

## Original article

## Investigation of Biogas Production Process by the Mixture of Landfill Leachate and Animal Waste

Hosein Alidadi<sup>1</sup>Somaie Etemadi Mashhadi<sup>2\*</sup>Ali Asghar Najafpour<sup>1</sup>Batoul Mohebrad<sup>3</sup>Ali Akbar Dehghan<sup>4</sup>

1- Associate Professor, Department of Environmental and Occupational Health, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

2- MSc Student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental and Occupational Health, Student Research Center, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

3- PhD Student of Environmental Health Engineering, Environmental Chemistry Laboratory, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

4- PhD Student of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

\*Corresponding author: Somaie Etemadi Mashhadi, Department of Environmental and Occupational Health, Student Research Center, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

Email: etemadis2000@gmail.com

Received: 23 July 2017

Accepted: 22 September 2017

### ABSTRACT

**Introduction and purpose:** Energy consumption is on a rapidly growing trend in the world. Accordingly, the non-renewable energy sources are expected to be run out in the future. This issue has resulted in the establishment of efforts targeted toward the development of new energy-generating methods around the world. Biogas energy is one of the new and clean energies that is produced from the anaerobic digestion of biomass wastes. Anaerobic digestion is a cost-effective and environment-friendly method, which facilitates fertilizer and biogas production as well as landfill leachate treatment. Given the high environmental hazards of leachate and its mixture with animal wastes, the present study aimed to estimate the possibility of producing biogas in various mixture ratios.

**Methods:** In this pilot-scale experimental study, the landfill leachate of Mashhad, Iran, were mixed with cow fresh dung in different ratios, but same conditions, under anaerobic digestion. This was conducted to consider the ability to produce methane gas in different proportions and landfill leachate. At the beginning and end of the project, the parameters of EC, pH, VS, TS, COD, TOC, P, K, N, and Na were measured. Additionally, the composition of the gases produced under different operating conditions was analyzed using gas chromatography mass spectrometry.

**Results:** Gas production began three weeks after uploading and continued for five weeks. The analysis of gas production in three ratios was indicative of the CH<sub>4</sub> production in all three proportions. In this regard, 1/1 ratio produced the highest percentage of CH<sub>4</sub>. No gas production was observed in the two months of study. Other physical and chemical parameters, such as COD, TS, TKN, and TOC were reduced in the given mixtures during the biogas production procedure. For instance, the case with 1/1 ratio, which showed the best results, had almost 80% decrease in the given parameters. However, no gas production or change of parameters were observed in the control sample (leachate), which was examined for two months.

**Conclusion:** The findings of the study revealed the possibility of producing biogas out of the mixture of waste leachate and animal wastes. Biogas reduces the risk of waste leachate disposal to the environment and facilitates the production of fertilizers containing nutrients (e.g., Na, K, N, and P), which are standard regarding such parameter as pH, EC, C/N, and reduced VS. Moreover, these gases are cost-effective and environment-friendly.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Biogas, Fresh cow dung, Waste leachate

► **Citation:** Alidadi H, Etemadi Mashhadi S, Najafpour AA, Mohebrad B, Dehghan AA. Investigation of Biogas Production Process by the Mixture of Landfill Leachate and Animal Waste. Journal of Health Research in Community. Summer 2017;3(2): 44-54.

## مطالعه فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از مخلوط شیرابه زباله شهری و فضولات حیوانی

## چکیده

حسین علیدادی<sup>۱</sup>سمیه اعتمادی مشهدی<sup>۲\*</sup>علی اصغر نجف پور<sup>۱</sup>بتول محب راد<sup>۲</sup>علی اکبر دهقان<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران
۳. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط، کارشناس آزمایشگاه شیمی محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران
۴. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

\* نویسنده مسئول: سیمیه اعتمادی مشهدی، گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران

Email: etemadis2000@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱

**مقدمه و هدف:** انرژی مصرفی در جهان به سرعت در حال افزایش است و انتظار می‌رود که منابع انرژی غیر قابل تجدید در آینده به پایان برسد؛ بنابراین روش‌های نوین تولید انرژی در سراسر جهان متداول شده است. از جمله انرژی‌های جدید و پاک، بیوگاز است که از تخمیر بی‌هوازی زیست‌توده تولید می‌شود. هضم بی‌هوازی شیرابه و فضولات با تولید گاز، تصفیه شیرابه زباله و همچنین تولید کود، روشی اقتصادی و دوستدار محیط زیست است. در این پژوهش با توجه به محتوای شیرابه زباله و مخاطرات فراوان زیست‌محیطی این ترکیب، اختلاط آن با فضولات حیوانی و بررسی امکان تولید بیوگاز در نسبت‌های مختلف اختلاط، مورد ارزیابی قرار گرفت.

**روش کار:** در این پژوهش که یک مطالعه تجربی بود و در مقیاس پایلوت انجام شد؛ شیرابه زباله محل دفن زباله شهری مشهد و فضولات تازه گاوی با نسبت‌های مختلف مخلوط شد و با شرایط یکسان تحت هضم بی‌هوازی قرار گرفت تا توانایی تولید گاز متان در نسبت‌های مختلف اختلاط و همچنین شیرابه محل دفن، مشخص شود. در ابتدا و انتهای کار، پارامترهای EC، pH، TS، VS، COD، TOC، ازت، فسفر، سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شدند و ترکیب گازهای تولیدی در شرایط بهره‌برداری مختلف توسط (GCMS: Gass Chromatography Mass Spectrometry) مورد آنالیز قرار گرفت.

**یافته‌ها:** تولید گاز از حدود ۲۰ روز پس از بارگذاری آغاز شد و تقریباً تا ۳۵ روز بعد ادامه داشت. آنالیز گاز تولیدی در سه نسبت اختلاط مختلف نشان‌دهنده تولید گاز متان در هر سه نسبت بود که بیشترین درصد گاز متان مربوط به نسبت اختلاط یک به یک بود. طی دو ماه مورد بررسی، تولید گاز از شیرابه زباله مشاهده نشد. در فرآیند تولید بیوگاز، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی از جمله: COD، TS، TKN و TOC در مخلوط‌های مورد نظر کاهش محسوسی داشتند، به‌عنوان مثال در نمونه با نسبت ۱/۱ که بهترین نتایج را نشان داد، حدود ۸۰ درصد کاهش در پارامترهای مذکور ثبت گردید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که تولید بیوگاز از اختلاط شیرابه زباله و فضولات حیوانی امکان‌پذیر است. بیوگاز با کاهش مخاطرات دفع شیرابه زباله در محیط زیست و تولید کود حاوی مواد مغذی (فسفر، نیتروژن، سدیم و پتاسیم) که از نظر پارامترهای تثبیت کود از جمله: EC، pH، کاهش جامدات فرار و نسبت C/N مطابق استانداردها می‌باشد؛ علاوه بر سود اقتصادی مزایای زیست‌محیطی فراوانی نیز خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** بیوگاز، شیرابه زباله، فضولات گاوی، هضم بی‌هوازی

◀ **استناد:** علیدادی، حسین؛ اعتمادی مشهدی، سیمیه؛ نجف پور، علی اصغر؛ محب راد، بتول؛ دهقان، علی اکبر. مطالعه فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از مخلوط شیرابه زباله شهری و فضولات حیوانی. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، تابستان ۱۳۹۶؛ ۳(۲): ۵۴-۴۴.

## مقدمه

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر، مخاطرات زیست‌محیطی فراوانی را به دنبال داشته؛ به طوری که امروزه

زیست محیطی محسوب می‌شود. شیرابه زباله را می‌توان نوعی فاضلاب قوی دانست که هم‌اکنون آلودگی ناشی از آن در سراسر جهان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معضلات زیست محیطی مطرح می‌باشد. بار آلی بالا، ترکیب متغیر و نوسانات دبی شیرابه در فصول مختلف سال، تصفیه آن را مشکل نموده است [۳،۷].

قارداشی و همکاران، بیوگاز را در ایران (پتانسیل موجود، استحصال فعلی و دورنمای آینده) به‌صورت مروری مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه به تولید بیوگاز از فضولات حیوانی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی در ایران پرداخته است. ابتدا به‌صورت کلی تصفیه بی‌هوازی، تاریخچه بیوگاز و پتانسیل استحصال بیوگاز در ایران بررسی گردید؛ سپس در دو بخش جداگانه به بررسی واحدهای بیوگاز روستایی و رآکتورهای بی‌هوازی پرداخته شد. در هر بخش انواع مولد (رآکتورهای) ساخته شده در ایران مورد بررسی کلی قرار گرفت و به مهارت‌ها، تجهیزات و وسایل مورد نیاز برای ساخت هر واحد اشاره شد. با وجود پتانسیل خوب برای تولید بیوگاز در ایران (۹۱۷۵/۲ میلیون متر مکعب متان معادل ۳۰ درصد مصرف گاز طبیعی در بخش‌های خانگی، تجاری و صنایع کشور در سال ۱۳۷۶)، فرآیندهای بی‌هوازی و تولید بیوگاز گسترش زیادی نیافته است. تعداد واحدهای هضم فضولات دامی در ایران حدود ۶۰ واحد بوده که ۳ واحد آن در حال کار می‌باشد و کمتر از تعداد انگشتان دست، رآکتور و هاضم بی‌هوازی تصفیه فاضلاب در حال بهره‌برداری هستند. مهم‌ترین دلایل گسترش نیافتن این فناوری‌ها عبارتند از: ارزان بودن انرژی و پیچیده بودن این پدیده در ایران، نبودن مرجع و متصدی مشخص برای بیوگاز در کشور، وجود نداشتن روحیه مشارکت در مردم، نبود آشنایی و آموزش کافی در این زمینه [۸].

یزدان داد و همکاران در سال ۱۳۸۹ بررسی روش‌های تصفیه شیرابه محل‌های دفن زباله در شهر مشهد را بررسی نمودند. براساس نتایج این مطالعه، گزینه پیشنهادی برای تصفیه شیرابه حاصل از

جایگزینی منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر به‌عنوان یک راه حل در جهان مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱]. در بین فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، زیست توده به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع رو به رشد در جهان مطرح است. طی فرآیند هضم بی‌هوازی مواد آلی (زیست توده) توسط باکتری‌ها بیوگاز تولید می‌شود. فرآیند تولید بیوگاز یک فرآیند زیستی است که در همه مراحل آن گروه‌های مختلفی از میکروارگانیسم‌ها فعالیت می‌کنند.

این میکروارگانیسم‌ها نسبت به شرایط محیطی بسیار حساس هستند. باید کلیه شرایط و عوامل در محدوده بهینه در محیطی (مخازن یا رآکتورها) بسته برای فعالیت مطلوب باکتریایی فراهم و کنترل شود؛ در غیر این صورت، فرآیند در مراحل اولیه و تولید اسید متوقف می‌گردد و گاز متان تولید نمی‌شود [۴-۲]. ترکیب بیوگاز معمولاً شامل ۵۵ تا ۶۵ درصد متان، ۳۰ تا ۴۰ درصد  $CO_2$  و مقادیر ناچیزی از دیگر گازها شامل  $N_2O$ ،  $SH_2$  و غیره می‌باشد. ارزش حرارتی بیوگاز (با ۵۵ درصد متان) حدود ۲۰ مگا ژول برآورد شده است [۵].

بیوگاز پس از تصفیه و خالص‌سازی می‌تواند در مصارف صنعتی مانند تولید برق و غیره استفاده شود. معمولاً در کشورهای در حال توسعه از جمله: چین، نپال، هند و پاکستان، بیوگاز به‌عنوان یک تکنولوژی خانگی برای مناطق روستایی کاربرد دارد. براساس مطالعه‌ای در کشور چین، تکنولوژی بیوگاز نه تنها به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر؛ بلکه راه حلی برای دفع مواد زائد خانگی نیز محسوب می‌شود و یکی از مهم‌ترین جنبه‌های پیشرفت در این کشور به‌شمار می‌رود [۵،۶].

از سویی دیگر، در مراکز دفن زباله یکی از بزرگ‌ترین مشکلات، آلودگی آب‌های زیرزمینی در اثر نفوذ شیرابه می‌باشد. همچنین جاری شدن شیرابه سبب آلودگی آب‌های سطحی می‌گردد. با توجه به استفاده وسیع از لندفیل شهری، کنترل و تصفیه نکردن شیرابه می‌تواند موجب آلودگی آب، هوا و خاک نواحی پایین دست گردد؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین مشکلات

فرار کمتر بود که به ترتیب ۳۳ تا ۴۶ درصد، ۲۱ تا ۳۷ درصد و ۲۰ تا ۳۵ درصد به دست آمد. از این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که این روش علاوه بر اینکه به تولید بیوگاز تجدیدپذیر کمک می‌کند، منجر به بهبود کیفیت پساب نیز می‌شود [۱۰].

Min و همکاران در سال ۲۰۱۲ تولید بیوگاز از شیرابه زباله‌های مواد غذایی را با استفاده از سیستم (UASB Upflow Blanket Anaerobic Sludge) بررسی نمودند. در این مطالعه یک سیستم UASB با استفاده از شیرابه مواد غذایی به عنوان ماده خام به روش هضم مزوفیلیک و ترموفیلیک طراحی شد. در طول ۲۰ روز از زمان عملیات با هضم مزوفیلیک نسبت گردش پساب به صورت پله‌کافی هر ۵ روز یک‌بار تغییر می‌کرد. هضم گرمادوست در شرایط یکسان با هضم مزوفیلیک انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌وری حذف آلی برای هضم مزوفیلیک بیش از ۹۰ درصد و عملکرد تولید متان از ۶۶ تا ۷۰ درصد بود. بهره‌وری حذف گرمادوست بیش از ۸۰ درصد و عملکرد تولید متان بین ۶۲ تا ۶۸ درصد به دست آمد. همچنین زمانی که راکتور UASB برای بیش از سه بار چرخش پساب طراحی شود، آزمایش می‌تواند به صورت اقتصادی و پایدار صورت گیرد [۱۱].

متأسفانه در ایران به دلیل در دسترس و ارزان بودن سوخت‌های فسیلی، پتانسیل بالای تولید بیوگاز از زیست‌توده با وجود شرایط مناسب چندان مورد توجه قرار نگرفته است [۴]. این در حالی است که ۷۰ درصد حجم زباله‌های تولیدی در ایران را مواد آلی و قابل تجزیه زیستی تشکیل می‌دهند. مدیریت نامناسب محل‌های دفن زباله می‌تواند سبب تجمع حجم بالای شیرابه زباله شود که همزمان و پس از دفن زباله در این محل به وجود می‌آید. شیرابه زباله حاوی ترکیبات آلی و معدنی با غلظت بسیار زیاد و آلاینده‌های سمی فراوان می‌باشد. جلوگیری از نفوذ این شیرابه به بستر محل دفن و ارائه روشی جهت جمع‌آوری، نگهداری و از بین بردن آن، همواره به عنوان یک مشکل فنی مطرح بوده که هنوز در ایران روش قطعی و عملی برای حل آن ارائه نشده است. این امر می‌تواند سبب

محل‌های دفن زباله و کارخانه کمپوست شهر مشهد شامل واحدهای اصلی راکتور و فیلتر سنی می‌باشد. از فیلتر سنی برای دستیابی به جریان رو به بالا و با بستر ثابت و فیلتراسیون غشایی استفاده می‌شود. البته فرآیندهای دیگری نظیر تنظیم عملکرد بهتر سامانه پیشنهادی لازم است. همچنین سامانه پیشنهادی در دو محل دفن زباله فعال و جدید، با توجه به تفاوت‌های اصلی آن‌ها به لحاظ وجود کارخانه کمپوست در محل فعال و امکان بازچرخش شیرابه در محل دفن جدید، اندکی متفاوت خواهد بود. در دو سامانه پیشنهادی چیدمان و پیکره‌بندی عمومی واحدهای مورد استفاده در مقیاس واقعی مدنظر قرار گرفته‌اند و به نوع مناسب و قابل تهیه فرآیند غشایی توجه شده است. بنابر آنچه اشاره شد، پیشنهاد می‌شود طرح آزمایشی سامانه‌های یادشده در قالب سامانه در مرحله بعدی تهیه شود. شایان ذکر است که انواع سامانه‌های غشایی در سایر کشورها قابل تهیه می‌باشند؛ اما در ایران انواع در دسترس آن‌ها محدودتر است [۹].

قانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای مقدماتی روی تولید بیوگاز حاصل از شیرابه مواد زائد جامد شهری انجام دادند. در این مطالعه یک هاضم در مقیاس آزمایشگاهی برای مطالعه اثر قدرت اکسیژن بیوشیمیایی باقی‌مانده شیرابه بر تولید بیوگاز طراحی شد. سه سری آزمایش نیز با استفاده از شیرابه زباله‌های شهری با دو قدرت اکسیژن باقی‌مانده شیمیایی متفاوت؛ یعنی قدرت ۳۰۰۰ و ۲۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (به ترتیب به عنوان قدرت کم و زیاد) طراحی شد. این آزمایش در یک شرایط کنترل شده شامل دمای ۳۵ درجه سلسیوس و رنج pH از ۶/۸ تا ۷/۳ در یک دوره بیش از ۲۰ روزه صورت گرفت. کارایی این پروسه براساس تولید بیوگاز و بهره‌وری حذف آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفت.

براساس نتایج به دست آمده برای نمونه‌های با قدرت بالا و پایین که در شرایط کاملاً مشابه انجام شدند، رنج تولید بیوگاز مشاهده شده متفاوت بود. اکسیژن باقی‌مانده بیوشیمیایی در پساب تا ۸۰ درصد حذف شد؛ اما درصد کاهش سایر پارامترها مانند اکسیژن باقی‌مانده شیمیایی، کل جامدات معلق و جامدات معلق

مخاطرات اساسی زیست محیطی از جمله: آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی، مخاطرات زیستی و غیره شود [۱۲،۱۳].

از طرفی مقادیر زیادی فضولات گاو همواره در دامداری‌های اطراف بافت شهری و همچنین مناطق روستایی تولید می‌شود که در صورت مدیریت نامناسب می‌تواند مشکلات زیادی از جمله: تخریب چهره بافت شهری، بوی نامطبوع، مشکلات سلامتی و بیماری‌های مشترک انسان و دام را برای ساکنان منطقه ایجاد نماید. فضولات تازه گاو دارای مواد مغذی مناسب از جمله: کربن، نیتروژن و همچنین میکروارگانسیم‌های فراوان برای انجام فرآیند زیستی هضم بی‌هوازی است و می‌تواند به‌عنوان بهترین گزینه برای تولید بیوگاز مورد توجه قرار گیرد. در صورت مدیریت مناسب این ضایعات دامی علاوه بر کنترل مشکلات احتمالی می‌توان به سود اقتصادی و زیست محیطی دست یافت.

به این ترتیب با اختلاط شیرابه زباله و فضولات حیوانی در فرآیند هضم بی‌هوازی، علاوه بر کنترل مشکلات زیست محیطی که به آن اشاره شد، می‌توان با تولید بیوگاز به سود اقتصادی فراوانی نیز دست یافت. مطالب فوق پژوهشگران را بر آن داشت تا امکان تولید بیوگاز با روش هضم بی‌هوازی همزمان شیرابه زباله و فضولات حیوانی را بررسی نمایند.

## روش کار

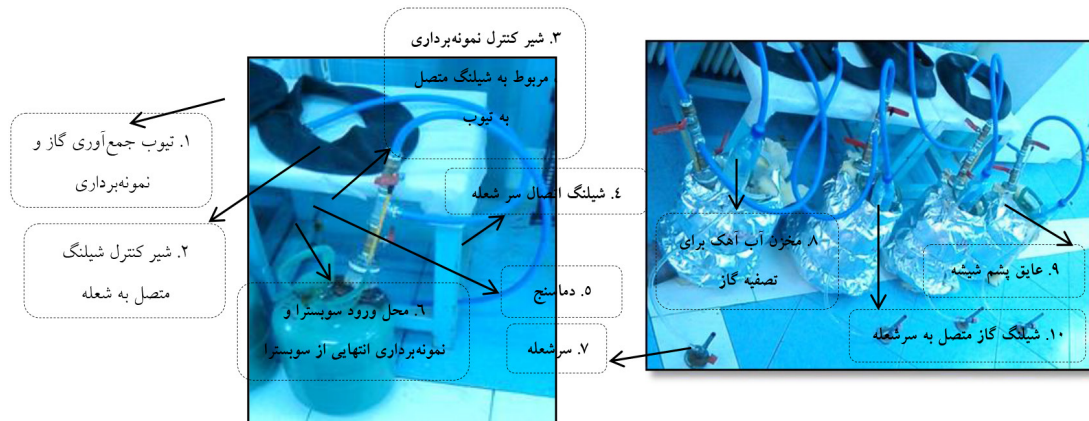
### تهیه نمونه‌ها

مطالعه حاضر یک پژوهش تجربی در مقیاس پایلوت می‌باشد که به مدت ۲ ماه در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی مشهد صورت گرفت. نمونه شیرابه از محل دفن زباله شهر مشهد و فضولات تازه گاو از دامداری‌های اطراف شهر تهیه شد. برای این پژوهش در مجموع، ۲۲/۵ لیتر شیرابه زباله و ۱۴ کیلوگرم فضولات تازه گاو استفاده شد. حجم نمونه مورد نیاز پس از محاسبه حجم مخازن و با توجه به حجم مورد نیاز برای فضای خالی فوقانی مخزن

که معمولاً یک چهارم حجم مخزن در نظر گرفته می‌شود، محاسبه گردید. حجم کل مخازن، ۱۳/۵ لیتر تعیین شد (با حجم مشخص آب پر شد). با توجه به اینکه حدود یک چهارم فضای فوقانی، خالی در نظر گرفته می‌شود، حجم نمونه در هر یک از مخازن ۹ لیتر به دست آمد. یکی از مخازن به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد و فقط حاوی ۹ لیتر شیرابه زباله بود. سه مخزن باقی‌مانده نیز به ترتیب حاوی ۶ لیتر فضولات و ۳ لیتر شیرابه زباله (نسبت اختلاط سه قسمت فضولات و یک قسمت شیرابه)، ۴/۵ لیتر فضولات و ۴/۵ لیتر شیرابه زباله (نسبت یک به یک) و ۳ لیتر فضولات و ۶ لیتر شیرابه زباله (نسبت اختلاط یک قسمت فضولات و سه قسمت شیرابه) بود. مخلوط‌های مذکور ابتدا در یک ظرف جداگانه کاملاً مخلوط و سپس به مخزن اصلی منتقل شدند.

### ساخت و راه‌اندازی پایلوت

در این مطالعه، چهار مخزن فلزی مقاوم به فشار گاز با حجم ۱۳/۵ لیتر تهیه شد. پس از تهیه مخازن، اتصالات مورد نیاز طراحی و سپس در قسمت‌های مربوطه نصب شدند که به شرح ذیل می‌باشند: ابتدا در ورودی برای ورود نمونه نصب شد که یک منفذ به منظور نصب دماسنج روی در آن تعبیه شد؛ سپس شیر کنترل خروج گاز و پس از آن یک عدد سه راهی نصب شد که ابتدا به تیوب جمع‌آوری گاز و سپس به شیر نمونه‌برداری گاز متصل گردید. تمام این اتصالات با نوار تفلون و چسب آکواریوم کاملاً آب‌بندی شدند و برای کنترل آب‌بندی و نشت‌نکردن هوا به داخل مخازن، مخازن را پر از آب کردند. سپس مخلوط‌ها داخل مخازن طراحی شده ریخته و در مخزن (اتصالات مشروح روی آن نصب شده بود) بسته شد. بعد از این مرحله برای جلوگیری از تبادل حرارتی مخلوط داخل مخازن و محیط اطراف، مخازن را با پشم شیشه عایق‌بندی کردند. در نهایت، یک مخزن حاوی آب آهک قبل از اتصال به شعله برای تصفیه بیوگاز ایجاد و شعله پایدار و آبی، آماده شد (شکل ۱).



شکل ۱: نمای از پایلوت ساخته شده

### آزمایشات انجام شده

در ابتدا قبل از بستن در مخازن پایلوت، از مخلوط اولیه هریک از مخازن، نمونه اولیه برای انجام آزمایش‌های pH، EC، TS، VS، TOC، COD، درصد رطوبت، ازت، فسفر، سدیم و پتاسیم برداشته شد. تمام آزمایش‌ها براساس روش کتاب استاندارد متد صورت گرفت.

یک ماه پس از تولید گاز، گاز تولیدی هریک از مخازن آنالیز و درصد گاز متان در روش هضم همزمان بی‌هوای شیرابه زباله شهری و فضولات تازه گاوی مشخص شد. همچنین درنهایت، تمام آزمون‌های ابتدای کار روی کود تولیدی هریک از مخازن، به‌منظور تشخیص بهره‌وری حذف آلاینده‌ها و بررسی کیفیت کود تولیدی در این روش، صورت گرفت [۱۴].

### نمونه‌برداری و آنالیز گاز

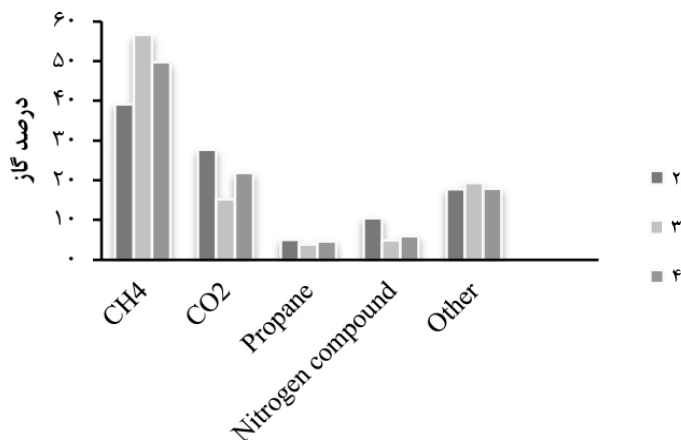
پس از اینکه آهنک تولید گاز تقریباً ثابت شد (۲۵ الی ۳۰ روز پس از اولین مشاهده تولید گاز) نمونه‌برداری انجام شد و نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال گردید. آنالیز گاز حاصل نمونه‌برداری با استفاده از ویال‌های مخصوص نمونه‌برداری گاز با حجم ۲۵ میلی‌لیتر صورت گرفت. ویال به‌صورت وارونه نگه داشته شد و شیلنگ متصل به مخزن گاز وارد ویال گردید (تا

انتهای ویال)، سپس شیر خروج گاز باز و پس از چند ثانیه بسته شد. ویال‌ها به آزمایشگاه آنالیز شرکت آب و فاضلاب مشهد منتقل شدند و توسط دستگاه GC-Mass مدل 7890A ساخت شرکت Agilent Technologies (کشور آمریکا) آنالیز گاز صورت گرفت و نوع و درصد گازهای موجود مشخص گردید [۱۵].

### یافته‌ها

همان‌طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود در ترکیب گاز تولیدی تمام مخازن مورد آزمایش، بیشترین درصدها به‌ترتیب مربوط به  $CH_4$ ،  $CO_2$ ، پروپان و ترکیبات نیتروژنه می‌باشد. حدود ۲۰-۱۵ درصد باقی‌مانده نیز از سایر ترکیبات با مقادیر بسیار جزئی تشکیل شده است.

با توجه به جدول‌های ۱ و ۲، طی فرآیند هضم بی‌هوای همزمان شیرابه زباله و فضولات، تغییراتی در مقادیر پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی سوبسترا ایجاد شده است. مقادیر pH همان‌طور که در جدول ۱ ذکر شده است با استانداردهای WHO درجه ۱ (۵/۵ تا ۶/۵) و درجه ۲ (۵ تا ۸) کشوری ایران، و Gottas (۶ تا ۹) کود بی‌هوای مطابقت دارد. در مورد EC نیز نمونه‌ها با استاندارد درجه ۲ ایران (کمتر از ۱۰ دسی‌زیمنس

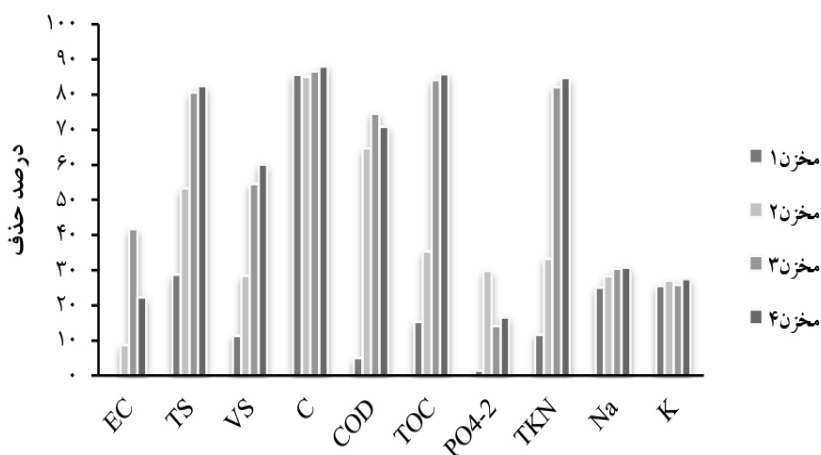


نمودار ۱: ترکیب گازهای تولیدی در مخلوط‌های مختلف (پس از انجام فرآیند هضم، یک ماه پس از اولین تولید گاز)

تشیت کود (۳۸ درصد) کمتر است.

نسبت C/N اولیه در مخزن ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب: ۱۹/۵، ۲۵/۳ و ۲۴/۷ در ابتدای کار بود و در انتهای کار به ترتیب: ۶/۷، ۱۸/۹ و ۲۴/۷ گزارش گردید که در نمونه‌های مختلف در انتهای فرآیند با استاندارد تشیت کود مطابقت دارد؛ در نمونه ۲ نیز این نسبت (حدود ۱۹) نزدیک به محدوده استاندارد (۲۰-۳۰) می‌باشد [۱۶، ۱۷].

بر سانتی‌متر) مطابقتی را نشان می‌دهند. مقادیر رطوبت در تمام نمونه‌ها افزایش و مقادیر جامدات کاهش یافته است (با توجه به فرآیند هضم بی‌هوازی که یکی از محصولات تولیدی آب است). مقادیر جامدات فرار نیز با توجه به نمودار ۲ در نمونه‌های ۳ و ۴ (۵۴/۵ و ۶۰/۱) کاهش بیش از ۳۸ درصد داشته است که با استاندارد تشیت کود مطابقت دارد. در نمونه ۲، درصد کاهش جامدات فرار، ۲۸/۵ درصد بود که از مقدار تعیین شده استاندارد



نمودار ۲: درصد کاهش پارامترهای مختلف طی فرآیند هضم بی‌هوازی شیرابه زباله و زائدات حیوانی در نسبت‌های مختلف طی مدت دو ماه

جدول ۱: نتایج آزمایشات فیزیکی فرآیند هضم بی‌هوازی شیرابه زباله و زائدات حیوانی در نسبت‌های مختلف، طی مدت دو ماه

نمونه	پارامتر											
	درصد C		درصد VS		درصد TS		درصد رطوبت		EC (دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر)		pH	
	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها
مخزن ۱	۷	۶/۷۰	۶/۳۴	۶/۳۵	۶۶/۸	۹۵/۵	۳۳/۲	۴/۵	۱۳/۲	۱/۹	۷/۳۷	۱/۰۵
مخزن ۲	۷/۱۲	۶/۸۵	۱۰/۷۲	۹/۷۹	۳۷/۵۶	۹۰/۹	۶۲/۴	۹/۱	۳۳/۵	۵	۱۸/۶۱	۲/۷۷
مخزن ۳	۷/۴۳	۶/۹۹	۱۳/۳۲	۷/۷۷	۷/۰۶	۸۷/۷	۹۲/۹۴	۱۲/۳	۶۲/۹	۸/۴	۳۴/۹۵	۴/۶۶
مخزن ۴	۷/۷۱	۶/۸۰	۱۲/۹۶	۱۰/۰۸	۵/۶	۸۸	۹۴/۳	۱۲	۶۸/۳	۸/۲	۳۷/۹۹	۴/۵۵

جدول ۲: نتایج آزمایشات شیمیایی فرآیند هضم بی‌هوازی شیرابه زباله و زائدات حیوانی در نسبت‌های مختلف، طی مدت دو ماه

نمونه	پارامتر											
	COD (میلی‌گرم)		کربن آلی (میلی‌گرم)		فسفات (میلی‌گرم)		ازت (میلی‌گرم)		سدیم (میلی‌گرم)		پتاسیم (میلی‌گرم)	
	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها
مخزن ۱	۱۷۶۸۰/۹۷	۱۶۸۶۲/۳۹	۲۱۴۹/۸۴	۱۸۷۳/۲	۴/۹۰	۴/۸۳	۶۸۸	۴۸۰	۸/۶	۶/۴۵	۸/۲	۶/۱
مخزن ۲	۱۸۶۹۲/۳۱	۶۵۹۷/۵۹	۱۹۲۱۷/۱۴	۱۲۴۱۰/۶۸	۵/۵۳	۳/۸۸	۹۸۶	۶۵۸	۹	۶/۴۵	۸/۵	۶/۲
مخزن ۳	۱۹۹۱۸/۲۶	۵۰۷۱/۷۱	۲۹۲۴۸/۵	۴۶۵۱/۱۲	۵/۹۱	۵/۰۸	۱۰۵۴	۱۸۸	۹/۵	۶/۶	۸/۷	۶/۴۵
مخزن ۴	۲۰۸۲۳/۷۰	۶۰۷۱/۸۷	۳۴۳۲۱/۳۲	۴۸۴۳/۳۵	۶/۸۹	۵/۷۵	۱۲۸۴	۱۹۶	۹/۶	۶/۶۵	۸/۷	۶/۳

جدول ۳: مقایسه بازه زمانی، میانگین دما، درصد متان و نسبت C/N در رآکتورهای مورد آزمون طی کل مدت دوره بهره‌برداری (سه ماه)

شماره مخزن	دما (درجه سانتی‌گراد)						طول دوره تولید گاز (روز)
	نسبت C/N	درصد CO <sub>2</sub>	درصد CH <sub>4</sub>	میانگین		میانگین	
				حداکثر ثبت شده کل دوره	کل دوره بارگذاری		
مخزن ۱	۶/۶۹	-	-	۳۰	۳۰/۱۷	-	-
مخزن ۲	۲۴/۷۱	۲۷/۷۰	۳۹/۰۳	۳۲	۳۰/۷۲	۳۱/۸۵	۲۲
مخزن ۳	۲۴/۷۴	۱۵/۲۶	۵۶/۶۹	۳۲	۳۰/۶۵	۳۱/۱۹	۴۴
مخزن ۴	۱۸/۸۶	۲۱/۸۶	۴۹/۷۸	۳۲	۳۰/۴۶	۳۱/۱۳	۴۸

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی مخلوط‌های مورد بحث در جدول‌های ۱ و ۲ درج شده است. \* منظور از ابتدای کار مخلوط اولیه، مخلوط‌های مورد نظر قبل از فرآیند هضم همزمان بی‌هوازی شیرابه زباله و فضولات و انتهای کار، یک ماه پس از تولید گاز و پس از انجام فرآیند هضم همزمان بی‌هوازی شیرابه زباله و فضولات می‌باشد.



\* مخزن ۱: نمونه شاهد (شیرابه زباله)، مخزن ۲: مخلوط سه قسمت شیرابه و یک قسمت فضولات (۳/۱)، مخزن ۳: مخلوط یک قسمت شیرابه و یک قسمت فضولات (۱/۱)، مخزن ۴: مخلوط یک قسمت شیرابه و سه قسمت فضولات (۱/۳).

## بحث و نتیجه گیری

در مخزن ۴، گازی که در روز پنجم تولید شد، احتمالاً گاز ازت حاصل از نابودی میکروارگانیسم‌های متانوژن بوده است که به دلیل نسبت C/N بالا، تجمع  $\text{NH}_4$  و افزایش pH محیط نابود شده‌اند. پس از ۱۱ روز، تولید بیوگاز به صورت پیوسته (به مدت ۴۴ روز) اتفاق افتاد. دلیل این مسأله نیز می‌تواند تعدیل نسبت C/N و رسیدن به نسبت C/N مناسب جهت فعالیت متانوژن‌ها و فرآیند تولید بیوگاز باشد.

در مخزن ۳ با نسبت ۱/۱ با توجه به رطوبت مناسب و مقادیر فراوان میکروارگانیسم‌ها، فرآیند تولید بیوگاز از روز یازدهم با طول دوره تولید گاز بسیار مناسب در مقایسه با سایر روش‌ها (۴۸ روز) انجام شده است. درصد گاز متان در بیوگاز تولیدی این مخزن نیز بیشترین درصد در بین مخلوط‌های مختلف (۵۶/۷ درصد) بود. این مسأله می‌تواند تأییدی بر بهتر انجام شدن فرآیند هضم بی‌هوازی مخلوط شیرابه زباله و زائدات حیوانی در این نسبت اختلاط باشد.

در مخزن ۲ فرآیند از روز چهل و سوم پس از بارگذاری با سه قسمت شیرابه و یک قسمت فضولات، آغاز شد. طولانی بودن این زمان با مشاهده نسبت C/N اولیه و مقدار کم باکتری‌های متانوژن (نسبت کم فضولات) نسبت به سایر مخازن و همچنین مقادیر زیاد مواد سمی با توجه به مقدار زیاد شیرابه زباله قابل توجیه است. پس از طی این زمان، با تعدیل نسبت C/N و مناسب شدن شرایط برای فعالیت متانوژن‌ها، بیوگاز در این مخزن نیز تولید شد. در این مطالعه دما متأثر از محیط اطراف و بدون استفاده

از منبع گرمایشی، تأمین شد. مقایسه میانگین دمای مخازن و طول دوره تولید بیوگاز و زمان شروع فرآیند طبق جدول ۳ در مخازن مختلف نشان می‌دهد که با افزایش میانگین دمای مخازن، زمان شروع فرآیند کاهش و طول دوره تولید گاز افزایش یافته است.

با توجه به جدول ۱، مقادیر pH در انتهای فرآیند با استانداردهای این پارامتر (Gotaas, WHO) و استاندارد درجه یک و دو ایران) در مورد محصولات فرآیند هضم بی‌هوازی و تثبیت کود مطابقت دارد. رطوبت در انتهای کار در تمام مخازن افزایش داشته که با توجه به تولید آب طی فرآیند هضم بی‌هوازی قابل توجیه است.

با توجه به جدول ۳ مقدار جامدات کل، جامدات فرار، درصد کربن، کربن آلی، سدیم، پتاسیم، ازت و فسفر نیز کاهش قابل توجهی یافته است. این مسأله انجام فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز و همچنین مصرف عناصر مغذی طی فرآیند هضم بی‌هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها را نشان می‌دهد.

کاهش قابل توجه COD در مخازن ۲، ۳ و ۴ که به ترتیب ۶۴/۷۱، ۷۴/۵۳ و ۷۰/۸۴ درصد است در مقایسه با مخزن ۱ با درصد حذف ۵ درصد (نمونه شاهد شیرابه زباله که به تنهایی در شرایط هضم بی‌هوازی قرار گرفت) نشان‌دهنده تأثیر مثبت فرآیند هضم همزمان بی‌هوازی شیرابه زباله و فضولات حیوانی در کاهش آلودگی شیرابه زباله و تصفیه مؤثر شیرابه می‌باشد. در مطالعه کارآیی تصفیه شیرابه اسیدی زباله آشپزخانه توسط سیستم UASB که Hang-sik Shin و همکاران انجام دادند، حذف COD تا روز ۱۶۰ فرآیند حذف حداکثر ۴۰ درصد گزارش شده است؛ اما با بیشتر شدن زمان ماند تا ۳۲۰ روز، درصد حذف تا بیش از ۹۰ درصد افزایش یافت. در مطالعه حاضر حداکثر بازه زمانی ۵۲ روز مربوط به مخزن ۱ (شیرابه زباله) و مخزن ۲ (نسبت ۳ شیرابه و ۱ فضولات)، سپس مخزن ۳ (نسبت ۱ به ۱) ۴۹ روز و در نهایت، مخزن ۴ (۱ فضولات

نزدیک به محل‌های دفن زباله یا مناطق روستایی هستند، می‌توان علاوه بر تولید انرژی و صرفه اقتصادی، از مخاطرات فراوان رهاسازی شیرابه در محیط زیست نیز جلوگیری کرد. کود حاصل در این روش هضم، از نظر مقادیر فلزات سنگین در مصارف کشاورزی کاربرد دارد؛ بنابراین با یک روش تصفیه مقدماتی کود برای از بین بردن پاتوژن‌های احتمالی، می‌توان از این کود استفاده کرد. به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی این مورد را مدنظر قرار دهند.

### قدردانی

این مطالعه حاصل طرح تحقیقاتی (پایان‌نامه) مصوب در معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مشهد با کد ۹۲۱۳۳۶ می‌باشد؛ بدین وسیله نویسندگان مطالعه حاضر از معاونت مذکور تشکر و قدردانی می‌نمایند.

## References

1. Doagoui E, Ghazanfari A, Fooladi M. Synthetic survey and modeling of biogas production from waste of Damask rose essential oil extraction. *Iran J Biosyst Eng* 2011; 42(1):95-102 (Persian).
2. Abdoli M. Biogas publications office of guidance and public relations. Tehran, Iran: Printing House of the Ministry of Energy; 1985 (Persian).
3. Holm-Nielsen JB, Al Seadi T, Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresour Technol* 2009; 100(22):5478-84.
4. Salimy A, Danesh SH, Ebrahimi H, Heydariyan M. The effect of temperature on the production of biogas from animal waste. *Seventh National Congress of Civil Engineering*, Zahedan, Iran; 2013 (Persian).
5. Rabah AB, Baki AS, Hassan LG, Musa M, Ibrahim AD. Production of biogas using abattoir waste at different retention time. *Sci World J* 2010; 5(4):23-6.
6. Chen Y, Yang G, Sweeney S, Feng Y. Household biogas use in rural China: a study of opportunities and constraints. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2010; 14(1):545-9.
7. Yousefi Z, Zazouli MA, Tahamtan M, Ali R, Ghorbanian Aleh Abad M. The effect of anaerobic baffled reactor modified by anaerobic filter (ABR-AF) on solid waste leachate treatment. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2012; 21(86):27-36 (Persian).
8. Gardashi A, Adl M. Biogas in Iran (potential, current and future prospects extraction). *The Third Iran's National Energy Conference*, Tehran, Iran; 2009 (Persian).
9. Yazdandad H, Sadegh Z. Evaluation methods of landfills leachate treatment in Mashhad. *The First National Conference on Sustainable Urban Development*; University of Gilan, Gilan, Iran; 2010 (Persian).
10. Ghani WA, Idris A. Preliminary study on biogas production of biogas from municipal solid waste (MSW) leachate. *J Eng Sci Technol* 2009; 4(4):374-80.

11. Min BK, Lee CH, Kim JY. Biogas resource from foodwaste leachate using UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). *Appl Chem Eng* 2012; 23(1):28-34.
12. Fantozzi F, Buratti C. Biogas production from different substrates in an experimental continuously stirred tank reactor anaerobic digester. *Bioresour Technol* 2009; 100(23):5783-9.
13. Jha AK, Jianzheng L, Baral NR. Prospects of dry anaerobic digestion of organic solid wastes for biogas production in Nepal. *J Curr Res Sci* 2013, 1(4):231-4.
14. Clescerl L, Greenberg AE, Eaton AD. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington DC: American Public Health Association; 1998.
15. Hecht C, Griehl C. Investigation of the accumulation of aromatic compounds during biogas production from kitchen waste. *Bioresour Technol* 2009; 100(2):654-8.
16. Agrahari R, Tiwari GN. The production of biogas using kitchen waste. *Int J Energy Sci* 2013; 3(6):408-13.
17. Khamirchi R, Saghi M, Ahmadi A, Vaziri T, Rastega A. Characteristics of the physical and chemical parameter's manure produced by livestock waste and poultry manure at the biogas system. *J Sabzevar Univ Med Sci* 2013; 20(2):222-9 (Persian).
18. Shin HS, Han SK, Lee Ch, Son YC. Performance of UASB reactor treating an acidified leachate from food waste. *J Chinese Instit Environ Eng* 1999; 9(4):269-76.