

# بهینه‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از مخلوط کود دامی و پسماند کدوی آجیلی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

پریسا جهانگیر مقدم<sup>۱</sup> و سمیرا زارعی<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۶  
۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران  
\* مسئول مکاتبه E-mail: s.zareei@uok.ac.ir

## چکیده

دفع و انباشت پسماند کشاورزی و دامی در محیط می‌تواند باعث ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی شود. سالانه حجم بسیار بالایی از فضولات دامی و انواع پسماند محصولات کشاورزی در کشور تولید می‌شود که می‌تواند به‌عنوان پتانسیلی بالقوه برای تولید بیوگاز به آن توجه شود و علاوه بر تولید انرژی، سبب دفع مناسب پسماند و کاهش آلودگی شود. از این رو، در تحقیق حاضر فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب کود دامی و پسماند کدوی آجیلی مورد بررسی قرار گرفت. کدوی آجیلی محصولی است که صرفاً برای استخراج دانه آن تولید می‌شود و قسمت عمده محصول به‌عنوان پسماند دفع می‌شود. آزمایشات با استفاده از سه نسبت ترکیب پسماند کدو به کود گاوی (۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰، ۳۰:۷۰) در دو غلظت متفاوت خوراک (ترکیب ۱:۱ و ۱:۲ پسماند با آب) در هاضم‌های یک لیتری شیشه‌ای به‌صورت ناپیوسته انجام شد. برای بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ و آزمایش فاکتوریل کامل در سه تکرار استفاده شد. نرم‌افزار Design Expert 12 برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر غلظت خوراک بر میزان بیوگاز تولیدی در سطح احتمال ۱٪ و تاثیر نسبت ترکیب در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار هستند اما اثر متقابل آن‌ها فاقد تاثیر معنی‌دار است. ارتباط بین تولید بیوگاز با متغیرهای غلظت خوراک و نسبت ترکیب به‌شکل معادله رگرسیونی ارائه شد. نسبت ترکیب ۱:۲ و غلظت خوراک با ترکیب ۱:۲ پسماند با آب به‌عنوان مقادیر بهینه متغیرها تعیین شدند که منجر به تولید بیشینه بیوگاز به‌مقدار ۹۳/۵۲۶۷ ml/day می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: زمان ماند، غلظت، فاکتوریل کامل، نسبت ترکیب، هضم بی‌هوازی

## Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Livestock Manure and Pumpkin Waste using the Response Surface Methodology (RSM)

Parisa Jahangir Moghadam<sup>1\*</sup> and Samira Zareei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

\*Corresponding author: E-mail: s.zareei@uok.ac.ir

### Abstract

Disposal of agricultural waste and livestock manure in the environment can cause pollution. Annually, a very large volume of animal waste and various types of agricultural wastes is produced, which could be considered as a potential for biogas production. Such an energy production causes proper disposal of waste and reduce pollution. Therefore, in this study, biogas production from the combination of livestock manure and pumpkin waste was investigated. Pumpkin is produced solely to extract its seeds and most of the product is useless and disposed of as waste. The experiments were performed using three ratios of pumpkin waste to cow manure (10:90, 20:80, 30:70) at two different concentrations (1:1 and 1:2 combination of the waste with water) in 1 liter batch reactors. To optimize the process, the response surface methodology (RSM) and full factorial experiment in three replications were used. Design Expert 12 software was used to analyze the experimental data. The results showed that the effect of waste concentration on the amount of produced biogas and the effect of composition ratio are significant at the level of 1% and 5% probability, respectively, but their interaction is not significant. The relationship between biogas production with feed concentration variables and composition ratios was presented in the form of a regression equation. The ratio of 10:90 and the feed concentration with the ratio of 1:2 were determined as the optimal feed, which lead to the maximum production of biogas at the amount of 93.5267 ml/day.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Composition ratio, Concentration, Full factorial, Retention time

### How to cite:

Jahangir Moghadam, P., and Zareei, S. 2020. *Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Livestock Manure and Pumpkin Waste using the Response Surface Methodology (RSM)*. Journal of Agricultural Mechanization 5 (1): 93-101

## ۱- مقدمه

سبوس برنج، گزارش کردند که با استفاده از سبوس برنج به تنهایی به- عنوان خوراک هاضم، گازی تولید نمی‌شود ولی با افزودن کود گاوی با سهم بیش از ۵۰ درصد در ترکیب با سبوس برنج، میزان تولید بیوگاز معنی‌دار بود. (Trujillo et al., 1993) طی تحقیقی ترکیب پسماند گوجه‌فرنگی با فضولات خرگوش را در تولید بیوگاز مورد بررسی قرار دادند. سهم پسماند گوجه‌فرنگی در ترکیب از فضولات خرگوش بیشتر بود. نتایج نشان داد که میزان بیوگاز تولیدی از ترکیب این پسماند، ۴۰ درصد بیشتر از زمانی است که فضولات خرگوش به‌تنهایی در عمل هضم به‌کار برده شوند. (Saev et al., 2009) تخمیر بی‌هوازی ترکیب پسماند گوجه‌فرنگی و کود گاوی را در یک هاضم نیمه پیوسته و تحت شرایط مزوفیلیک بررسی نمودند. حداکثر میزان تولید متان از ترکیب کود گاوی و پسماند گوجه‌فرنگی با نسبت ۸۰: ۲۰ به‌دست آمد. Safari et al. (2016) به بررسی و مقایسه تولید بیوگاز از پسماندهای ساقه کلزا، کود گاوی و محتویات شکمبه گاوی پرداختند. تیمارهای آزمایشی شامل: پسماندهای ساقه کلزا+کود گاوی+محتویات شکمبه، کود گاوی و محتویات شکمبه گاوی بودند. نتایج نشان داد که از بین تیمارهای آزمایشی، بیشترین میزان تولید بیوگاز مربوط به کود گاوی + محتویات شکمبه در ترکیب با پسماندهای ساقه کلزا بود.

در فرآیند هضم بی‌هوازی، میزان آبی که با پسماند مخلوط می‌شود از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. زیرا افزایش یا کاهش مقدار رطوبت در خوراک هاضم می‌تواند تولید بیوگاز را با مشکل مواجه کند. مواد اولیه‌ای که در فرآیند تخمیر بی‌هوازی مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً غلظت بالایی دارند و به‌همین دلیل با آب رقیق می‌شوند. در واقع اگر غلظت مواد زیاد باشد موجب چسبندگی می‌شود و رشد باکتری‌ها با مشکل مواجه خواهد شد. همچنین افزایش بیش از حد آب و کاهش غلظت مواد باعث لایه لایه شدن محلول می‌شود و ضرورت هم‌زدن مداوم محلول را ایجاد خواهد کرد (Fang et al., 2011). Shoeb and Singh (2000) در بررسی تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی و سنبل آبی در سه نسبت متفاوت ترکیب با آب (۱، ۳، ۵ برابر ضایعات) گزارش کردند که بیشترین میزان تولید بیوگاز مربوط به بالاترین نسبت آب یعنی ترکیب ۱:۵ ضایعات با آب بوده است.

براساس آمارهای سازمان جهاد کشاورزی ۳۰ درصد از محصولات کشاورزی در ایران به‌پسماند تبدیل می‌شود. یعنی از حدود ۱۱۷ میلیون تن محصولات کشاورزی در ایران سالانه ۳۰ میلیون تن آن در هنگام برداشت و پس از برداشت از بین می‌رود و سالانه بیش از ۲۰ میلیون تن کود دامی هم تولید می‌شود. از این حجم بالای زیست توده می‌توان به‌عنوان پتانسیلی بالقوه در تولید بیوگاز استفاده کرد و علاوه بر دفع مناسب پسماند و کاهش آلودگی‌های محیطی از سایر مزایای فرآیند هضم بی‌هوازی نظیر تولید انرژی پاک و تولید کودغنی بهره‌مند شد.

تولید بیوگاز یک فرآیند بیولوژیکی است که در طی آن تخمیر و تجزیه بی‌هوازی پسماندهای کشاورزی، حیوانی، فاضلاب‌های خانگی و زباله‌های شهری و صنعتی در یک محفظه تخمیر به‌وسیله باکتری‌های بی‌هوازی انجام می‌شود. به‌همین دلیل بیوگاز یک منبع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود. بیوگاز یک منبع انرژی پاک و ارزان و تجدیدپذیر است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد که در محیط زیست ایجاد آلودگی نمی‌کند و فاقد هرگونه مواد سمی است. به‌علاوه می‌توان از آن برای سوخت‌رسانی به روستاها و نواحی دور افتاده استفاده نمود (Gerardi, 2003; Buekens, 2005). مراحل اصلی در فرآیند هضم بی‌هوازی تولید بیوگاز شامل ۱- هیدرولیز مواد آلی تجزیه‌پذیر ۲- تولید اسید (اسید سازی) از مولکول‌های ساده مواد آلی محلول ۳- استات سازی ۴- تولید متان (متان سازی) می‌باشند. این فرآیندها به واسطه فعالیت گونه‌های متفاوت میکروبی فعال در هر مرحله صورت می‌پذیرد (Bassani et al., 2016).

عوامل مختلفی بر انجام مطلوب فرآیند هضم بی‌هوازی و میزان تولید بیوگاز تأثیرگذار هستند، از جمله این عوامل می‌توان به‌دمای مناسب، غلظت مناسب مواد، زمان ماند ماند هیدرولیکی، نسبت کربن به‌نیتروژن و pH مناسب خوراک و پیش‌فرآوری مناسب مواد جهت فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌ها اشاره کرد (Budiyo et al., 2014; Prabhu et al., 2014).

یکی از راه‌های موثر برای عملکرد بهتر و افزایش میزان تولید بیوگاز ترکیب پسماندهای دامی و گیاهی با یکدیگر است. در واقع هضم مواد در ترکیب با یکدیگر می‌تواند باعث جبران کمبود عناصر مغذی در یکی از پسماندها توسط پسماند دیگر شده و تولید بیوگاز بیشتر را به همراه داشته باشد (Doagoi, 2009). باکتری‌های بی‌هوازی برای زنده ماندن و ادامه فعالیت‌های خود نیازمند کربن و نیتروژن هستند (Zaher et al., 2007). باکتری‌ها کربن را به‌عنوان منبع انرژی و برای رشد و نمو و نیتروژن را برای ساختن دیواره سلولی خود مصرف می‌کنند (Latha et al., 2019). نسبت بالای C/N به‌مصرف سریع نیتروژن توسط باکتری‌های متان‌زا و محدود شدن رشد باکتری‌ها و در نتیجه کاهش میزان تولید گاز منجر می‌شود. همچنین نسبت کم C/N منجر به انباشته شدن نیتروژن که عنصری سمی برای رشد باکتری‌ها است و همچنین افزایش pH بالاتر از ۸/۵ خواهد شد (Buekens, 2005). نسبت C/N در پسماند-های گیاهی بالاست و مخلوط کردن کود حیوانی با این پسماندها باعث متعادل شدن نسبت C/N می‌شود (Zareei & Khodaei, 2017). بسیاری از تحقیقات نتایج مثبت استفاده از ترکیب پسماندهای گیاهی با کودهای دامی در افزایش تولید بیوگاز را تأیید می‌کنند. (Elijah et al., 2009) در بررسی میزان تولید بیوگاز از کود دامی در ترکیب با نسبت‌های مختلف

ممکن است باعث مرگ میکروارگانیسم‌ها شود. از این رو، در چند روز ابتدایی شروع آزمایش pH داخل هاضم‌ها به وسیله pH متر قلمی کنترل شده و در صورت نیاز با افزودن کربنات کلسیم به خوراک مقدار pH به حالت خنثی نزدیک می‌شود. همچنین به منظور یکنواخت شدن خوراک داخل هاضم‌ها و جلوگیری از رسوب مواد و همچنین افزایش سطح تماس مواد با یکدیگر، هاضم‌ها چند بار در روز به صورت دستی تکان داده می‌شوند که این عمل باعث بالا بردن راندمان تولید بیوگاز می‌شود.

هاضم‌ها برای تأمین شرایط بی‌هوازی به وسیله درپوش‌های چوب پنبه‌ای کاملاً آب‌بندی می‌شوند و از هر یک از چوب پنبه‌ها شیلنگ سیلیکونی عبور داده شد که ارتباط هاضم را به استوانه مدرج اندازه‌گیری حجم گاز برقرار می‌کند. برای اندازه‌گیری گاز تولیدی از روش جابجایی آب استفاده شد. این روش گازسنجی برای اندازه‌گیری در حجم‌های معمول آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ زیرا ارزان و آسان است (Guéguim Kana *et al.*, 2012). گاز تولید شده در فرآیند هضم بی-هوازی از طریق شیلنگ‌های سیلیکونی رابط به داخل استوانه‌های مدرج هدایت گردید و هنگامی که فشار در هاضم بالا می‌رود، آب در داخل استوانه مدرج شروع به حرکت می‌کند. این مقدار آب جابه‌جا شده در واقع نشان‌دهنده میزان گاز تولید شده است (Safari *et al.*, 2016)

## ۲-۲- تهیه مواد اولیه برای خوراک هاضم

یکی از محصولات کشاورزی که در ایران تولید می‌شود کودوی آجیلی است که پس از برداشت و جمع‌آوری دانه‌های آن، مقادیر قابل توجهی پسماند (۹۵ درصد میوه تازه) شامل پوست، بخش گوشتی، فیبرهای داخلی و بذرها کوچک‌تر باقی می‌ماند. استان‌های گلستان و آذربایجان غربی بیشترین سطح زیر کشت و تولید کودوی آجیلی را دارند. استان گلستان سطح زیر کشت ۴۳۰ هکتار و استان آذربایجان غربی سطح زیر کشت ۱۸ هزار هکتار و تولیدی برابر با ۱۴ هزار تن دارد (Zaboli *et al.*, 2015). با توجه به آمار و ارقام موجود در رابطه با میزان تولید کودوی آجیلی، میزان پسماند حاصل از برداشت آن بسیار قابل توجه است (شکل ۲). از طرفی، به دلیل رطوبت بالای پسماندها کپک‌زدگی در محیط ایجاد می‌شود که در سطح مزرعه مشکلات بسیاری از جمله آلودگی محیط زیست و هزینه جابجایی برای کشاورزان را در پی دارد. بنابراین پیشنهاد راهکارهایی به منظور استفاده بهینه از این پسماندها می‌تواند به حل این مشکلات کمک کند. یکی از این راهکارها استفاده از این پسماندها در فرآیند هضم بی‌هوازی جهت تولید بیوگاز و کود زیستی می‌باشد.

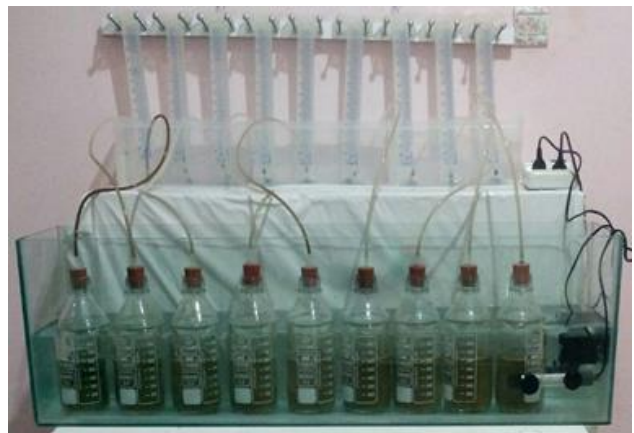
برای انجام آزمایش‌ها، کودوی آجیلی از شهرستان خوی واقع در استان آذربایجان غربی تهیه شد و پس از جدا کردن دانه‌های خوراکی، سایر قسمت‌های باقی مانده شامل پوست، فیبرهای داخلی و قسمت

کدوی آجیلی (*Cucurbita pepo*) یکی از محصولاتی است که پسماند بسیاری دارد و تنها دانه آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، از این رو می‌تواند به‌عنوان منبعی برای تولید بیوگاز در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، فضولات دامی که در حجم بالا از دامداری‌ها دفع شده غنی از مواد آلی هستند و می‌توانند به‌عنوان مواد خام برای تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گیرند در تحقیق حاضر، فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب پسماند کدوی آجیلی و کود گاوی با استفاده از سه نسبت ترکیب ۱:۰:۹۰، ۱:۰:۸۰ و ۳۰:۷۰ و در دو غلظت متفاوت خوراک در ترکیب ۱:۱ و ۱:۲ با آب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- هاضم تولید بیوگاز

به‌منظور انجام آزمایشات تولید بیوگاز از سامانه‌ای متشکل از ۹ هاضم شیشه‌ای یک لیتری از جنس پیرکس مورد استفاده قرار داده شد. خوراک به‌روش ناپیوسته به داخل هاضم‌ها تغذیه شد. روش ناپیوسته به دلیل ساده بودن استفاده و همچنین آسان‌تر بودن نظارت و ارزیابی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (Karatky *et al.*, 2012). در مدل ناپیوسته کل مواد به‌هاضم اضافه می‌شود و پس از پایان زمان ماند، هاضم به طور کامل تخلیه می‌شود. میزان حجم کاری هر هاضم ۶۰۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد و ۴۰۰ میلی‌لیتر باقی مانده برای ذخیره گاز مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- هاضم‌های مورد استفاده برای انجام آزمایشات تولید

بیوگاز

Fig 1. Digesters used to perform biogas production tests

هاضم‌ها در داخل حمام آب گرم قرار داده شدند و برای تأمین شرایط دمایی مزوفیلیک، دمای آب ثابت و به میزان ۳۵ درجه سانتی‌گراد کنترل شد. در روزهای ابتدایی آزمایش که فرآیند در فاز اسیدزایی می‌باشد، امکان پایین آمدن pH در محیط خوراک وجود دارد و این کاهش pH

سه نسبت ترکیب مختلف از پسماند کدوی آجیلی و کود گاوی (۱۰:۹۰)، ۲۰:۸۰ و ۳۰:۷۰) و دو غلظت متفاوت خوراک (مخلوط خوراک و آب به نسبت‌های ۱:۱ و ۲:۱) انتخاب شدند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، از ۹ هاضم با حجم یکسان و تحت شرایط دمایی و هم‌زنی کنترل شده با تکان دادن هاضم‌ها به صورت دستی در فواصل منظم زمانی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. مواد در تمامی هاضم‌ها با وزن یکسان (۶۰۰ gr)، اما با ترکیبات متفاوت از پسماند و آب در دوره اول به مدت ۳۲ روز و در دوره دوم به مدت ۶۹ روز نگهداری شدند. برای هر نسبت ترکیب سه هاضم مورد استفاده قرار داده شد تا تکرار در آزمایش‌ها لحاظ شود. میزان گاز تولیدی دو بار در روز در ساعات‌های مشخص قرائت و ثبت شد.

## ۲-۴- روش سطح پاسخ

یکی از اساسی‌ترین مراحل فرآیند شناسایی سیستم، جمع‌آوری داده از سیستم است. روش ساده برای جمع‌آوری داده، مشاهده تغییرات طبیعی سیستم است، ولی روش بهینه آن است که یک آزمایش کنترل شده طراحی گردد. در این پژوهش به منظور استخراج مدل و یافتن شرایط بهینه از روش سطح پاسخ استفاده شد. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی می‌باشد که برای مدل‌سازی و آنالیز مسائلی که پاسخ مطلوب توسط چندین پارامتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد، مفید می‌باشد و هدف بهینه‌سازی پاسخ است. این روش با معیار قرار دادن تعداد متغیرها و حدود بیشینه و کمینه تعیین شده برای هر متغیر، ماتریس آزمایش را طراحی می‌کند. بدین ترتیب تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمون مشخص می‌شود. طرح آزمایش به نحوی است که حتی بدون تکرار آزمون، نتایج آماری قابل اعتمادی به دست می‌آید. بنابراین، این روش باعث تسهیل روند تحقیق، کاهش زمان و هزینه‌ها خواهد شد. در روش سطح پاسخ دامنه انتخاب شده برای هر فاکتور اهمیت زیادی دارد. دامنه هر فاکتور باید کدبندی شده و در محدوده ۱- تا ۱ قرار گیرد تا تحلیل رگرسیون به خوبی انجام پذیرد.

پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، معادله مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به صورت رابطه (۱) بیان شود.

$$Y = C_{k0} + \sum_{i=1}^k C_{ki} X_i + \sum_{i=1}^k C_{kii} X_i^2 + \sum_{i < j \leq k} C_{kij} X_i X_j \quad (1)$$

که در آن:  $C_{k0}$ ،  $C_{kj}$ ،  $C_{kii}$  و  $C_{kij}$  به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند.  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل گذشته هستند. با تعیین ضرایب معادله فوق، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقیمانده، ریشه میانگین مربعات

گوشتی که پسماند این محصول محسوب می‌شوند به منظور هضم بهتر کاملاً له شدند.



شکل ۲- بقایای کدوی آجیلی پس از خارج کردن دانه‌ها

Fig 2. Pumpkin wastes after removing the seeds

از سوی دیگر، فضولات دامی که در بسیاری از کشورها از سال‌ها قبل به منبعی برای تولید انرژی و ارزش افزوده تولیدات دامی تبدیل شده، در ایران چنین وضعیتی حاکم نیست و انباشت فضولات دامی با ایجاد شرایط مناسب برای رشد و گسترش عوامل بیماری‌زا در کنار بوی بد و تجمع حشرات، احتمال بروز و گسترش انواع بیماری‌ها را بالا برده است. این در حالی است که بسیاری از واحدهای دامداری از خطوط گاز و برق دور بوده و انرژی مورد نیاز خود را از سوخت‌های فسیلی به وسیله تانکرهای حامل سوخت تأمین می‌نمایند. لذا، تبدیل پسماند دامی به- وسیله فرآیند تجزیه بی‌هوازی علاوه بر ایجاد ارزش افزوده در کود دامی از طریق تولید انرژی، می‌تواند باعث بالا رفتن سطح رفاه و توسعه مناطق تحت پوشش گردد. برای انجام پژوهش حاضر، کود گاوی تازه از گاوداری دانشگاه کردستان واقع در روستای دوشان به صورت تصادفی جمع‌آوری گردید.

مشخصات نمونه‌های پسماند کدوی آجیلی و کود گاوی طبق دستورالعمل‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. این مشخصات شامل میزان کل ماده جامد به ترتیب ۵/۴۳ و ۱۸/۴۲ درصد برای پسماند کدو و کود گاوی، کل ماده فرار برابر با ۹۹/۷۵ و ۹۹/۸۱ درصد برای پسماند کدو و کود گاوی و نسبت نیتروژن به کربن برابر با ۲۲/۶۶ و ۱۵/۱۷ به ترتیب برای پسماند کدو و کود گاوی تعیین شد.

## ۲-۳- نحوه انجام آزمایشات تولید بیوگاز

آزمایش‌ها برای بررسی اثر دو عامل ترکیب خوراک هاضم و غلظت خوراک بر روی میزان تولید بیوگاز طراحی و انجام شدند. برای این منظور

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج تأثیر پارامترهای مورد مطالعه در میزان تولید بیوگاز

نتایج تجزیه واریانس اثرات نسبت ترکیب پسماند و غلظت خوراک (نسبت ترکیب پسماند با آب) بر میزان تولید بیوگاز در جدول (۱) ارائه شده است. بررسی نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر غلظت خوراک بر میزان بیوگاز تولیدی در سطح احتمال ۱٪ و تأثیر نسبت ترکیب در سطح احتمال ۵٪ معنی دار هستند؛ اما اثر متقابل آن‌ها فاقد تأثیر معنی‌دار است. این نتایج با ضریب تبیین ۰/۹۳۴۰ و ضریب تغییرات ۵/۵۷ حاصل شدند که می‌تواند دلیلی برای قابل اعتماد بودن نتایج به دست آمده باشد.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نسبت ترکیب پسماند و غلظت خوراک بر میزان بیوگاز تولیدی

Table 1. Results of analysis of variance the effect of of waste composition and feed concentration on the biogas production

منابع تغییر S.V	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)
تیمار Treatment	5	2917.41	583.48**
نسبت ترکیب- A Combination ratio	2	158.35	79.17*
غلظت- B Concentration	1	2637.07	2637.07**
اثر متقابل- AB Interaction	2	121.99	n.s.60.99
خطا Error	12	206.03	17.17
کل Total	17	3123.44	-

\*\* معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد، \* معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد، n.s عدم معنی داری

هر یک از میانگین سه تکرار به دست آمده‌اند (شکل ۳). نمودار حاصل از R1 شامل میانگین حاصل از سه تکرار با نسبت ترکیبی ۱۰:۹۰ پسماند کدو و کود گاوی، نمودار تیمار R2 میانگین حاصل از سه تکرار در نسبت ترکیبی ۲۰:۸۰ و نمودار مربوط به تیمار R3 میانگین تکرارها در نسبت ترکیبی ۳۰:۷۰ می‌باشد و همه این تیمارها با نسبت ترکیب ۱:۱ پسماند با آب انجام شدند و مدت زمان ماند آزمایش ۳۲ روز بود. با توجه به نمودارها می‌توان بیان کرد که در روزهای نخست بارگذاری هاضم‌ها، یک رشد ناگهانی در میزان تولید گاز مشاهده می‌شود اما پس از آن میزان تولید بیوگاز یک روند کاهشی را پیش می‌گیرد که این می‌تواند به دلیل رشد سریع باکتری‌های اسیدساز و کاهش سریع pH در خوراک باشد که با افزودن کربنات کلسیم این روند کاهشی کند می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود تمامی تیمارها تقریباً شرایط یکسانی

خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل بر اساس ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیان می‌شود. نحوه محاسبه این ضریب در رابطه (۲) ارائه شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{total}} \quad \text{Error! No text of specified style in document.} \quad (2)$$

که در آن‌ها:  $SS_{residual}$  بیانگر مجموع مربعات باقیمانده،  $SS_{total}$  معرف مجموع مربعات کل ( $SS_{residual} + SS_{model}$ ) است.

همچنین مدل رگرسیونی برای تخمین میزان بیوگاز تولیدی با استفاده از مقادیر گذشته متغیرها به صورت زیر (رابطه ۳) ارائه می‌شود.

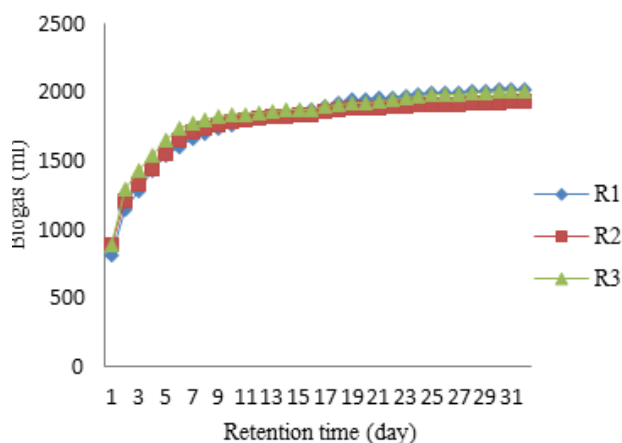
$$\text{Biogas} = 74.33 + 4.12 * A[1] - 1.38 * A[2] + 12.10 * B + 2.97 * A[1]B + 0.39 * A[2]B \quad (3)$$

که در آن: A[1] سطح اول از نسبت ترکیب پسماند، A[2] سطح دوم از نسبت ترکیب پسماند و B نسبت ترکیب پسماند با آب می‌باشد و بیوگاز تولیدی در این معادله بر حسب ml/day محاسبه می‌شود.

#### ۳-۲- بررسی اثرات ترکیبات مختلف پسماند بر میزان بیوگاز تولیدی

به منظور تحلیل و بررسی میزان بیوگاز تولیدی از ترکیبات مختلف پسماند، نمودار مربوط به تیمارهای R1, R2, R3 نشان داده شده‌اند که

را در پی گرفته است. وی این شرایط را به دلیل استفاده از کود تازه گاوی توجیه نموده است که با ادعای پژوهش حاضر همخوانی دارد. نتایج بیوگاز تولیدی تجمعی در هر سه نسبت ترکیبی از کود گاوی و پسماند کدوی آجیلی در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به این شکل بیشترین بیوگاز تولیدی مربوط به تیمار R1 یعنی نسبت ترکیب ۱۰:۹۰ می باشد.



شکل ۴- میزان بیوگاز تولیدی تجمعی برای تیمارهای مختلف در ترکیب ۱:۱ پسماند با آب

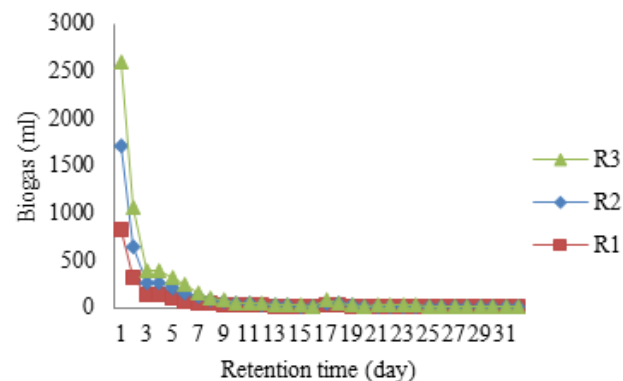
Fig 4. The cumulative biogas production for different treatments in 1:1 combination of waste with water

نتایج مطالعه Elijah *et al.* (2009) در بررسی میزان تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی و سیوس برنج با استفاده از سه نسبت ترکیبی ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵ و ۱۰:۱۰۰ نشان داد که با استفاده از سیوس برنج به تنهایی به عنوان خوراک هاضم، تولید نشد و با افزایش سهم کود گاوی در ترکیب، میزان تولید بیوگاز افزایش یافت. نتایج تحقیق Doagoi *et al.* (2011) در بررسی فرآیند تولید بیوگاز از مخلوط کود گاوی و پسماند گلاب گیری با نسبت های ۹۵:۵، ۹۰:۱۰، ۸۵:۱۵ و ۸۰:۲۰ نیز نشان داد که بیشترین میزان تولید مربوط به درصد کود بالا یعنی ۱۵ و ۲۰ درصد بوده است که این نتیجه نیز با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. به طور کلی می توان گفت که در نتایج مطالعات انجام شده توسط محققین مؤید نتیجه به دست آمده در تحقیق حاضر است که با افزایش سهم کود گاوی در ترکیب، میزان تولید بیوگاز افزایش می یابد.

### ۳-۳- بررسی اثرات غلظت های خوراک بر میزان بیوگاز تولیدی

در سری دوم آزمایشات برای بررسی تأثیر غلظت بر میزان تولید بیوگاز، پسماند با نسبت ۲:۱ با آب مخلوط شدند (میزان ۲۰۰ گرم پسماند و ۴۰۰ میلی لیتر آب). نتایج حاصل از این آزمایش به صورت نمودارهایی برای هر یک از نسبت های ترکیب پسماند در شکل (۵) ارائه شده است.

را داشته اند. در روزهای ابتدایی آزمایش میزان تولید روزانه بیوگاز روند صعودی داشته و سپس میزان تولید کاهش یافته است. با افزودن کربنات کلسیم روند نسبتاً ثابتی طی شده و در پایان روز سی و دوم میزان تولید متوقف شده و به نزدیک صفر می رسد.



شکل ۳- میزان بیوگاز تولیدی روزانه برای تیمارهای مختلف در ترکیب ۱:۱ پسماند با آب

Fig 3. Daily biogas production for different treatments in 1:1 combination of waste with water

همان طور که پیش تر بیان شد استفاده از کود گاوی در ترکیب با پسماندهای کشاورزی باعث بهبود فرآیند هضم بی هوازی و افزایش میزان تولید بیوگاز می شود چرا که می تواند مواد مغذی لازم برای باکتری ها را در محیط هضم فراهم کند (Fang *et al.*, 2011). وجود مواد غذایی مورد نیاز باکتری ها در محیط هضم می تواند یکی از دلایل افزایش سریع تولید گاز در روزهای نخست باشد. روند کاهشی مشاهده شده در ادامه فرآیند هم می تواند دلایل بسیاری از جمله کاهش pH محیط هضم داشته باشد که در این صورت فعالیت باکتری های متانزا در محیط اسیدی کاهش پیدا کرده و منجر به کاهش میزان تولید گاز روزانه خواهد شد. از دلایل دیگر که مربوط به شرایط خاص در این آزمایش است، می توان به غلظت بالای خوراک اشاره کرد که باعث کاهش تولید بیوگاز می شود و در تطابق با نتایج ارائه شده توسط Webb & Freda (1985) است. آن ها در بررسی میزان تولید بیوگاز از کود مرغی در شرایط دمایی مزوفیلیک از غلظت های خوراک ۱، ۲، ۴، ۶، ۷ و ۱۰ درصد استفاده کردند و در نهایت گزارش نمودند که غلظت های بالای خوراک کاهش تولید بیوگاز را به دنبال دارد در حالی که بیشترین میزان بیوگاز تولیدی در غلظت ۴ درصد از کل ماده ی جامد حاصل شد.

در پژوهش انجام شده توسط Keshavarzian & Rashidi (2015) ترکیب تغاله نیشکر و کود تازه گاوی با نسبت های ۱۰۰:۰، ۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ در دو شرایط دمایی مزوفیلیک و ترموفیلیک استفاده کرد که در روزهای ابتدایی آزمایش میزان تولید گاز روزانه در هر دو شرایط دمایی از میزان بالایی برخوردار بوده و سپس یک روند کاهشی

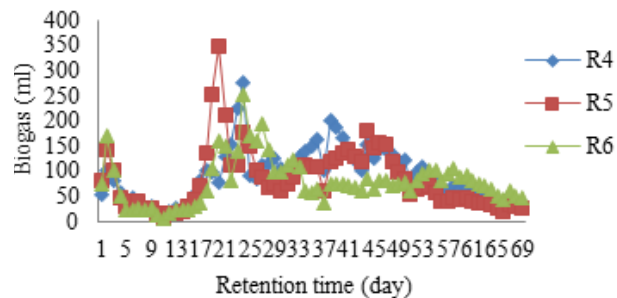
همچنین افزایش غلظت کل مواد جامد نیز از جمله دلایل کاهش میزان بیوگاز تولیدی است به همین دلیل غلظت مواد باید به گونه‌ای باشد که نیاز به همزدن مداوم نداشته باشد و چسبندگی و لایه لایه شدن محلول داخل هاضم نشود که به این نیاز در آزمایش دوم به دلیل افزودن نسبت دو برابر آب بهتر پاسخ داده شد. به عبارت دیگر می‌توان این گونه بیان کرد که آب در ترکیب با سایر مواد باعث افزایش قابلیت تجزیه پذیری و سهولت حرکت باکتری‌ها می‌شود. به علاوه، آب از عوامل اصلی در تغذیه میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. قابل ذکر است که میزان رطوبت بالا هم ممکن است مشکلاتی از جمله عدم پیشرفت فرآیند هضم را ایجاد کند. به همین دلیل باید مطابق با میزان تجزیه‌پذیری بافت سلولی پسماند گیاهی و فعالیت بهتر آنزیم‌های سلولی نسبتی بهینه را برگزید.

همان‌طور که گفته شد، در تحقیق حاضر ترکیب نسبت ۲:۱ آب و پسماند در مقایسه با نسبت ترکیب ۱:۱ آب و پسماند نتیجه بهتری در میزان تولید بیوگاز داشت. این نتیجه با نتایج حاصل از مطالعه Fantozzi & Buratti (2009) در بررسی تولید بیوگاز از کودهای مرغی، خوک و گاوی به علاوه پوست زیتون رقیق شده با آب همخوانی دارد. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که افزودن آب باعث افزایش تولید متان می‌شود. Fang *et al.* (2011) در پژوهش خود برای تولید بیوگاز از ملاس چغندر قند و شیر قند در ترکیب با کود گاوی، مواد را با دو نسبت متفاوت آب (۵۰ درصد و ۷۰ درصد) رقیق کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که بیشترین میزان متان در نسبت بالاتر آب در خوراک هاضم تولید شده بود. Shueb & Singh (2000) در بررسی تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی و سنبل آبی در سه نسبت متفاوت ترکیب با آب (۱، ۳، ۵ برابر پسماند) گزارش کردند که بیشترین میزان تولید بیوگاز مربوط به بالاترین نسبت آب یعنی ترکیب ۱:۵ پسماند با آب بوده است.

### ۳-۴- نتایج بهینه‌سازی متغیرها

برای تعیین مقادیر بهینه نسبت ترکیب پسماند و غلظت خوراک (نسبت ترکیب پسماند با آب)، حدود و شروط بهینه‌سازی مطابق با جدول (۲) مشخص گردید. مقادیر پارامترهای مذکور برای بیشینه کردن میزان تولید بیوگاز تعیین شد. مقدار بهینه برای نسبت ترکیب برابر با ترکیب ۱۰:۹۰ پسماند کدوی آجیلی با کود گاوی و میزان بهینه غلظت ترکیب ۱:۲ پسماند با آب به دست آمد. مقدار ماکزیمم تولید بیوگاز به ازای مقادیر بهینه تعیین شده برای پارامترهای مستقل با میزان مطلوبیت ۹۱/۵٪ برابر با ۹۳/۵۲۶۷ ml/day محاسبه شد.

نمودار حاصل از R4 شامل میانگین حاصل از سه تکرار با نسبت ترکیبی ۱۰:۹۰ پسماند کدو و کود گاوی، نمودار تیمار R5 میانگین حاصل از سه تکرار در نسبت ترکیبی ۲۰:۸۰ و نمودار مربوط به تیمار R6 میانگین تکرارها در نسبت ترکیبی ۳۰:۷۰ می‌باشد و مدت زمان ماند آزمایش ۶۹ روز بود. البته قابل ذکر است که در روزهای بعدی نیز مقدار گاز تولیدی قابل اندازه‌گیری بود اما به دلیل ناچیز بودن مد نظر قرار نگرفت. مانند سری اول آزمایش‌ها، پس از کاهش تولید بیوگاز در روزهای ابتدایی آزمایش برای افزایش pH به تیمارهای کربنات کلسیم اضافه شد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵) می‌توان گفت که میزان تولید بیوگاز در روزهای ابتدایی افزایش اندکی داشته است و در روزهای هفتم تا نوزدهم یک روند کاهشی را در پیش گرفته است و پس از پایان روز نوزدهم میزان تولید روزانه حالت صعودی داشته و سپس در روزهای پایانی روندی کاهشی را طی کرده است. تولید روزانه بیوگاز در نمودار R5 در روز اندکی افزایش پیدا کرده و سپس در روز هجدهم به اوج خود رسیده است و در روزهای پایانی حالت کاهشی را در پی گرفته است. این روند برای سایر تیمارها نیز کمابیش تکرار شده است.



شکل ۵- میزان بیوگاز تولیدی روزانه برای تیمارهای مختلف در ترکیب ۱:۲ پسماند با آب

Fig 5. Daily biogas production for different treatments in 1:2 combination of waste with water

با مقایسه میانگین روزانه میزان تولید گاز در سری اول و دوم آزمایش‌ها مشاهده شد که در سری دوم یعنی با غلظت کمتر، میزان تولید گاز افزایش یافته است. این نتیجه می‌تواند در اثر تغییر غلظت خوراک و کاهش درصد کل مواد جامد حاصل شده باشد زیرا آزمایش دوم در شرایطی کاملاً مشابه با آزمایش اول انجام شد و تنها تغییر ایجاد شده، غلظت خوراک بوده است. می‌توان میزان افزایش بیوگاز را در این غلظت و با نسبت‌های ترکیب مشابه خوراک مشاهده کرد.

در سری اول آزمایش‌ها در روزهای اول میزان بیوگاز رشد صعودی داشت اما در روزهای بعدی سیر نزولی را طی می‌کرد و این نسبت ترکیب با آب برای این پسماند به خوبی پاسخگو نبود. دلایل متعددی برای این میزان کاهش از جمله اسیدی شدن محیط به دلیل افزایش کربن، تشکیل گاز آمونیاک به دلیل افزایش نیترژن که منجر به توقف متان می‌شود و

حاصل از آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر غلظت خوراک بر میزان بیوگاز تولیدی در سطح احتمال ۱٪ و تاثیر نسبت ترکیب در سطح احتمال ۵٪ معنی دار هستند اما اثر متقابل آن‌ها فاقد تاثیر معنی دار است. ارتباط بین تولید بیوگاز با متغیرهای غلظت خوراک و نسبت ترکیب به شکل معادله رگرسیونی ارائه شد. با توجه به نتایج حاصل از دو سری آزمایش می‌توان بیان کرد که در سری اول آزمایش‌ها در مدت زمان ماند ۳۲ روز و نسبت ترکیب پسماند با آب ۱:۱ بیوگاز تولیدی عملکرد مناسبی نداشت. در حالی که با تغییر دادن غلظت خوراک و رقیق کردن آن‌ها با نسبت ترکیب پسماند و آب ۱:۲ مقدار بیوگاز تولیدی رو به افزایش نهاد. مقدار بیوگاز تولیدی در هر دو سری آزمایش برای نسبت ترکیب پسماند کدوی آجیلی و فضولات دامی ۱۰:۹۰ بیشتر از سایر ترکیبات بود. مقدار ماکزیمم تولید بیوگاز به ازای مقادیر بهینه تعیین شده برای پارامترهای مستقل با میزان مطلوبیت ۹۱/۵٪ برابر با ۹۳/۵۲۶۷ ml/day محاسبه شد.

برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت سامانه استحصال بیوگاز، از فلومتر با دقت بالا برای اندازه‌گیری میزان بیوگاز تولیدی استفاده کرد. به طوری که قابلیت ثبت لحظه‌ای گاز تولیدی و پایش روند تولید فراهم شود. همچنین پیشنهاد می‌شود بیلان انرژی برای فرآیند تولید بیوگاز ارزیابی شود و شاخص‌های عملکرد خالص انرژی و بازده انرژی محاسبه شوند.

## ۵- منابع

- Bassani, I., Kougiyas, P. G., and Angelidaki, I. (2016). *In-situ biogas upgrading in thermophilic granular UASB reactor: key factors affecting the hydrogen mass transfer rate*. *Bioresource Technology*, 221: 485-491.
- Budiyono, O., Widiasa, I.N., Johari, S., and Sunars, O. (2014). *Increasing biogas production rate from cattle manure using rumen fluid as inoculums*. *International Journal of Science and Engineering*, 6(1): 32-38.
- Buekens, A. (2005). *Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies*. In Conference: *The future of residual waste management in Europe*, pp: 17-18.
- Doagoi, A.R. (2009). *Assessing the effects of different factors on biogas production from Damask Rose bagasse and modeling the production processes by Gompertz model*. M.Sc. Thesis, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Farsi)

## جدول ۲- شروط بهینه‌سازی فرآیند تولید بیوگاز

Table 2. Optimizing conditions for the biogas production process

شرط بهینه‌سازی Optimizing condition	محدوده Range	پارامتر Parameter
In range	30:70	نسبت ترکیب Combination ratio
In range	2000	غلظت خوراک Feed concentration
Maximize		میزان تولید بیوگاز Biogas production

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی تولید بیوگاز از ترکیب پسماند کدوی آجیلی و کود گاوی آزمایش‌هایی با استفاده از سه نسبت ترکیب پسماند به کود گاوی (۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰، ۳۰:۷۰) در دو غلظت متفاوت خوراک انجام شد. سامانه استحصال تولید بیوگاز شامل ۹ هاضم شیشه‌ای یک لیتری که درون حمام آب گرم قرار داده شدند برای انجام آزمایش‌ها آماده شد. میزان بیوگاز تولیدی به صورت روزانه از طریق روش جابه‌جایی آب اندازه‌گیری شد. برای بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ و آزمایش فاکتوریل کامل در سه تکرار استفاده شد. نرم افزار Design Expert 12 برای تجزیه و تحلیل داده‌های

- Doagoi, A.R., Ghazanfari Moghaddam, A., and Fooladi, M.H. (2011). *Investigating and Modeling the Process of Biogas Production while Utilizing the Wastes of Damask Rose Distillation*. *Iranian Journal of Biosystem Engineering (IJBSE)*, 42(1): 95-102. (In Farsi)
- Elijah, T.I., Ibifuro, A.M., and Yahaya, S.M. (2009). *The study of cow dung as co-substrate with rice husk in biogas production*. *Scientific Research and Essay*, 4(9): 861-866.
- Fang, C., Boe, K., and Angelidaki, I. (2011). *Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure*. *Water Research*, 45: 3473-3480.
- Fantozzi, F., and Buratti, C. (2009). *Biogas production from different substrates in an experimental continuously stirred tank reactor anaerobic digester*. *Bioresource Technology*, 100: 5783-5789.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley and Sons, Inc. Publication, United States, America.



- Gueguim Kana, E. B., Oloka, J.K., Lateef, A., and Adesiyani, M. O. (2012). *Modeling and optimization of biogas production on saw dust and other co-substrates using artificial neural network and genetic algorithm*. Renewable Energy, 46: 276-281.
- Karatky, L., Jirout, T., and Nalezenc, J. (2012). *Lab-Scale technology for biogas production from lignocellulose wastes*. Acta Polytechnica, 52(3): 54-59.
- Keshavarzian, Z., and Rashidi, A. (2015). *The process of anaerobic digestion of dairy cattle waste*. International Conference on Environmental Science, Engineering and Technologies (CESET, 2015), 5-6 May, Tehran University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Latha, K., Velraj, R., Shanmugam, P., and Sivanesan, S. (2019). *Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production*. Journal of Cleaner Production, 210: 388-400.
- Prabhu, A.V., Raja, S.A., and Lee, C.L.R. (2014). *Biogas production from biomass waste*. Journal of Innovative Research in Technology, 1(8): 73-83.
- Saev, M., Koumanoval, B., and Simeonov, I.V. (2009). *Anaerobic co-digestion of wasted tomatoes and cattle dung for biogas production*. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 44(1): 55-60.
- Safari, M., Abdi, R., and Adl, M. (2016). *Study of biogas production from Canola Straw Residues, Cattle Manure and Cattle Rumen Contents*. Agricultural Mechanization and System Research, 16(65): 93-108.
- Shoeb F., and Singh, H. J. (2000). *Kinetic studies of biogas evolved from water hyacinth*, Turkey. Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring.
- Trujillo, D., Perez, J. F. and Cerebros, F. J. (1993). *Energy recovery from wastes: anaerobic digestion of tomato plant mixed with rabbit wastes*. Bioresource Technology, 45: 81-83.
- Webb, A.R., and Freda, R.H. (1985). *The anaerobic digestion of poultry manure: variation of gas yield with influent concentration and ammonium-nitrogen levels*. Agricultural Wastes, 14: 135-156.
- Zaboli, Kh., Vahedi, E., Aliarabi, H., and Ahmadi, A. (2015). *Determination of the nutritive value and investigation of the possibility of ensiling by-product pumpkin using wheat straw, wheat bran and urea*. Animal Production Research, 4(2): 39-55.
- Zaher, U., Cheong, D.Y., Wu, B., and Chen, S.H. (2007). *Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste*. Department of Biological System Engineering Washington State University, Ecology Publication No: 07-07-024.
- Zareei, S., and Khodaei, J. (2017). *Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system*. Renewable Energy, 114: 423-427.