌شود[۱۴].

#### ۹-۱-۲ ناپیوسته[2]

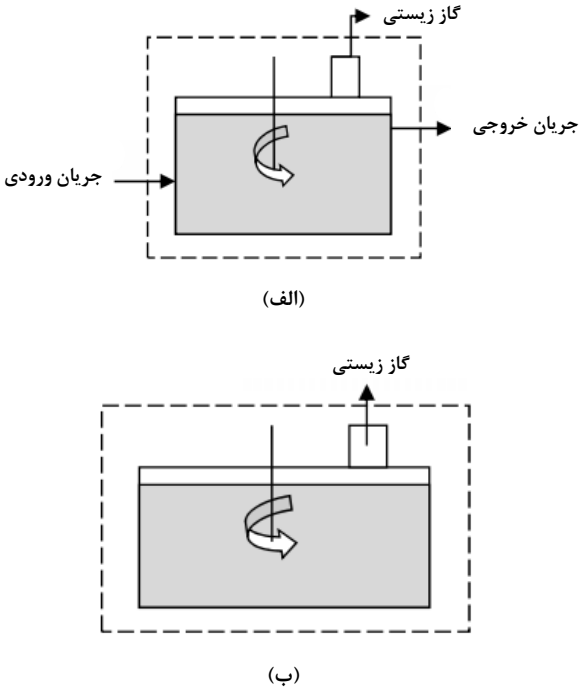
در هاضم‌های ناپیوسته (شکل (۶)- ب)، مواد آلی در یک مخزن قرار گرفته و سپس به طور بی هوازی با توجه به نوع خوراک در یک دوره زمانی دو تا شش ماهه هضم می‌شوند. کاربرد اصلی این گونه هاضم‌ها آنجاست که بخواهند قبل از ساخت یک واحد صنعتی کامل، آزمایشهایی را روی یک ماده زائد خاص به منظور تعیین میزان تجزیه پذیری آن به عمل آورند[۱۹].

### ۹-۲ طبقه‌بندی هاضم‌ها از نظر نوع جریان

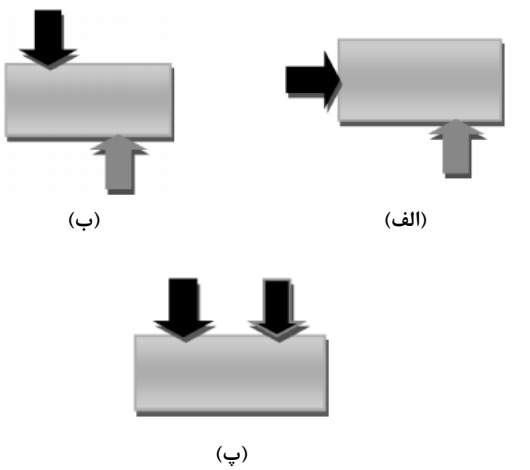
بسته به این‌که خوراک زیست‌توده مورد نظر چگونه وارد می‌شوند و محصولات تولیدی چگونه خارج می‌شوند، راکتورها را به سه گروه همسو، ناهمسو و متقاطع (شکل (۷)) تقسیم می‌کنند[۲۰].

### ۹-۳ طبقه‌بندی هاضم ها از نظر شکل راکتور

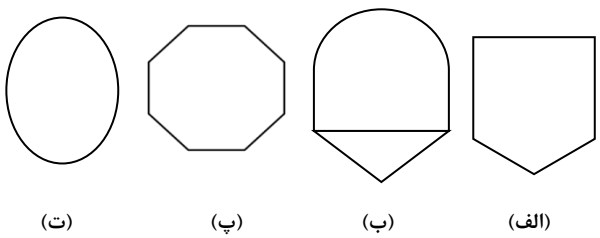
مخازن هضم شکل‌های گوناگونی دارند. در شکل (۸) بعضی از این اشکال را که در حال حاضر در واحدهای تصفیه فاضلاب به‌کار می‌روند، مشاهده می‌کنید.




**شکل۶. نمایی از راکتور (الف) با عملکرد پیوسته؛ (ب) با عملکرد ناپیوسته[۱۹].**




**شکل۷. انواع هاضم از نظر نوع جریان: (الف) جریان متقاطع؛ (ب) جریان ناهمسو؛ (پ) جریان همسو[۲۰].**




**شکل ۸. شکل‌های مختلف هاضم: (الف) استوانه‌ای؛ (ب) گنبدی؛ (پ) مخروطی؛ (ت) تخم مرغی[۱۹].**

1. Continious
2. Batch

**۹-۳-۱ نوع استوانه‌ای**

هرچند این نوع طراحی متداول است اما دارای فضای مرده زیادی است، به طوری که عمل آمیختگی به طور کامل در تمام حجم مرده انجام نمی‌گیرد.

**۹-۳-۲ نوع گنبدی**

این نوع مخزن به علت مقاومت در برابر فشارهای بالا می‌تواند در ابعاد بزرگ ساخته شود.

**۹-۳-۳ نوع مخروطی**

این نوع مخزن دارای فضای مرده خیلی کمی است و یا به بیان دیگر، در این حالت عمل اختلاط به طور مؤثر انجام می‌شود و لجن تولیدی نیز به راحتی تخلیه می‌شود.

**۹-۳-۴ نوع تخم مرغی**

ساخت این نوع مخزن در تصفیه فاضلاب شهری از سال ۱۹۶۰ در آلمان غربی متداول بوده است. این نوع هاضم یک طراحی مطلوب محسوب می‌شود، زیرا انتهای مخزن دارای شیب مناسبی است که عمل تخلیه لجن ته‌نشین شده را میسر می‌کند. هاضم‌های تخم مرغی شکل را معمولاً از بتن می‌سازند، بنابراین، به علت مقاومت زیاد می‌توان آنها را در ابعاد بزرگ هم ساخت[۱۹].

**۹-۴ طبقه‌بندی هاضم‌ها از نظر نوع سیستم جمع‌آوری گاز**

از نظر نوع و چگونگی کارکرد، دستگاه‌های متفاوتی در جهان ساخته بهره‌برداری شده‌اند که سه نوع متداول آنها عبارتند از:

**۹-۴-۱ مدل چینی: دستگاه زیست‌گاز با مخزن گاز ثابت**

با توجه به این‌که چینی‌ها مبتکر اولیه این نوع دستگاه هستند، به مدل چینی مشهور شده و به صورت مخزن گنبدی‌شکل و در عمق زمین ساخته می‌شود. در این سیستم، مخزن گاز و تخمیر مشترک است و به علت قرارگیری دستگاه در عمق زمین، صرفه‌جویی در مکان و فضای مورد نیاز و تثبیت گرما و مقاومت دستگاه در مناطق سردسیری باعث شده که به اهمیت و کارآیی آن افزوده شود. در شکل ((۹)- الف) طرح اصلی دستگاه را مشاهده می‌کنید[۱۹]. گاز حاصل در قسمت فوقانی هاضم ذخیره می‌شود. هنگامی که تولید گاز آغاز می‌شود، لجن تخمیری به سمت مخزن خروجی یا دفع لجن جابه‌جا می‌شود. تولید بیشتر گاز به افزایش فشار گاز ذخیره شده می‌انجامد؛ به همین دلیل حجم هاضم را بیش از ۲۰ مترمکعب در نظر نمی‌گیرند. اگر میزان گاز در مخزن ذخیره شده اندک باشد، فشار گاز پایین خواهد بود[۲۳].

**۹-۴-۲ مدل هندی: دستگاه زیست‌گاز با سرپوش شناور (مخزن گاز متحرک)**

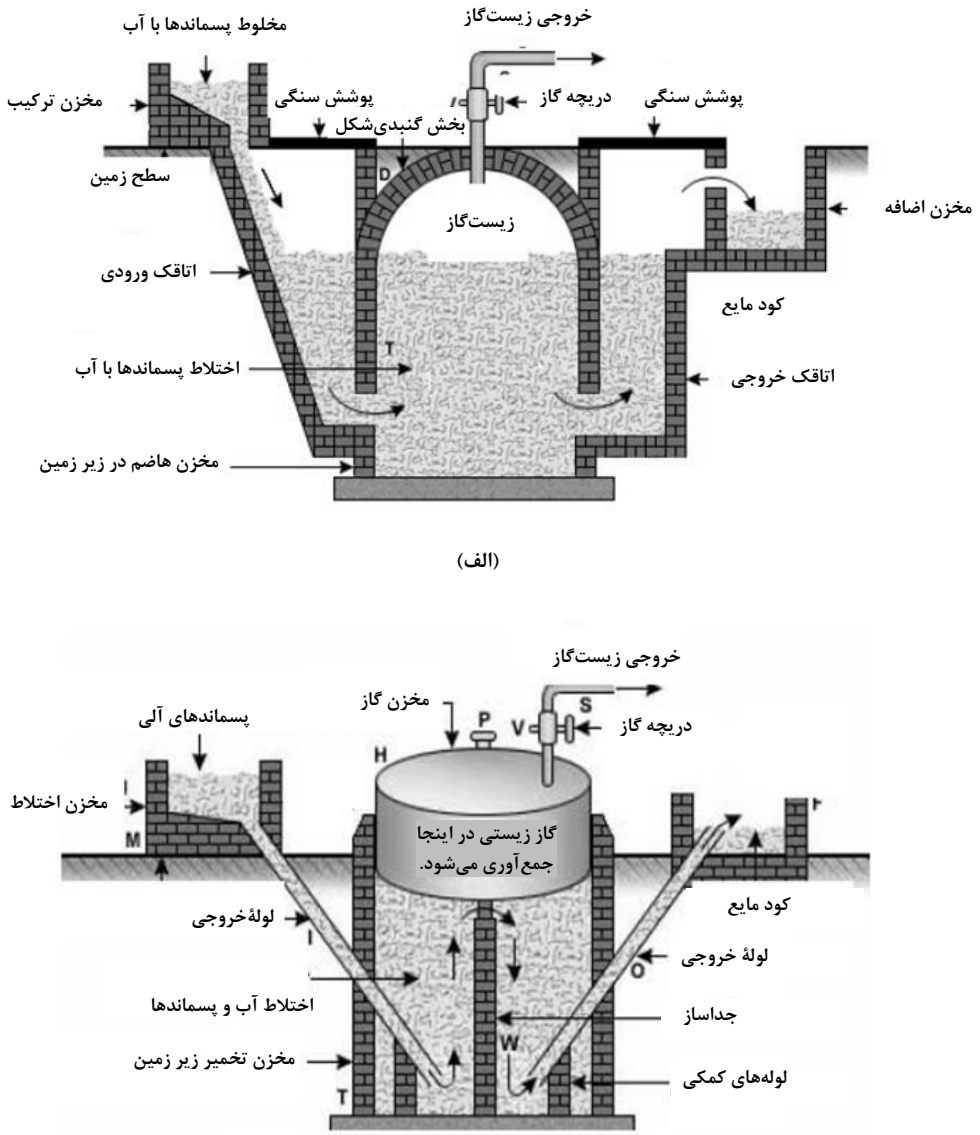
این دستگاه در هند طرفدار زیادی داشته و هزاران دستگاه از آن در هندوستان در حال تولید زیست‌گازند. مواد اولیه از حوضچه ورودی پس از اختلاط با آب به داخل مخزن تخمیر که در داخل زمین قرار دارد هدایت می‌شود و پس از تولید گاز، مواد تخمیر شده به طرف حوضچه خروجی که در امتداد حوضچه ورودی قرار گرفته حرکت می‌کند و گاز تولیدی در داخل محفظه فلزی که به صورت معکوس روی دهانه مخزن تخمیر قرار گرفته، جمع‌آوری می‌شود[۱۷]. مخزن نگهدارندهٔ گاز یا بر روی لجن تخمیری و یا در پوسته (ژاکت) آب مخصوص به خود شناور است. گاز متصاعد شده در مخزن شناور جمع‌آوری می‌شود. اگر گاز مصرف شود، مخزن مجدداً به حالت اول بر می‌گردد. نمودار کلی این دستگاه را در شکل ((۹)- ب) مشاهده می‌کنید[۲۳].

**۹-۴-۳ دستگاه زیست‌گاز وگاز مدل تایوانی**

این دستگاه می‌تواند از جنس‌های مختلفی چون فلزات، پی‌وی‌سی و پشم‌شیشه ساخته شود. نسبت طول به عرض در این سیستم زیاد است. نوع جریان در آن پیستونی و زمان ماند میکروبی و هیدرولیکی آن به دلیل نداشتن لجن برگشتی با یکدیگر برابر و حدود ۶۰ روز است[۱۷].

**۹-۵ طبقه‌بندی هاضم‌ها از نظر ساختاری**

هاضم‌های بی‌هوازی از نظر ساختاری انواع گوناگونی دارند، به طوری که با توجه به نحوه نصب و تجهیزات و کاربرد آنها می‌توان مدل‌های مختلفی از واحدهای تولید زیست‌گاز را طراحی کرد که شرح مختصری از آنها از این قرار است:




**شکل ۹. واحد زیست‌گاز: (الف) با مخزن ثابت (مدل چینی)؛ (ب) با مخزن متحرک (مدل هندی)[۲۳و۱۷].**

**۹-۵-۱ هاضم‌های بی‌هوازی تالابی شکل پوشیده شده**[1]

فناوری تصفیه بی‌هوازی به‌وسیله لاگون، یک فرایند میکروبی با سرعت پایین است. لاگون‌های بی‌هوازی با پوشش خاصی پوشانده شده‌اند و در محدودهٔ سرمادوست یا دمای محیط بهره‌برداری می‌شوند. سرعت هضم در داخل لاگن ها تحت تأثیر تغییرات دمایی فصلی است. فاضلاب از یک طرف راکتور وارد می‌شود و مدت زمان طولانی را در آنجا سپری می‌کند. این راکتورها با نگهداری زیست‌توده در درون خود (که مستقل از فاضلاب ورودی است) دارای سرعت واکنش زیادی در واحد حجم راکتورند. یعنی، زمان ماند سلولی در این راکتورها بالا و از طرفی این زمان مستقل از زمان ماند هیدرولیکی است. از سوی دیگر، میزان آلودگی بیشتری را می‌توان به این راکتورها وارد کرد[۲۹]. در شکل ((۱۰)- الف) هاضم بی‌هوازی تالابی شکل را مشاهده می‌کنید.

1. Covered Anaerobic Lagoon Digester

**۹-۵-۲ هاضم با اختلاط کامل**

هاضم اختلاط کامل یکی از پرکاربردترین هاضم‌های بی‌هوازی است. هاضم‌های صنعتی زیادی برای هضم لجن و سایر پسماندها از این نوع ساخته شده‌اند. هاضم با اختلاط کامل یا دبی زیاد خوراک به واحدی می‌گویند که دارای سیستم همزن به منظور رسیدن به اختلاط کامل و نیز وسیله‌ای برای گرمایش سیستم به منظور اطمینان از انجام واکنش در دمای بهینه باشد[۲۵و۱۹]. اکثر این هاضم‌ها در ناحیه میانه گرمادوست و بعضی از آنها در ناحیه گرمادوست بهره‌برداری می‌شوند. سیستم گرمایش این هاضم‌ها ممکن است داخل هاضم یا بیرون هاضم باشد. در شکل ((۱۰)- ب) هاضم با اختلاط کامل را مشاهده می‌کنید.

**۹-۵-۳ راکتور بی‌هوازی بالارو با لجن گرانوله[1]**

این راکتورها که به راکتور UASB نیز شناخته می‌شوند، در اواخر دهه ۷۰ میلادی در هلند در خصوص ارتقای سپتیک تانک‌ها ابداع و بهره‌برداری شدند[۱۹و۱۸]. راکتور UASB نوعی هاضم تولیدکننده متان است که با به کارگیری فرایند و ریزاندامگانهای بی‌هوازی، لجن دانه‌ای تشکیل می‌دهد. این روش شامل یک راکتور بی‌هوازی (شکل (۱۰)- پ) است که فاضلاب از بخش پایین آن وارد می‌شود و در حین حرکت رو به بالای خود با توده لجن (توده ریزاندامگانها) که به صورت گرانول هستند، تماس می‌یابد. این تماس سبب جذب مواد آلی فاضلاب توسط ریزاندامگانها و تجزیه آنها طی فرایندهای زیستی می‌شود. از جمله مزایای این روش عدم نیاز به اختلاط مکانیکی و جریان بازگشتی لجن است[۱۹].

**۹-۵-۴ هاضم بی‌هوازی بستر ثابت[2] (فرایند صافی بی‌هوازی[3])**

راکتورهای پیش تصفیه بستر ثابت دارای فرایند هضم چند مرحله‌ای با اختلاط کامل است که از نوع فرایند دوگانه بی هوازی تماسی و لجنی لایه‌ای با جریان بالارو است. دیگرخصوصیات مهم سیستم‌های پیش تصفیه بستر ثابت، تولید لجن اندک است که با توجه به مشکلات مربوط به تصفیه و دفع لجن، امتیاز بسیار مثبتی نسبت به دیگر روشهاست[۲۵و۱۸]. هاضم‌های ثابت بستر بر اساس جهت جریان ورودی در آنها، ممکن است خود به دسته هایی دیگر طبقه‌بندی شوند؛ در شکل ((۱۰)- ت) یک راکتور ثابت بستر با جریان بالارو را مشاهده می‌کنید[۲۹]. راکتور شامل محیط متخلخلی است که می‌تواند از خرده‌های سنگ و چوب گرفته تا قطعات پلاستیکی با ابعاد و اشکال مختلف ساخته شود. ریزاندامگانهای انباشته شده، علاوه بر این‌که در فضای خالی بستر قرار می‌گیرند، به سطح خود بستر نیز می‌چسبند[۱۹].

**۹-۵-۵ راکتور بستر سیالی شده بی‌هوازی[4]**

این نوع راکتور زمانی به‌کار می‌رود که میزان محتویات جامد زیست‌توده پایین باشد. در راکتورهای بستر سیال بی‌هوازی، باکتری‌ها به صورت یک لایه میکروبی بر روی سطح ذرات حامل رشد می‌کنند. این ذرات حامل می‌توانند جامداتی چون شن، کربن فعال، کوارتز، آلومینا، آنتراسیت و کریستو بالیت باشند. برای بهبود در عملکرد انتقال جرم در فرایند بی هوازی استفاده از بستر با ذرات کوچکتر و نسبت سطح به حجم بالا توصیه شده است و این امر به طراحی نوعی راکتور بی‌هوازی انجامیده که در آن بستر قابلیت انبساط و یا شناور شدن در مایع را دارد[۲۹]. میکروب‌های بی‌هوازی بر روی سطح بستر رشد می‌کنند و حجم ظاهری بستر را افزایش می‌دهند. از این رو این راکتور، راکتور بستر گسترده نام‌گذاری شده است. در شکل ((۱۰)- ث) راکتور بستر سیالی شده بی‌هوازی را مشاهده می‌کنید.

**۹-۵-۶ هاضم‌های لوله‌ای[5]**

مخزن‌های بتنی باریک و طویل با پوشش سفت و انعطاف‌پذیرند، که از یک سمت مواد خام وارد و از سمت دیگر مواد تخمیر شده خارج می‌شود. این هاضم را می‌توان از مصالح و مواد گوناگونی ساخت. این هاضم شامل محفظه‌ای است که با سیمان یا پوشش غیر قابل نفوذ دیگری اندود می‌شود. به منظور اطمینان از ایجاد جریان پیستونی[6]، این سیستم را طوری طراحی می‌کنند که طول آن از عرض و عمقش به طور چشمگیری زیادتر باشد؛ این هاضم دارای یک سرپوش برای نگهداری گاز از جنس بتون یا آهن گالوانیزه است. ورودی و خروجی در این هاضم‌ها در دیواره‌های جانبی مقابل یکدیگرند. این نوع هاضم ها در عملیات کشاورزی برای تثبیت کود و فضولات دامی به‌کار می‌رود[ ۲۵]. در شکل ((۱۰)- چ) هاضم لوله‌ای شکل را مشاهده می‌کنید.

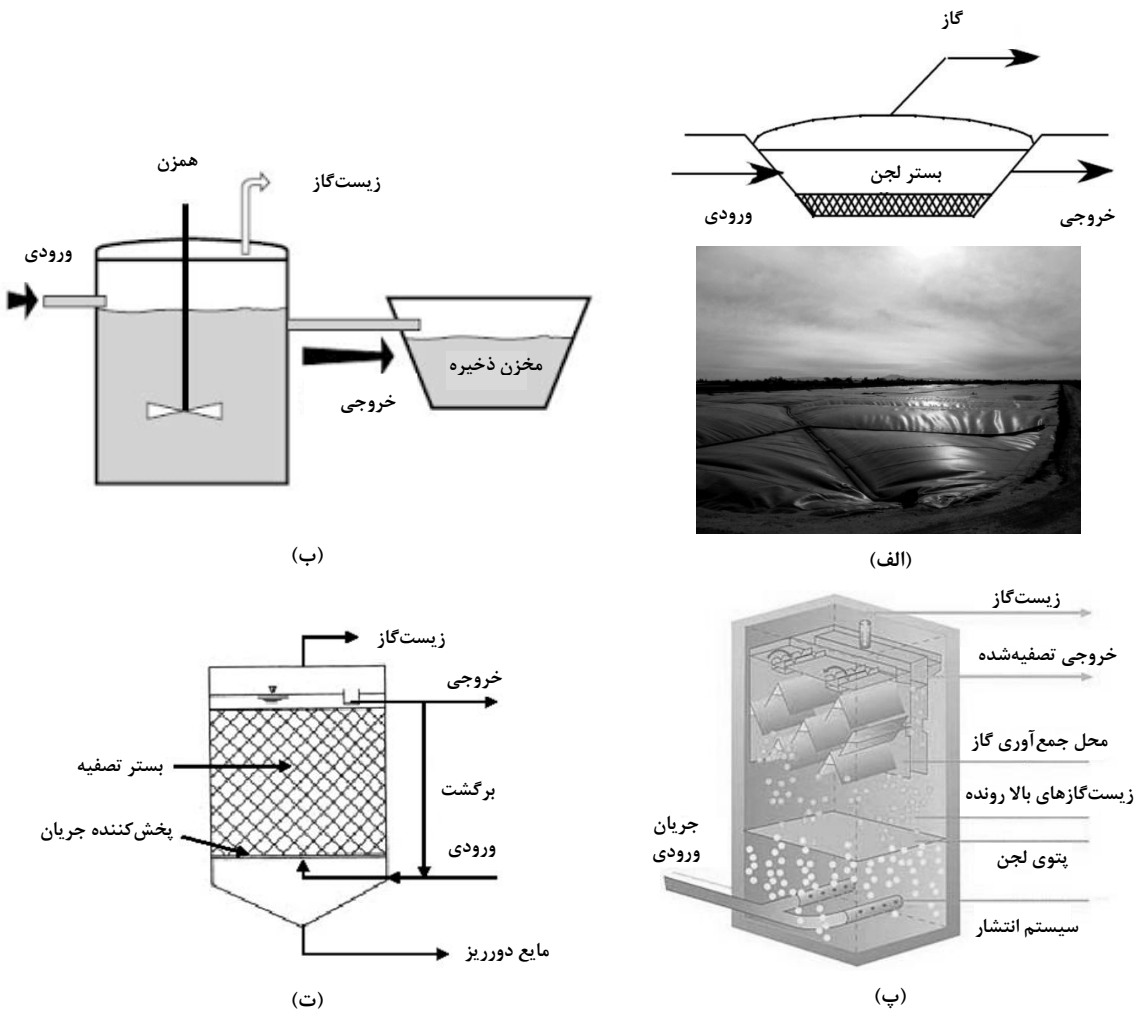
1. Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket
2. Anaerobic Fixed-Bed Reactor
3. Anaerobic Filter Process
4. Anaerobic Fluidized Bed (AFB) Reactor
5. Plug Flow Digester
6. Plug

### ۹-۵-۷ راکتورهای تماس بی‌هوازی

این نوع هاضم‌ها در واحدهای تصفیه فاضلاب شهری و به منظور تخمیر بی‌هوازی لجن به جا مانده از فرایندهای هوازی به کار برده می‌شود. در این فرایند، مانند فرایند لجن فعال قسمتی از لجن ته‌نشین می‌شود، پس از مخلوط شدن با خوراک ورودی دوباره به داخل راکتور بازگردانده می‌شود. باکتری‌های موجود در لجن برگشتی، خوراک تازه را از باکتری‌های فعال غنی می‌کنند و در نتیجه فرایند تخمیر بلافاصله روی خوراک شروع می‌شود؛ از آنجا که باکتری‌ها مرتباً به داخل سیستم بازگردانده می‌شوند، بنابراین زمان اقامت مؤثر باکتری‌ها در سیستم بسیار طولانی‌تر از زمان اقامت جریان مایع در سیستم است[۱۹]. در شکل ((۱۰)- ج) راکتور تماس بی‌هوازی را مشاهده می‌کنید.

### ۹-۵-۸ راکتورهای بی‌هوازی بافل‌دار[1]

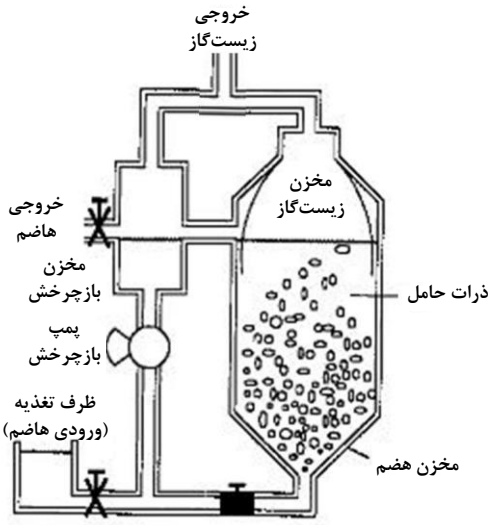
راکتور بی‌هوازی بافل‌دار، راکتوری است که مطابق با شکل ((۱۰)- ح) در آنها ردیف‌هایی از بافل‌ها قرار گرفته، تا سبب حرکت جریان فاضلاب از بالا و پایین بافل‌ها شود. باکتری‌های موجود در راکتور بر اساس خصوصیات رفتاری جریان ممکن است معلق بمانند یا ته‌نشین شوند[۲۹]. هاضم‌های بی‌هوازی بافل دار در واقع به دلیل وجود بافل‌های موجود، مخازن سپتیک بهبود یافته‌اند که فاضلاب ورودی را مجبور به تلاطم و جریان یافتن می‌کنند؛ همچنین سبب افزایش زمان تماس با لجن می‌شوند. در نتیجه تصفیه را بهبود می‌بخشند[۲۸].



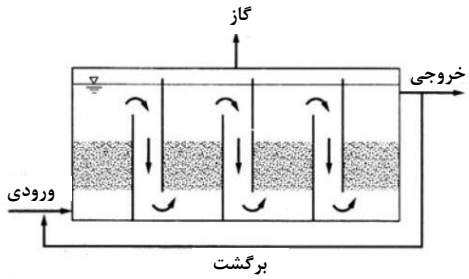

**شکل ۱۰. ساختارهای مختلف هاضم بی‌هوازی: (الف) هاضم بی‌هوازی تالابی؛ (ب) هاضم با اختلاط کامل؛ (پ) راکتور لجن بی‌هوازی بالارو با لجن گرانوله؛ (ت) راکتور بستر ثابت؛ (ث) راکتور بستر سیالی شده بی‌هوازی، (چ) هاضم لوله‌ای، (ج) راکتور تماس بی‌هوازی؛ (ح) رآکتور بی‌هوازی بافل‌دار[۲۹و۲۸و۲۵و۱۹و۱۸].**

1. Anaerobic Baffeled Reactor

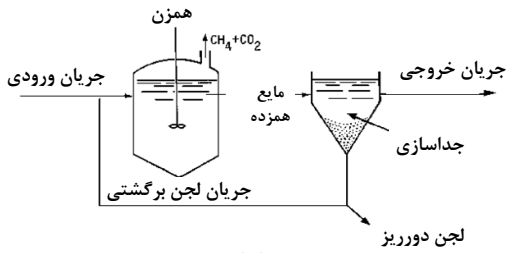
(چ)




(ث)




(ح)




(ج)

**ادامه شکل ۱۰**

### ۹-۶ طبقه‌بندی هاضم‌ها از نظر تعداد مراحل

با توجه به نوع زیست‌توده ورودی و ترکیبات آن، فرایند هضم بی‌هوازی می‌تواند به چند دسته تقسیم شوند: فرایند تک مرحله‌ای، دو مرحله و چند مرحله‌ای.

#### ۹-۶-۱ فرایند تک مرحله‌ای

فرایند تک مرحله‌ای زمانی است که مراحل هضم بی‌هوازی به موقع و در زمان مناسب مربوط به خود انجام گیرند. زمانی که هر یک از مراحل زمان بر باشد بیش از یک راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۹-۶-۲ فرایند دو مرحله‌ای

فرایندهای دو مرحله‌ای هضم بی‌هوازی از جمله فرایندهای پر سرعت برای تولید متان هستند. در این روش با جداسازی فازهای جامد و مایع، امکان انجام واکنش هضم بی‌هوازی و تولید متان با سرعت زیاد را فراهم می‌آورند. در این سیستم‌ها مرحله هیدرولیز و اسیدسازی در یک راکتور جداگانه انجام و خروجی راکتور وارد راکتور دیگر و در مرحله متان‌سازی قرار می‌گیرد[۱۹].

#### ۹-۶-۳ فرایند چند مرحله‌ای

در هاضم چند مرحله‌ای، هر یک از مراحل تجزیه در مخازن جداگانه‌ای انجام می‌گیرند. به این ترتیب، برای هر یک از این دو دسته از باکتری‌ها، شرایط عملیاتی بهینه می‌شود و در نتیجه سرعت کلی فرایند به حداکثر می‌رسد[۱۹].

### ۱۰. مزایای هاضم‌های بی‌هوازی

از جمله مزایای هاضم‌ها می‌توان به موارد صفحه بعد اشاره کرد:

### ۱۰-۱ تولید محصولات با ارزش افزوده زیاد

گاز زیستی به عنوان یک منبع انرژی محلی و تجدیدپذیر برای تولید گرما، الکتریسیته، استفاده در CHP، سوخت مکمل (برای موتورهای درونسوز) وسایل نقلیه، مواد اولیه صنایع شیمیایی، خط لوله گاز مصرف می‌شود. از دیگر مزایای آن می‌توان فراهم آوردن رشد اقتصادی و تضمین منبع انرژی، بهبود وضعیت ایمنی صنعتی و خانگی، و نیز سودآور بودنش، بهره‌گیری از زیست‌توده تولیدی به عنوان کود سالم و مطمئن در کشاورزی، لیف: بسترها[1]، کود، به عنوان ترمیم‌کننده خاک گلدان[2] برشمرد[۳۰و۱۸].

### ۱۰-۲ کاهش آثار زیست‌محیطی

بهبود وضعیت کیفیت هوا و کاهش بوهای نامطبوع، از بین بردن عوامل بیماری‌زا و تخم علف‌های هرز، جمع‌آوری مواد زاید و حیوانی در یک نقطه و جلوگیری از پراکندگی آنها در محیط اطراف، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای زیانبار برای لایه ازون، حفظ جنگل‌ها و مراتع، تولید کود و پوسال مفید، از جمله آثار زیست‌محیطی استفاده از هاضم‌های بی‌هوازی است که به سادگی نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد[۳۰و۱۹و۱۸].

## ۱۱. چالش‌های هاضم‌های بی‌هوازی

هاضم‌های بی‌هوازی با چالش‌هایی مواجه‌اند که از آن جمله می‌توان مناسب نبودن برای مناطق با آب و هوای سرد و خشک، هزینه گزاف ساخت‌وساز، نیاز به منابع قابل اطمینان و تعمیر و نگهداری و عملیات نسبتاً دشوار، را برشمرد[۱۱].

## ۱۲. جمع‌آوری گاز زیستی خروجی

جمع‌آوری گازهای تولیدی سیستم بی‌هوازی که خارج از راکتور انجام می‌گیرد، باید از دقت خاصی برخوردار باشد. سیستم جمع‌آوری گاز راکتور باید از بیشینهٔ ظرفیت گاز تولیدی برخوردار باشد. فشار گاز تولیدی در سیستم حداکثر ۱۰ تا ۲۰ اینچ ستون آب است و اگر در محلی ذخیره شود فشار آن به مرور زیاد می‌شود و ممکن است با متصاعد شدن از مخزن ذخیره، علاوه بر ایجاد بو در مواردی باعث انفجار و آتش‌سوزی نیز بشود. اگر گازهای خروجی از راکتور مجدداً به آن بازگردند، فضای بالای راکتور روی سطح فاضلاب را که راه تماس راکتور با جوّ است پر می‌کند. این عمل علاوه بر عدم ایجاد بو، مانع متصاعد شدن متان‌های تولیدی می‌شود. باقیماندن و تجمع بیش از حد متان در محل بالایی راکتور ممکن است در مواردی انفجار ایجاد کند و حتی ممکن است غلظت هیدروژن سولفوره در اطراف راکتور به حدی برسد که باعث بروز خطر بهره برداران شود. همچنین ممکن است گازهای تولیدی به کانال‌های خروج فاضلاب راه یابد و بهره برداران را به‌علت محتوای هیدروژن سولفوره در معرض خطر قرار دهد و بعضاً باعث انفجار شود.

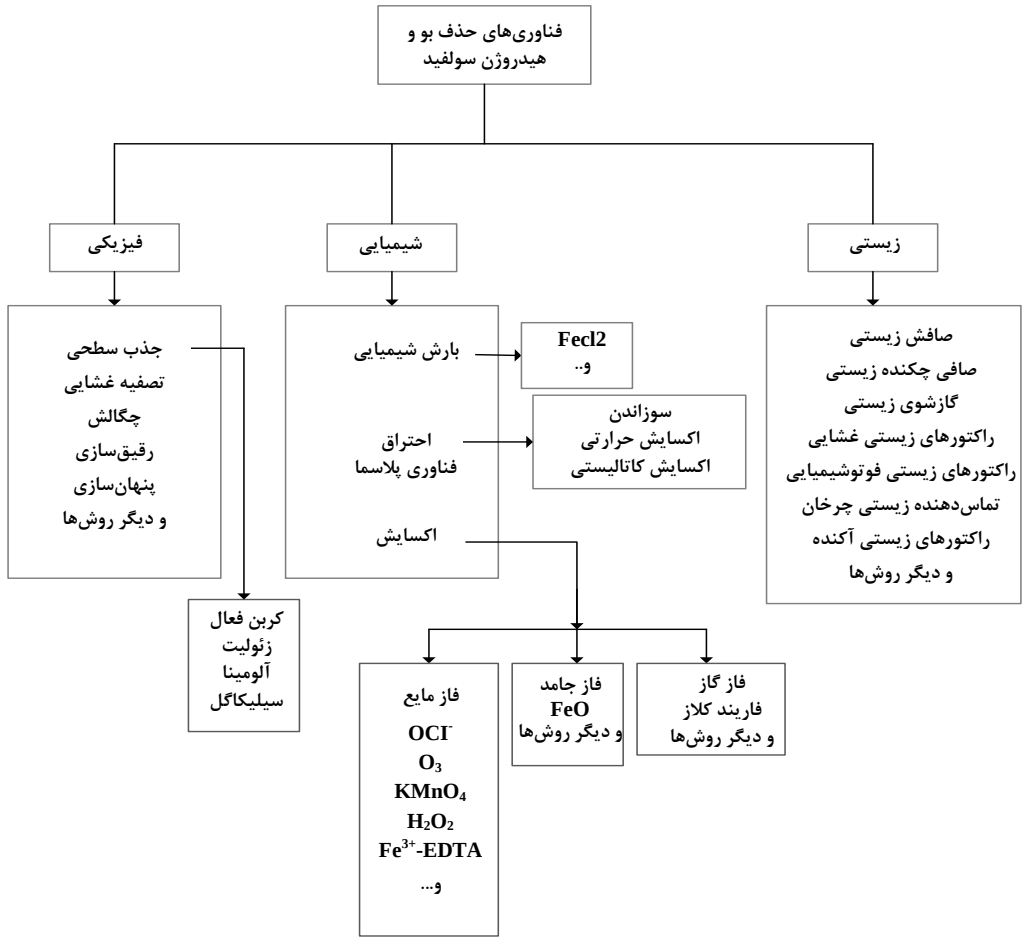
## ۱۳. روش‌های تصفیه گاز زیستی

چندین فناوری ارتقای کیفیت گاز برای تصفیه گاز طبیعی، گاز خاکچال، گاز شهری ابداع شده است، اگرچه معمولاً اجرای این فناوری‌ها برای تصفیه گاز زیستی به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی و هزینه گزاف توصیه نمی‌شود. اما بسته به این‌که از گاز زیستی چه استفاده‌ای بشود، مطابق شکل (۱۱)، روش‌های تصفیه‌ای متفاوتی وجود دارد.

### ۱۳-۱ حذف هیدروژن سولفید

یکی از دردسرهای فرسایندهٔ بهره برداری از سیستم‌های بی‌هوازی، حذف بو، مخصوصاً بوهای ناشی از هیدروژن سولفوره است. این بوها در غلظتی معادل ۰/۵ قسمت در میلیون قابل تشخیص است. هیدروژن سولفید ترکیبی مشکل‌ساز است که باید به منظور افزایش استفاده عملی از گاز زیستی با توجه به توجیهات اقتصادی حذف شود. هیدروژن سولفید، گازی بی‌رنگ و شدیداً سمی است و در آب به آسانی حل می‌شود و قابلیت اشتعال و انفجار دارد. این گاز از هوا سنگین‌تر است و در نتیجه در فضاهایی که تهویه مناسبی وجود ندارد، انباشته می‌شود[۲۱]، روش‌های حذف هیدروژن سولفید از گاز زیستی شامل فرایندهای زیستی، فرایندهای فیزیکی و فرایندهای شیمیایی‌اند. نمودار رایج‌ترین روش‌های حذف هیدروژن سولفید را در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنید[۳۳].

1. bedding
2. Potting Soil Amendment




**شکل ۱۱. روش‌های حذف بو و هیدروژن سولفید از گاز زیستی[۳۳].**

**۱۳-۱-۱ فناوری‌های فیزیکی**

**۱۳-۱-۱-۱ کربن فعال (جذب سطحی)**

یکی از روش حذف هیدروژن سولفید استفاده از جاذب‌های فیزیکی است. کربن فعال به عنوان جاذب گازها و بخارها، و مخصوصاً آلاینده‌های زیست‌محیطی خطرناک، به طور گسترده‌ای به‌کار گرفته می‌شود. به دلیل گسترده بودن مساحت ویژه کربن فعال ( ۱۰۰۰ مترمربع بر گرم)، حجم منافذ فراوان و تراکم زیاد اتم‌های کربن بر روی صفحات گرافیتی مانند، برای حذف هیدروژن سولفوره از زیست‌گاز از ستون ذغال فعال استفاده می‌شود[۲۱].

**۱۳-۱-۱-۲ گازشوی تر**

گازشوی تر برای حذف کربن‌دی‌اکسید و هیدروژن سولفید به‌کار می‌رود، چون حلالیت این گازها در آب نسبت به متان بیشتر است، فرایند جذب کاملا فیزیکی است. آب استفاده شده می‌تواند دوباره برگشت داده شود، اما معمولاً از آب‌های کم کیفیت استفاده می‌شود که در این صورت نیازی به برگشت آن نیست.

**۱۳-۱-۱-۳ گازشویی قلیایی (NAOH)**

عام‌ترین راهکار برای حذف هیدروژن سولفید به کاربردن یک برج حاوی سود است که برای به حداکثر رساندن حذف آن بهتر است سود رقیق نیز در حال گردش در برج باشد تا تماس هیدروژن سولفوره با آن بیشتر برقرار شود. سود می‌تواند در مواردی که مقدار کربن‌دی‌اکسید زیاد است، نسبت به حذف آن نیز اقدام نماید. معمولاً هیدروژن سولفوره در این عمل به سولفورهای محلول تبدیل و از محیط زیست‌گاز دور می‌شود. معمولاً بازدهی حذف هیدروژن سولفوره بین ۸۰ تا ۹۰ درصد متغیر است.

**۱۳-۱-۱-۴ سیستم غشایی**

دو سیستم غشایی خالص‌سازی گازی وجود دارد. در نخستین سیستم جداساز، ازگاز پر فشار در دوطرف غشا بهره گرفته می‌شود و در دومین سیستم غشایی ساخته شده از استات- سلولز، مولکول‌های کوچک قطبی، مانند کربن‌دی‌اکسید و رطوبت و هیدروژن سولفید را در فشار کم گاز جداسازی می‌کنند[۳۳و۳۰].

**۱۳-۱-۲ فناوری‌های شیمیایی**

**۱۳-۱-۲-۱ تزریق هوا/ اکسیژن به هاضم گاز زیستی**

تزریق هوا یکی از روشهای ساده برای حذف هیدروژن سولفید است. در این روش اکسیژن اضافی یا هوا (۲ تا ۶ درصد هوا در گاز زیستی) به طور مستقیم در هاضم یا در مخزن ذخیره‌ساز، ذخیره می‌شود. باید برای جلوگیری از افزایش نسبت هوا اقدامات ایمنی انجام شود تا خطر انفجار هوا و گاز متان به حداقل برسد[۳۳و۳۲و۳۰].

**۱۳-۱-۲-۲ تزریق کلرید آهن[1] به دوغاب هاضم**

تزریق کلرید آهن به طور مستقیم به دوغاب هاضم یا در یک مخزن ذخیره‌ساز با هیدروژن سولفید تولید شده به شکل نمک سولفید آهن تولید می‌کند. این روش در کاهش سطح سولفید هیدروژن خیلی مؤثر است، اما برای رسیدن به یک مساحت کم و پایدار به عنوان سوخت مورد نیاز برای وسایل نقلیه چندان موثر نیست[۳۳و۳۲و۳۰].

**۱۳-۱-۲-۳ آهن‌اکسید (FeO) یا آهن هیدرواکسید**

در این روش طی یک فرایند گرماگیر (کمترین دما ۱۲ درجه سیلسیوس است) آهن‌اکسید با هیدروژن سولفید واکنش می‌دهد. در این روش چون واکنش به آب نیاز دارد، گاز زیستی نباید خیلی خشک باشد. سولفید آهن تولید شده می‌تواند با هوا وارد واکنش و باعث احیای آهن اکسید شود. این فرایند به شدت گرمازاست. بنابراین، در این روش معمولاً دو واکنش اتفاق می‌افتد؛ اولین واکنش سولفورزدایی از گاز زیستی، و دومین واکنش بازسازی با هواست. آهن اکسید تراشه یا آهن اکسید گرانوله در این روش تصفیه می‌توان به‌کار برد[۳۲،۳۰].

**۱۳-۱-۳ فناوری‌های زیستی**

**۱۳-۱-۳-۱ روش زیست‌صافی**

امروزه با ارائه فناوری‌های کم هزینه‌تر و کاربردی‌تر، زیست‌صافش را به عنوان سیستم تصفیه زیستی آلاینده‌های گازی، طراحی می‌کنند و به‌کار می‌برند. در این روش، آلاینده‌های موجود در جریان هوا، یا مستقیماً بر بستر و یا از طریق رطوبت موجود در بستر، جذب و سپس با فعالیت زیستی بستر، تجزیه می‌شوند[۳۳و۳۲و۳۰]. در روش‌های حذف زیستی هیدروژن سولفید، از ریزاندامگان گوگردی برای خالص سازی گاز زیستی استفاده می‌شود. در واقع، این ریزاندامگانها هیدروژن سولفید را به سولفور و سولفات تبدیل می‌کنند. میکروب‌ها بر روی یک بستر ثابت در مایع رشد می‌کنند و گاز زیستی از پایین به سمت بالای برج جریان می‌یابد و در حالی که گاز زیستی در حال عبور از میان بستر است، میکروب ها سولفور را اکسید می‌کنند[۳۴].

## ۱۳-۲ حذف کربن‌دی‌اکسید

حذف $CO_2$ از گاز زیستی ارزش سوختی گاز را تا حدود ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. این تصفیه در مواردی که نیاز به ارزش حرارتی بیشتری باشد ضروری است و در مواقع معمولی چندان مد نظر قرار نمی گیرد. در حال حاضر، به چندین روش، از جمله استفاده از گازشوی (آب و پلی اتیلن گلایکول)، غربال مولکولی کربنی (جذب سطحی) همانطور که برای حذف هیدروژن سولفید در بخش قبلی بیان شد، این کار انجام می‌شود[۳۲و۳۰].

## ۱۳-۳ حذف هیدروکربن‌های هالوژنه

هیدروکربن‌های هالوژنه باعث خوردگی در موتور CHP می‌شوند. سازندگان یک حد بیشینهٔ از کربن هالوژنه شده را در گاز زیستی مشخص می‌کنند. با بهره‌گیری از مبدل‌های لوله ای تحت فشار پر شده با کربن فعال خاص، مولکول‌های کوچک مانند: $CH_4$، $O_2$ و $N_2$ از میان کربن فعال عبور داده می‌شوند، در حالی که مولکول‌های بزرگتر از جمله هیدروژن کربن‌های هالوژنه جذب می‌شوند[۳۰].

## ۱۳-۴ حذف سیلوکزان[2]

ترکیبات سیلیکون آلی گاه و ناگاه در گاز زیستی حضور دارند. این

1. FeCl

2. Siloxanes

ترکیبات سبب وارد آمدن آسیب جدی وشدید به موتورهای تولید همزمان می‌شوند. برای جذب و حذف این مواد، مخلوطی از ترکیبات هیدروکربن‌های با قابلیت ویژه جذب ترکیبات سیلیکونی، به‌کار گرفته می‌شود. بعد از عمل جذب، جاذب از طریق حرارت و دفع بازسازی می‌شود[۳۰].

### ۱۴-۵ کاربرد گاز زیستی در فناوری‌های تولید همزمان

تولید برق و گرما، به طور همزمان، یکی از روشهای استانداردی برای مصرف گاز زیستی، به منظور تولید انرژی است. فناوری‌هایی که گاز زیستی را به الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کنند، متعددند. اکثر CHPها معمولاً موتورهای خودکار یا دیزل، با مصرف گاز زیستی به عنوان سوخت هستند. دیگر روش‌ها عبارت‌اند از توربین‌های گازی، ریزتوربین‌ها، موتورهای استرلینگ، چرخه‌های رانکینگ و پیل‌های سوختی. در کاربردهای CHP، تولید گرما نسبت به تولید الکتریسیته بیشتر است. معمولاً به نسبت ۳۰٪ تا ۴۰٪ الکتریسیته و ۶۰٪ تا ۷۰٪ حرارت تولید می‌شود. بنابراین، بهره‌گیری بهینه از گرمای تولید شده برای بهره وری انرژی کلی و برای اقتصاد نیروگاه گاز زیستی بسیار مهم است[۳۵].

### ۱۵. نتیجه‌گیری کلی

رشد فزاینده مصرف انرژی در جهان، تجدیدناپذیری منابع فسیلی و معضلات زیست محیطی، از جمله عواملی‌اند که همگان را به انجام تحقیقات گسترده در جهت دستیابی به انرژی‌های تجدیدپذیر و اجرای پروژه‌هایی چون تولید گاز زیستی (زیست‌گاز) را در سراسر جهان ترغیب کرده است. بنابر نتایج مطالعات هضم بی‌هوازی، در صورت احداث نیروگاه گاز زیستی می‌توان ضمن حل بحران پسماند و فاضلاب و سایر پسماندهای آلی فساد پذیر، بخشی از انرژی مورد نیاز جامعه را تأمین کرد. از جمله مزایای منحصربه‌فردی که باعث می‌شود به سادگی نتوان در مبحث تولید انرژی از منابع زیست‌توده از روش هضم بی‌هوازی چشم پوشی کرد، کارایی اثبات شده این روش برای تولید انرژی از تمامی منابع زیست‌توده، اعم از جامد و مایع است؛ از این‌رو با بهره‌برداری از این فناوری می‌توان ضمن حل بحران عظیم پسماندهای خانگی، معضل فاضلاب‌های شهری و بعضا صنعتی را نیز حل کرد. در نهایت، تولید گازی با ارزش برای تأمین انرژی گرمایی و الکتریکی، کود غنی بدون عوامل بیماری‌زا، در کنار بسیاری از مزایای دیگر ما را ترغیب می‌کند که در سیاست‌گذاری‌های تامین انرژی و حفظ محیط زیست سرزمین، احداث نیروگاه‌های گاز زیستی را به عنوان یک ضرورت درنظر گیریم.

## مراجع


[1] International Energy Agency. World energy outlook special report 2015: Energy and climate change. Final report. Paris: OECD/IEA; (2015).

[2] Achinas, S., Achinas, V., Euverink, G. Jan. W., "A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste", Engineering 3, 299–307, (2017).

[3] Achinas, S., Euverink, G. Jan. W., "Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste", resource-Efficient technologies 2, 143-147, (2016).

[4] Sárvári Horváth, I., Tabatabaei, M., Karimi, K., Kumar, R., "Recent updates on biogas production - a review", Biofuel Research Journal 10, 394-402, (2016).

[5] Vagonyte, E., "Biogas & biomethane in Europe". Work package 4: Biogas & Biomethane. Report. Brussels: European Biomass Association, (2015).

[6] Mohammadi Maghanaki, M., Ghobadian, B., Najafi, G., JanzadehGalogah, R., "Potential of biogas production in Iran", RenewableandSustainableEnergyReviews 28, 702–714, (2013).

[7] Weiland, P., "Biogas production: current state and perspectives", Appl Microbiol Biotechnol, 85:849–860, (2010).

[۸] رامین صداقتوند، "مدلسازی و شبیه سوزی پیل سوختی میکروبی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- پدیده‌های انتقال، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۹۰).

[9] Kogan , P., "New Renewable Energy Resources", world Energy Council, Chapter 5, Biomass Energy, (1996).

[10] Scurlock, I. M. O., Hall, D. O., "The Contribution of Biomass to Global Energy Use", Short Communication Biomass, (1990).

[11] Stassen, H. E., "Small Scale Biomass Gasifier for Heat and Power", Global Review World Bank Technical-No, (1995).

[12] Bassam, N. E. I., "Handbook of bioenergy crops", Chapters 4, 5, 6, (2010).

[13] Techobanoglous, G., Tyssen, H., "Integrated Solid Waste Management", McGraw Hi11, (1993).

[۱۴] نصیری، ج.، "امکان سنجی نیروگاه بیوگازی ساوه"، مدیر دفتر انرژی زیست توده سازمان انرژی‌های نو ایران، (۱۳۸۷).

[15] Dublein, D., Steinhauser, A., "Biogas from Waste and Renewable Resources", An Introduction, WILEY-VCHVerlagGmbH & Co. KGaA, (2008).

[۱۶] شکیبی، خ.، شعبانی‌کیا، ا.، نظری، ع.، "شناخت بیوگاز و راکتورهای بیوگازی سرعت بالا برای احداث نیروگاه با سوخت زباله‌های شهری و پسماندهای آلی فسادپذیر"، ماهنامه صنعت برق.۱۵۴و شنبه، -۰۸-۱۶، (۱۳۸۸).

[۱۷] هجری، ز.، صاحب جمعی، ن.، "بررسی تولید بیوگاز از پساب‌ها و فضولات"، نخستین همایش بیوانرژی ایران، تهران، ۲۱ مهر، (۱۳۸۹).

[18] Kwan-Chow, L., Zhenxiang, Y., "Technical review on the UASB process",international journal of environmental studies, 39, 203–222, (1991).

[۱۹] رجبعلی‌پور چشمه‌گز، ع. ا.، "فرایند تولید انرژی از بیوگاز"، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، بهار، (۱۳۸۹).

[20] Stamatelatou, K., Antonopoulou, G., lyberatos, G., "Production of biogas via anaerobic digestion", Chapter 12, Handbook of biofuels Production processes and technologies, 266–304, (2011).

[۲۱] طاهریون، م.، صالحی زیری، م.، اسداله فردی، غ. ر.، فاضلی پیشه، ح.، "ارزیابی عملکرد سیستم بیوفیلتر به منظور حذف گاز سولفید هیدروژن"، آب و فاضلاب، شماره ۴، (۱۳۹۳).

[۲۲] رهی، ع.، "فرآیند تهیه بیوگاز و ساخت انواع نیروگاههای بیوگازی جهت تولید برق پراکنده"، نخستین همایش بیوانرژی ایران، تهران، ۲۱ مهر، (۱۳۸۹).

[۲۳] ساسه، ل.، "تأسیسات واحدهای بیوگاز" ترجمه دکتر قاسم نجف‌زاده، دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران، (۱۳۷۴).

[24] Luostarinen, S., Normak, A., Edstrom, M., "Overview of Biogas Technology", WP6 Energy potentials, (2011).

[25] Hill, D., "Anaerobic digestion", www.dhillenvironmental.com

[۲۶] کاظمیان، ن.، مسن هرزندی، ا.، "امکان سنجی استفاده از خروجی هاضم بی‌هوازی تصفیه خانه فاضلاب در فصول مختلف"، دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، (۱۳۹۱).

[۲۷] علی قارداشی، ا.، عدل، م.، "بیوگاز در ایران"، سومین همایش ملی انرژی ایران، (۱۳۸۰).

[۲۸] مردان، س.، توفیقی دورباش، هـ .، "آشنایی با راکتورهای بافل دار بی‌هوازی"، معاونت عمران و محیط زیست، (۱۳۹۲).

[۲۹] پورخباز، ح. ر.، جوانمردی، س.، "انرژی بیوگاز و جنبه‌های زیست محیطی آن"، چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، (۱۳۹۲).

[30] Monnet, F., "An introduction to anaerobic digestion of organic wastes", November, (2003).

[۳۱] احمدپور، ا.، عباس‌پور، د.، جاویدفر، م. ر.، "بررسی تولید و استفاده از گاز زیستی با تکیه بر رعایت موارد ایمنی". همایش ملی بیوانرژی.۲۱ مهر، (۱۳۸۹).

[32] Zhao, Q., Leonhardt, E., MacConnell, C., Frear, C., Chen, S., " Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion", CSANR Research Report (2010) – 001.

[33] Noyola, A., Manuel Morgan-Sagastume, J., Lopez-Hernandez, J. E., "Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy resource recovery", Reviews in Environmental Science and BioTechnology ; 5:93–114, (2006).

[34] Cherosky, P. B., "Anaerobic Digestion of Yard Waste and Biogas Purification by Removal of Hydrogen Sulfide", the Ohio State University, (2012).

[۳۵] راهنمای جامع "تولید همزمان برق و حرارت"، وزارت نیرو، دفتر بهبود بهره وری و اقتصاد برق و انرژی، سال (۱۳۸۸).