

# پیش‌بینی و بهینه‌سازی پتانسیل تولید سوخت زیستی بیوگاز از پسماند کشاورزی و دامی

جبرائیل تقی نژاد\*، دانشجوی دکتری مکانیزاسیون انرژی در کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رضا عبدی، دانشیار دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

مهرداد عدل، استادیار پژوهشگاه مواد و انرژی کرج، البرز، ایران.

E-mail\*: taghinazhad55@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۷

## چکیده

این پژوهش با هدف دستیابی به یک فن‌آوری تولید سوخت‌های زیستی با کارآیی بالا و کم‌هزینه در مقیاس پایلوت می‌باشد. راکتور اختلاط کامل با تغذیه نیمه‌پیوسته به حجم ۱۸۰ لیتر ساخته شد. به‌منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی اثر دو نرخ بارگذاری آلی ( $m^{-3}.d^{-1}$ ) و  $VS$  (۲ kg و ۳ به ترتیب از ترکیب کود گاوی با پسماند گیاهی ذرت با نسبت ترکیبی (۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰) بر اساس مواد جامد فرار و با زمان ماند هیدرولیکی ۲۵ روز در دمای مزوفیلیک ( $35 \pm 2^\circ C$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کارایی تولید سوخت زیستی با افزایش نرخ بارگذاری کاهش داشته و بیشترین عملکرد بیوگاز در هضم ترکیبی با نرخ بارگذاری آلی ( $m^{-3}.d^{-1}$ ) و  $VS$  ۲ kg در نسبت کود گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵) به میزان  $VS$  added  $11/17$  (In.  $kg^{-1}$ ) به دست آمد. بالاترین درصد متان در هر دو نرخ بارگذاری در محدوده تولید پایدار بیوگاز حدود ۵۸ تا ۶۲ درصد و میزان کاهش جامدات آلی ورودی بین ۵۴ تا ۷۴ درصد متغیر بود. نتایج نشان داد تخمین پتانسیل تولید بیوگاز توسط مدل‌های لوجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده در هاضم نیمه‌پیوسته با ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیش از ۹۹٪ بهترین کارایی را داشته است.

واژه‌های کلیدی: سوخت زیستی، کود گاوی، کلش ذرت، راکتور، نیمه‌پیوسته.

## ۱- مقدمه

ترکیب کود دامی با بقایای گیاهی می‌تواند به رفع این چالش کمک کند که نه تنها برای میکروارگانیسم‌ها ضروری است، بلکه شرایط مطلوبی برای تعادل مغذی‌ها ایجاد می‌نماید که در رشد متان مؤثر است (Tait et al., 2009). نسبت کربن به نیتروژن در پسماندهای گیاهی بالاست در مقابل این نسبت برای کودهای حیوانی نسبتاً پایین است. به‌عنوان مثال در کود مرغی و گاوی به ترتیب حدود ۱۷/۹۷ و ۱۱/۷۵ است و با ترکیب کود گاوی با

استفاده از فن‌آوری بیوگاز به‌عنوان رویکردی نوید بخش، در تولید سوخت‌های زیستی به‌خصوص در طرح‌های توسعه، مدیریت و ساماندهی ضایعات آلی تولید شده در مناطق روستایی و کشت صنعت و دامپروری‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های اصلی استفاده از بقایای گیاهی در فرایند هضم بی‌هوازی، پیچیدگی ساختار لیگنوسلولزی بوده که باعث ایجاد مشکل در تجزیه مواد می‌شود.

اساس وزن جامد آلی فرار در شرایط آزمایشگاهی و دمایی مزوفیلیک بررسی شد. نتایج نشان داد متوسط تولید تجمعی متان به ترتیب ۱۹۳، ۲۵۶، ۳۴۸ و ۱۴۹ نرمال لیتر بر کیلوگرم ماده جامد خشک فرار بود (Sanaei- Moghadam et al., 2014). پژوهشگران زیادی به بررسی واکنش سینتیک تولید بیوگاز و مدل‌های سینتیکی توسعه یافته در فرایند هضم بی‌هوازی در سوبستراهای مختلف پرداخته‌اند و مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده‌اند که در مدیریت این فرایند نقش عمده‌ای دارد. Zhu و همکاران (۲۰۰۹) در فرایند تولید بیوگاز از باگاس چغندر قند و زباله‌های سلولزی، از مدل تغییر یافته گومپرتز استفاده کردند و این مدل برازش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته است. همچنین بررسی‌های زیادی روی تولید بیوگاز از موز و ترکیب با ضایعات موز انجام شده است ولی مدلی برای سینتیک تولید بیوگاز ارائه نشده است (گتک و ماهانتا، ۲۰۱۴). در مطالعه‌ای توسط Maamri and Amrani (۲۰۱۴) به منظور تولید بیوگاز از لجن ضایعات فعال و ترکیب فضولات گاوی به عنوان ماده تلقیح، معادله اصلاح شده مناسب برای تولید بیوگاز برآورد شد. معادله ارائه شده ارتباط بین بیشینه بیوگاز تولیدی و پتانسیل تولیدی را با ضریب رگرسیون ۰/۹۹۶ به‌طور مطلوبی بیان نمود. در پژوهشی دیگر باهدف بهینه‌سازی و افزایش تجزیه‌پذیری ضایعات برای مدل‌سازی هضم بی‌هوازی مواد آلی ضایعات جامد شهری، چندین مدل ریاضی (مدل گومپرتز<sup>۱</sup>، تابع لوجستیک<sup>۲</sup>، معادله گوسین<sup>۳</sup> و اولین مدل توصیه‌شده) مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد در اکثر تیمارها، مدل‌های گومپرتز و اولین مدل توصیه‌شده به منظور بهره‌وری بالای تولید متان بهترین برازش را داشته است (Nielfa et al., 2015). همچنین در مدل‌سازی فرایند تولید بیوگاز از ترکیب فضولات گاوی با پوست درخت در شرایط آزمایشگاهی تحت

خمیر سبب‌زمینی این نسبت به ۲۴/۴ درصد افزایش یافته و از این طریق میزان بیوگاز استحصالی را افزایش داده‌اند (Sanaei- Moghadam et al., 2014; Tong et al., 2013). هضم بی‌هوازی یک فرآیند بیولوژیکی است که از تجزیه زیستی ضایعات توسط باکتری‌ها در شرایط فقدان یا کمی اکسیژن تولید بیوگاز می‌کند (Song et al., 2011; Madsen et al., 2012). این گاز عمدتاً متشکل از متان و دی‌اکسیدکربن است و تنها محتوای متان آن دارای پتانسیل استفاده به‌عنوان سوخت است که در چهار مرحله متوالی هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی و در نهایت متان تولید می‌شود (Umar et al., 2013). پارامترهای زیادی بر میزان تولید بیوگاز تأثیر دارند مانند دمای محیط تولید، pH، نسبت غلظت سوبسترا، نوع خوراک تغذیه، همزن، پیش تیمار اولیه، زمان ماند هیدرولیکی و نسبت کربن به ازت و نوع هاضم (پیوسته و غیرپیوسته) بر فرآیند هضم که به‌طور آهسته در مدت زمان ۳۰-۵۰ روز انجام می‌گیرد (Sreenivas et al., 2010). پژوهشگران در پژوهشی به‌منظور بررسی میزان تولید بیوگاز از ضایعات میوه در ترکیب با فضولات گاوی با دو روش ناپیوسته و نیمه‌پیوسته نشان دادند که تزریق روزانه مواد آلی، موجب تولید حجم قابل‌توجهی از بیوگاز در مدت زمان طولانی گردید (دعاگویی و همکاران، ۱۳۸۷). در پژوهشی برای تولید بیوگاز از بقایای گیاهان ذرت، برنج و پنبه با کود گاوی نشان دادند که ساقه‌های ذرت در ترکیب با کود گاوی عملکرد بیشتری داشته است (El-Shinnawi et al., 1989). در پژوهشی دیگر ترکیب بقایای گیاهی ذرت، گندم و برنج با کود مرغی باعث تجزیه سریع‌تر سوبسترا شده است. میزان بیوگاز تولیدی در ساقه‌های ذرت نسبت به بقیه بیشتر بوده است (Zhang et al., 2014). در پژوهشی دیگر، تولید متان از هضم ترکیب ضایعات سبب‌زمینی و کود گاوی در سه نسبت ۸۰:۲۰، ۵۰:۵۰ و ۲۰:۸۰ و تیمار فقط کود دامی بر

از منابع علمی طراحی گردید (Xie et al., 2012). اجزای سامانه هضم از چهار بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از: الف- واحد کنترل خودکار (دما، دور همزن- زمان همزنی)؛ ب- سیستم تغذیه و تخلیه؛ ج- مخزن هاضم با الکتروگیربکس متناسب؛ د- سیستم اندازه‌گیری و ذخیره گاز.

برای ایجاد حرارت مطلوب میان‌خواه (مزوفیلیک  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ) و حفظ شرایط یکنواخت واکنش‌ها در طول فرایند هضم، المنت شیشه‌ای مناسب کنترل شده در داخل هاضم گذاشته شد. برای ایزولاسیون دمای هاضم از عایق صنعتی الاستومریک مخصوص محیط باز با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. برای ایجاد یک مخلوط همگن از همزن مکانیکی دو پره با استفاده از الکتروگیربکس متناسب سه فاز (۳۸۰ ولت) با سرعت چرخشی حدود ۱۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در ساعت استفاده شد.



شکل ۱. شماتیک هاضم نیمه‌پیوسته

## ۲-۲- ارزیابی سامانه هضم

برای ارزیابی سامانه هضم از ترکیب فضولات گاوی و بقایای گیاهی ذرت در راکتور ساخته شده استفاده گردید. در این آزمایش به منظور افزایش بهره‌وری متان در شرایط دمای میان‌خواه (مزوفیلیک  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ) با نرخ بارگذاری آلی (OLR)  $2$ ،  $3$  کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب

دمای مزوفیلیک با استفاده از راکتور ناپیوسته گزارش شده که مدل‌های لوجستیک و گومپرتز بهترین ضریب همبستگی را نسبت به تابع نمایی داشته است و تیمار ترکیبی باعث افزایش ۱۸٪ تولید بیوگاز شده است (Latinwo and Agarry, 2015). هدف از این پژوهش، مطالعه اثر نرخ بارگذاری آلی ترکیب کود گاوی با کلش ذرت بر تولید گاز زیستی تحت دمایی مزوفیلیک با استفاده از سامانه هضم اختلاط کامل با تغذیه نیمه‌پیوسته در مقیاس پایلوت است. سپس پتانسیل تولید بیوگاز توسط مدل‌های لوجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده در هاضم نیمه‌پیوسته برآورد شده است.

## ۲- روش‌ها

### ۲-۱- تهیه و آنالیز لجن تلقیح و کود گاوی

لجن تلقیح مورد نیاز از خروجی هاضم در پژوهشگاه مواد و انرژی کرج تهیه شد. کود گاوی تازه به‌صورت هفتگی از مجتمع گاوداری و بقای کلش ذرت (خردشده به قطعات ۱-۲ cm) از کشت و صنعت دامپروری مغان تهیه شد. سپس خصوصیات اولیه آن‌ها قبل از انجام آزمایش از نظر محتوای ماده آلی، نیتروژن کل، کربن کل، ماده جامد کل، ماده جامد فرار، میزان pH, EC و نسبت کربن به ازت بر اساس استاندارد (APHA) تعیین شد (APHA, 1998).

### ۲-۱-۱- مشخصات ساخت راکتور

راکتور بی‌هوای نیمه‌پیوسته تک‌مرحله‌ای در مقیاس پایلوت طراحی و ساخته شد. شماتیک هاضم در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است. از نظر شکل هندسی، استوانه‌ای و جنس آن آهن گالوانیزه ۴ میلی‌متری به حجم ۱۸۰ لیتر بود. دو شیر کنترل حجم در هر دو طرف بالا و کف برای ورود، خروج و نمونه‌برداری در هاضم استفاده شد. این سامانه هضم، بر مبنای اصول تجربی و با استفاده

نرخ بارگذاری آلی (OLR) در روز با در نظر گرفتن حجم راکتور برحسب لیتر و جرم ماده خام ورودی به هاضم در روز (m wet) برحسب gr.day-1 از رابطه ۳ استفاده شد (Adebayo et al., 2015).

رابطه (۳):

$$OLR(\text{gr}_{VS} / L_{\text{reactor}} \text{day}) = \frac{m_{\text{wet}} \cdot (TS\% / 100) \cdot (VS\% / 100)}{\text{Reactor.Capacity}(L)}$$

## ۲-۴- پیش‌بینی و تخمین فرآیند تولید بیوگاز

برای بررسی و پیش‌بینی سینتیکی فرآیند هضم، پارامترهایی نظیر بیشترین نرخ تولید تجمعی متان و زمان پیشرفت روزانه فرآیند هضم از طریق اجرای آزمایش به دست آمد. برای برازش و بررسی سینتیک داده‌های آزمایش در فرآیند تولید بیوگاز از مدل‌های مختلف و اغلب از معادلات تغییر شکل یافته استفاده شده است (Linke, 2006; Lo et al., 2010). کیفیت برازش مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و مقایسه ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) انجام گردید. روابط مدل‌ها در جدول (۱) ذکر شده‌اند. در مدل‌های ذکر شده در جدول (۱) متغیرها و پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند

Y: میزان تولید تجمعی بیوگاز در زمان t بر حسب (l .(kg VS)-1)؛ P: پتانسیل تولید تجمعی (l .(kg VS)-1)؛ بیشترین نرخ بیوگاز تولیدی روزانه (l .(kg VS.day)-1)؛ I: مدت زمان تأخیر تا شروع فرآیند تولید گاز (روز)، t: زمان پیشرفت فرآیند هضم (روز) و a، b و k: ثابت‌های به دست آمده از معادلات سینتیک فرآیند هضم هستند.

جدول ۱. معادلات سینتیکی مورد استفاده برای برازش و

مدل‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی

مدل‌های سینتیکی	معادله تغییر شکل یافته
لوجستیک تغییر شکل یافته	$Y = P \{1 - \exp[4r_m P^{-1}(\lambda - t) + 2]\}$
تابع نمایی ماکزیمم	$Y = P(1 - \exp(-kt))$
گومپرتز اصلاح شده	$Y = P \exp[-\exp(r_m P^{-1} e^{(\lambda - t)} + 1)]$

گنجایش هاضم در روز به ترتیب با نسبت کود گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰) بر اساس مواد جامد فرار (VS) با زمان ماند ۲۵ روز در دو تکرار انجام شد. در شروع کار مقدار بیوگاز ۶۰ لیتر لجن تلقیح مورد استفاده به مدت یک هفته تخلیه گردید. سپس خوراک تغذیه کود گاوی تازه به حجم ۸۰ لیتر با نرخ بارگذاری ۲ کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب بر روز اضافه گردید تا حجم به کارگیری هاضم به ۱۴۰ لیتر رسید. سپس سامانه روزانه مقدار ۵/۶ لیتر تخلیه و تغذیه مجدد گردید.

## ۲-۳- پارامترها و روش اندازه‌گیری

میزان بیوگاز خروجی راکتور با استفاده از روش جابجایی آب، اندازه‌گیری و سپس با تزریق نمونه به دستگاه کروماتوگراف گازی (GC-MS)، که نتایج از طریق قسمت جمع‌آوری اطلاعات ثبت و توسط نرم‌افزار PEAK ثبت می‌شود درصد دو گاز متان و دی‌اکسید کربن تعیین شد. برای تعیین مواد جامد کل نمونه‌ها (۱۵۰-۱۰۰ گرم) به مدت لازم در آون تحت دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک گردید. سپس میزان مواد جامد با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱): } TS = \left( \frac{C - A}{B - A} \right) \times 100$$

که در آن TS کل مواد جامد نمونه‌ها، A وزن بوتله خالی (gf)، B وزن بوتله + نمونه تر (gf) و C وزن بوتله + نمونه خشک (gf) است. برای تعیین کل مواد فرار (VS) از نمونه خشک شده قبل حدود (۵-۳ گرم) در بوتله چینی مخصوص با دمای  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  برای مدت ۲ ساعت در کوره سوزانده شد. سپس کل مواد فرار از رابطه ۲ محاسبه شد (APHA, 1998).

$$\text{رابطه (۲): } VS = \left( \frac{F - G}{F - E} \right) \times 100$$

که در آن E وزن خالی بوتله (gf)، F وزن بوتله + نمونه خشک (gf) و G وزن بوتله + نمونه خاکستر (gf) است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نسبت کربن به نیتروژن

قبل از انجام آزمایش‌ها برخی خصوصیات فضولات گاوی و کلش ذرت مانند درصد کربن و نیتروژن و در نهایت نسبت کربن به نیتروژن آنها تعیین شد تا بتوان با استناد به این نسبت‌ها، فرایند تولید بیوگاز را رصد نمود. نسبت کربن به ازت به روش کج‌لدال<sup>۵</sup> اندازه‌گیری شد (بی‌نام، ۲۰۱۱؛ سعیدی و همکاران، ۱۳۹۲). از نظر مقایسه میانگین‌ها، نسبت کربن به نیتروژن بقایای کلش ذرت و کود دامی به ترتیب با نسبت ۶۹/۶۸ و ۱۶/۳۶ بودند (جدول ۲). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد این نسبت‌ها در پسماندهای گیاهی نسبتاً بالا و به عکس در فضولات دامی مانند کودهای گاوی و مرغی و سایر کودهای دامی به مراتب پایین است. بنابراین مخلوط کردن این مواد برای رسیدن به نسبت مطلوب کربن به ازت (۳۰-۳۵) ضروری است. این نتایج با پژوهش‌های اکثر پژوهشگران همخوانی دارد. در بررسی Tong و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای نسبت کربن به ازت محصولاتی مانند گندم، ذرت و برنج به ترتیب حدود ۹۱/۱۷، ۸۸/۹ و ۹۲/۹۱ به دست آمد و این نسبت را برای کود مرغی حدود ۱۷/۹۷ گزارش کردند. همچنین Sanaei- Moghadam و همکاران در سال ۲۰۱۴ نسبت کربن به ازت را برای کود گاوی ۱۱/۷۵ به دست آوردند. به طوری که ترکیب کود گاوی با خمیر سیب‌زمینی این نسبت به ۲۴/۴ درصد افزایش یافت. در پژوهشی دیگر نیز Latinwo and Agarry در سال ۲۰۱۵ نسبت کربن به ازت برای کود گاوی ۱۴/۳۲ به دست آوردند که در ترکیب با پوست درخت این نسبت به حدود ۲۵ رسید و از این طریق توانستند میزان بیوگاز استحصال را افزایش دهند. همچنین در مطالعه‌ای ترکیب کود گاوی با یک نوع پسماند گیاهی بومی بررسی شد که نسبت کربن به ازت برای کود گاوی ۱۹ و برای پسماند گیاهی ۳۹/۶ بدست

آوردند که نشان می‌دهد بین پسماندها و کود دامی از لحاظ نسبت کربن به ازت اختلاف آماری معنی‌داری وجود داشته است (Kurnani et al., 2010). برخی خصوصیات لجن تلقیح، کود گاوی و کلش ذرت مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. خصوصیات اولیه لجن تلقیح، کلش ذرت و فضولات گاوی مورد استفاده در هاضم

لجن تلقیح	کلش ذرت	کود گاوی	مواد مورد استفاده / پارامترها
۷/۱۱ (%FM)	(%DM) ۹۰/۴۳	(%FM) ۱۶/۲۱	میزان مواد جامد کل (TS%)
۵/۵۰ (%TS)	(%TS) ۸۰/۳۳	(%FM) ۱۳/۴۸	میزان مواد جامد فرار (VS%)
۷۷/۳۸	۹۷/۶۷	۸۳/۴۱	$(\%VS.TS^{-1})$
۷/۰۸	N.D	۷/۴۹	pH
(%TS) ۳۷/۱۵	۴۳/۹۰	(%TS) ۳۲/۴۰	کربن کل (TC %)
۱/۷۴ (%TS)	۰/۶۳	۱/۹۸ (%TS)	نیتروژن کل (TN %)
۲۱/۳۵	۶۹/۶۸	۱۶/۳۶	(%) C/N

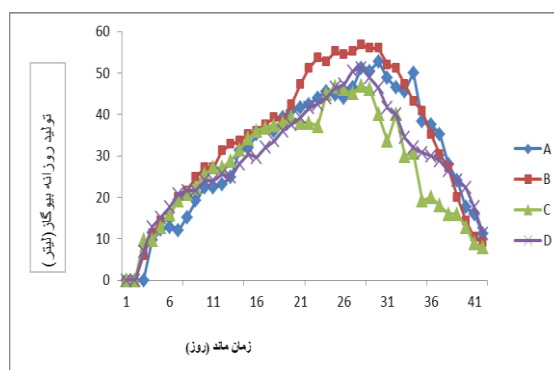
TS: total solid, VS: volatile solids, TC: Total carbon; TN: (Dry matter) and (Fresh matter), DM: total nitrogen, FM: ND: Not determined

#### ۳-۲- تولید بیوگاز و پارامترهای مؤثر

شکل (۲) تغییرات روزانه تولید بیوگاز در شرایط دمایی مزوفیلیک در هاضم نیمه‌پیوسته پایلوت از ترکیبات مختلف فضولات گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰) بر اساس مواد جامد فرار به ترتیب با نرخ بارگذاری آلی ۲ و  $3 \text{ kgVS} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$  کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب انجام شد. همین‌گونه که در شکل مشهود است در روزهای اول به دلیل ترکیب لجن بی‌هوایی با فضولات دامی و عدم سازگاری میکروارگانیسم‌ها با خوراک اصلی، میزان بیوگاز تولیدی پایینی است. سپس به تدریج روند صعودی پیدا کرده به طوری که در اواسط بارگذاری‌ها سطح بهینه تولید بیوگاز حاصل شد. برای

متان تیمارهای ترکیب فضولات گاوی و بقایای کلش ذرت در هر دو بارگذاری آلی در بالاترین سطح قرار داشتند و بازده تولید متان با افزایش نرخ بارگذاری کاهش داشته است. نتایج ارزیابی بیانگر آن است که مناسب‌ترین تیمار، با متوسط بازده تولید بیوگاز ۳۱۱/۱۷ (IN. kg- و (VS added) ۲۹۶/۲۹۱ نرمال لیتر بر کیلوگرم ماده جامد خشک مربوط به ترکیب نسبت فضولات گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵) به ترتیب برای نرخ بارگذاری آلی ۲ و ۳ kg (m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) VS. ۳ کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب بوده است. همچنین بازده تولید بیوگاز برای ترکیب نسبت فضولات گاوی به کلش ذرت (۵۰:۵۰) و ۲۵۹/۵ و (VS added) ۲۳۵/۳۸ (IN. kg<sup>-1</sup> VS) نرمال لیتر بر کیلوگرم ماده جامد خشک به ترتیب برای نرخ بارگذاری آلی ۲ و ۳ kg S. (m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>) کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب بوده است. با توجه به این‌که ترکیبات عمده بیوگاز، متان و دی‌اکسید کربن و اندکی گازهای دیگر است، لازم است درصد متان و در نهایت میزان متان انباشته مورد نظر قرار گیرد. نتایج میانگین متان انباشته در طی ۴۲ روز نشان داد از لحاظ درصد متان موجود در گاز تولیدی اختلاف آماری معنی‌داری بین ترکیبات مختلف وجود نداشت و درصد متان در روزهای پایدار تولید حدود ۵۸ تا ۶۲ درصد بود. اما از لحاظ تولید متان انباشته، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین ترکیبات و بارگذاری‌های آلی متفاوت بود. در مجموع می‌توان گفت پتانسیل تولید بیوگاز در هر دو نرخ بارگذاری نزدیک به هم بوده و افزایش مقدار خوراک ورودی با مواد جامد فرار بیشتر، تنها زمان رسیدن به این پتانسیل را کاهش داده است. نتایج نشان می‌دهد میزان تولید متان در تیمارهای ترکیبی به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار فقط کود گاوی بوده است. که احتمالاً به دلیل فراهم شدن نسبت کربن به ازت مناسب برای رشد باکتری‌های متان ساز در محدود مناسب نسبت کربن به نیتروژن بین ۳۰-۹ باشد

تداوم پایداری تولید، بعد از اتمام زمان اقامت ۲۵ روز به مدت ۱۴ روز سامانه بدون بارگذاری ادامه یافت. نتایج نشان داد حالت پایداری تولید بیوگاز برای نرخ بارگذاری مختلف در محدوده روزهای ۲۰-۳۵ به میزان حدود ۵۱/۵، ۵۶/۵، ۴۷ و ۵۱ لیتر در روز به ترتیب با نسبت کود گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰) و نرخ بارگذاری آلی (OLR) ۲ و ۳ کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب گنجایش هاضم در روز بود.

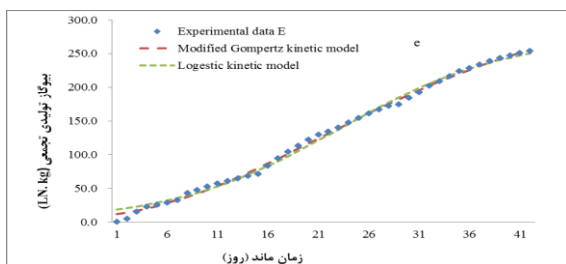
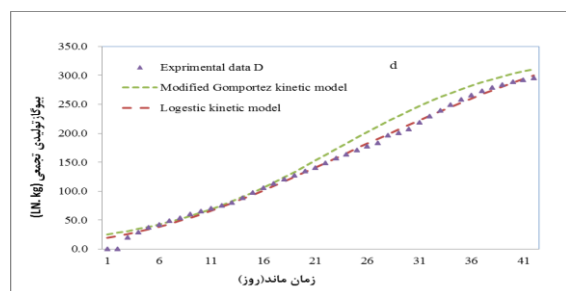
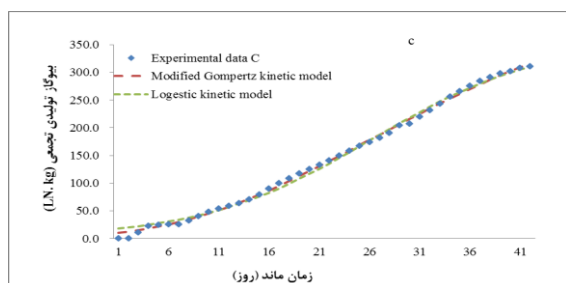


شکل ۲. روند تولید روزانه بیوگاز از ترکیب فضولات گاوی با ساقه ذرت

A: (OLR=۲) تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 B: (OLR=۳) تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 C: (OLR=۲) تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 D: (OLR=۳) تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت) بر اساس مواد جامد فرار

به عبارتی با افزایش نرخ بارگذاری، میزان بیوگاز آن‌ها افزایش یافته ولی بازده تولیدی آن‌ها کاهش داشته است. این کاهش احتمالاً به دلیل تجمع اسیدهای چرب و در نتیجه کاهش pH بوده است. یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های دیگر در هاضم نیمه‌پیوسته همخوانی دارد (Adebayo1 et al., 2015). نتایج ارزیابی و آنالیز آماری نشان داد که از نظر تولید متان بین هاضم‌ها با ترکیب مختلف، تفاوت آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد. از نظر مقایسه میانگین‌ها، بازده تولید

غیر متعادلی در درون هاضم به وجود آورده و بعد از آن به حالت عادی برمی‌گردد. بررسی ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های سینتیکی گومپرتز و لجستیک در تیمارهای مختلف با میانگین بیش از ۰/۹۹ درصد، بهترین برازش را نسبت به تابع نمایی ماکزیم داشته است. برای بررسی بیشتر انطباق مدل‌ها با داده‌های آزمایشی پایلوت علاوه بر  $R^2$ ، ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) برای هر دو مدل محاسبه گردید. جدول (۴) مقایسه توأم این مقادیر را نشان می‌دهد. مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها با داده‌های تحقیقاتی پایلوت در سطح بالایی مطابقت دارند. نتایج بیانگر این است که دو مدل گومپرتز و لجستیک تغییر شکل یافته در راکتور نیمه پیوسته بهترین برازش را داشته و به خوبی توانایی تخمین و پیش‌بینی پتانسیل تولید متان را دارند.



(Siddiqui et al., 2011). پایین بودن این نسبت در فضولات گاوی باعث کاهش تولید متان شده است و بقایای گیاهی مانند ذرت که دارای نسبت بالایی هستند می‌توانند در ترکیب با فضولات گاوی میزان قابل توجهی متان تولید کنند. نتایج این پژوهش با مطالعات Zhang و همکاران تا حدودی مطابقت دارد ( Zhang et al., 2014).

مقایسه کاهش درصد‌های ماده آلی فرار نشان می‌دهد که بارگذاری‌های اول هر ترکیب با نرخ  $2 \text{ kg VS} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$  با درصد کود کمتر به واسطه تغذیه مناسب باکتری‌های فعال از مواد آلی ترکیبات درون هضم‌کننده دارای بیشترین درصد حذف ماده آلی بوده و در بارگذاری دوم با  $3 \text{ kg VS} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$  کمترین درصد کاهش ماده آلی فرار بوده است. میزان کاهش ماده آلی فرار در تیمارهای مختلف به‌طور متوسط در محدود بین ۷۴-۵۴ درصد متغیر است. بنابراین هرچه میزان ماده آلی فرار کاهش بیشتری پیدا کند حجم ویژه بیوگاز و متان تولیدی افزایش می‌یابد. این میزان کاهش ماده آلی فرار با نتایج پژوهش‌های Castillo et al., 2006 و Babae and Shayegan, 2011 مطابقت دارد.

### ۳-۳-۳- برازش و پیش‌بینی فرآیند تولید بیوگاز

پارامترهای سینتیکی فرایند هضم بی‌هوازی از مفیدترین ساز و کارهایی است که در تجزیه‌پذیر بودن سوبسترا و همچنین استفاده از طرح و نوع راکتور کاربرد دارد ( Li et al., 2014). شکل (۳) برای برازش و تخمین از دو مدل لجستیک و گومپرتز تغییر شکل یافته منطبق با داده‌های به‌دست آمده در تولید تجمعی ویژه بیوگاز در هر دو بارگذاری آلی ۲ و  $3 \text{ kg VS} \cdot (\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1})$  با نسبت ترکیب کود گاوی و کلش ذرت (۷۵:۲۵ و ۵۰:۵۰) استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که تا هفته اول، مدل‌ها به‌خوبی بر داده‌ها انطباق ندارند. این امر احتمالاً به دلیل تولید گاز دی‌اکسید در روزهای اول بارگذاری است که وضعیت

کاهش ذرت در شرایط دمای مزوفیلیک با نرخ بارگذاری آلی ۲ و  $3 \text{ kg VS} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$  نشان می‌دهد بیشترین عملکرد متان در هضم ترکیبی در مقایسه با کود گاوی تنها بود. بالاترین درصد متان در هر دو نرخ بارگذاری در محدوده تولید پایدار بیوگاز حدود ۵۸ تا ۶۲ درصد و میزان کاهش جامدات آلی ورودی بین ۵۴ تا ۷۴ درصد متغیر بود. بازده تولید متان با افزایش نرخ بارگذاری کاهش داشته و بیشترین عملکرد متان در هضم ترکیبی با نرخ بارگذاری آلی  $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$   $2 \text{ kg VS}$  در نسبت کود گاوی به کلش ذرت (۷۵:۲۵) به میزان  $(\text{In} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ VS added})$   $311/17$  به دست آمد. نتایج برآزش و پیش بینی سینتیک مدل‌ها نشان داد مدل‌های لجستیک و گومپرتز اصلاح شده برای توجیه فرآیند تجمعی تولید متان در هاضم نیمه پیوسته بهترین کارایی را دارند.

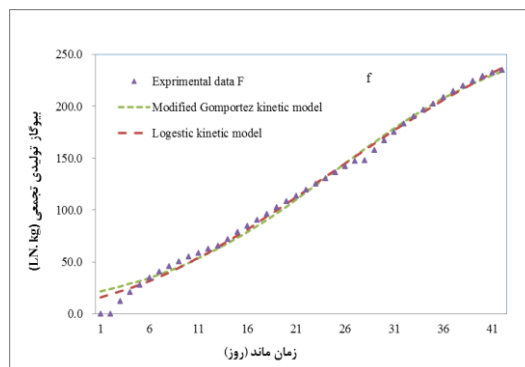
#### ۵- پی نوشت‌ها

1. Gompertz model
2. Logistic function
3. Gaussian equation
4. Organic loading rate
5. Volatile solids
6. Kjeldahl method

#### ۶- منابع

- بی‌نام، (۲۰۱۱) "کمپوست، روش‌های اندازه‌گیری فیزیکی و شیمیایی"، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد ملی ایران، شماره ۱۳۳۲۰.
- سعیدی، س. هاشمی، س.ج. کاظمی، س.ی. (۱۳۹۲) "بررسی اثر پیش تیمار شیمیایی کاه برنج با آمونیاک، اوره و سود بر تولید بیوگاز"، مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۴ شماره (۱) ۶۷.

- Adebayo1, A. O., Jekayinfa, S. O., Linke, B. (2015) "Effects of Organic Loading Rate on Biogas Yield in a Continuously Stirred Tank Reactor Experiment at Mesophilic Temperature", British



شکل ۳. چگونگی انطباق دو مدل لجستیک و گومپرتز اصلاح شده در تیمارهای مختلف

- c:  $OLR=2$  و تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 d:  $OLR=3$  و تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 e:  $OLR=2$  و تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 f:  $OLR=3$  و تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت) بر اساس مواد جامد فرار

جدول ۴. مقایسه ضرایب و پارامترهای تخمین زده شده توسط

مدل‌های سینتیکی فرآیند تولید بیوگاز

مدل	ضرایب و پارامترها	A	B	C	D
L.O	$R^2$	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۴۲	۰/۹۹۰۵
	RMSE	۰/۹۹۷	۸/۱۳۹	۶/۱۰۸	۷/۱۴۶
	$P(NI, (\text{kg VS})^{-1})$	۳۶۰/۴	۳۴۵/۸	۱۷۵/۹	۲۷۳/۴
	$r_m(NI, (\text{kg VS} \cdot \text{day})^{-1})$	۱۰/۵۳	۸/۹۸۱	۸/۲۴۶	۷/۰۲۱
	$\lambda$ (day)	۹/۱۵۹	۵/۷۱۵	۷/۲۹۹	۵/۳۲۸
	$R^2$	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵۶	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۴۵
M.G	RMSE	۴/۶۰۳	۶/۲۰۱	۴/۲۴۵	۵/۴۷
	$P(NI, (\text{kg VS})^{-1})$	۴۸۲/۵	۴۵۰/۵	۳۳۷/۸	۳۵۲/۴
	$r_m(NI, (\text{kg VS} \cdot \text{day})^{-1})$	۹/۶۲۸	۸/۳۱۸	۷/۵۸۴	۶/۵۲
	$\lambda$ (day)	۷/۴۵۸	۴/۰۱۲	۴/۵۹	۳/۶۳۷

Lo: لجستیک تغییر شکل یافته (Modified Logistic) و G.M: گومپرتز اصلاح شده (Modified Gompertz)

- A:  $OLR=2$  و تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 B:  $OLR=3$  و تیمار ترکیبی ۷۵:۲۵ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 C:  $OLR=2$  و تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت)،  
 D:  $OLR=3$  و تیمار ترکیبی ۵۰:۵۰ کود گاوی با کلش ذرت) بر اساس مواد جامد فرار

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج بررسی سامانه هضم بی‌هوازی نیمه پیوسته با حجم به کارگیری ۱۴۰ لیتر از ترکیب مختلف فضولات گاوی با



- Lo, H.M., Kurniawan, T.A. Sillanpaa, M.E.T. Pai, Y. and Yand, C.F. Chiang. (2010) "Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors", *Bio resources Technology* 101: 6329-6335.
- Maamri, S., and Amrani, M. (2014) "Biogas Production from Waste Activated Sludge Using Cattle Dung Inoculums- Effect of Total Solid Contents and Kinetics Study", *Ene, Procedia*. 50:352-359.
- Madsen M., Holm-Neilsen, JB. and Esbense, KH. (2011) "Monitoring of anaerobic digestion process: A review perspective", *Renew Sustain Energy Rev* 15:3141-3155.
- Nielfa, A. Cano, R., Vinto Fernandez, M. E. and Fdz-Polanco, M. (2015) "Anaerobic-digestion-modeling-of-the-main-components-of-organic-fraction-of-municipal-solid-waste", *Process safety and Environmental Protection* 94:180-187.
- Sanaei- Moghadam, A., Abbaspour-Fard, M.H., Agahel, H., Aghkhani M.H. and Abedini-Torghbeh, J. (2014) "Enhancement of Biogas Production by Co-digestion of Potato Pulp with Cow Manure in a CSTR System", *Appl, Biochem. Biotechnol*, 173:1858-1869.
- Sharma, D. (2002) "Studies on availability and utilization of onion storage waste in a rural habitat", Ph.D. dissertation. Indian Institute of Technology, Delhi.
- Siddiqui, Z., N. Horan and K. Anaman, (2011) "Optimization of C: N ratio for co-digested processed industrial food waste and waste sludge using the BMP test", *Int, Jou, Che. Re. Eng.*, 9.
- Song Z, G., Yang Guo, Y. and Zhang, T. (2012) "Comparison of tow chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion", *Bio Resources* 7:3223-3236.
- Sreenivas, R., Retter, A. and Hobbs, P.J. (2010) "Effect of Biomass Hydrolysis on Biogas production", *Process Biochemistry* 28 (2): 119-123.
- Tait, S., Tamis, J., Edgerton, B. and Batstone, DJ. (2009) "Anaerobic digestion of spend bedding from deep litter piggery housing", *Bio resource Technol.*, 100: 2210.
- Journal of Applied Science & Technology 11(4): 1-9.
- APHA (American Public Health Association) (1998) "Standard methods for the Experimental of Water and Wastewater. APHA Washington", D. C Babae, A., and Shayegan. J. 2011. Effect of organic loading rates (OLR) on production of Methane from anaerobic digestion of vegetables waste. *Bio Technology* 8-13may411-417.
- Castillo M.E.F., Cristancho, D.E. and Arellano, V.A. (2006) "Study the operational condition for anaerobic digestion of urban solid waste", *Waste management*, 26, 546-556.
- El-Shinnawi, M. M., ElTahawi, EIM Houssieni B.S... And Fahmy, S.S... (1989) "Changes of organic constituents of crop residues and poultry wastes during fermentation for biogas production", *Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 5(4):475-486.
- Kaparaju, P., Ellegaard, L. and Angelidaki, I. (2008) "Optimization of biogas production from manure through serial digestion- Lab-scale and pilot- scale studies", *Bio Res. Tec*, 100:701-709.
- Kumar, S., Mondal, S.A... Gaikward, S. and DevottaSingh, R.N. (2004) "Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study", *Atmos, Environ*. 38: 4921-4929.
- Kurnani, A., Hidayati, Y. A., Fitriani, D. and Imanudin, O. (2010) "The effect of C/N ratios of a mixture of beef cattle feces and water hyacinth (*Eichhorniacrassipes*) on the quality of biogas and sludge", *Lucrari Stiintifice*.
- Latinwo, G.K., and Agarry, S.E. (2015) "Modeling the kinetics of biogas from mesophilic anaerobic co-digestion of cow dung with plantain peels. *Int*", *Journal of Renewable Energy Development* 4(1): 55-63.
- Li, Y., Zhang, R. He., Y. Zhang., Ch. Liu, X Chen. Ch. and Liu, G. (2014) "Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn Stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR)", *Bio. Tech*. 156:342-347.
- Linke, B. (2006) "Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing", *Biomass and Bioenergy* 30: 892-896.

thesis in National University of Ireland.

- Zhang, T., Yang, Y., Liu, L., Han, Ren, Y. G. and Yang, G. (2014) "Improved biogas production from chicken manure anaerobic digestion using cereal Residues as co substrates", Energy& Fuels, pubs, acs, org.

- Zhu, B., Zhang, P., Lord, R., Jenkins, JB. and Li, X. (2009) "Characteristics and biogas production potential of municipal solid waste pretreated with a rotary drum reactor", Bio resource Technology 100:1122-1129.

- Tong, Zh, Linlin, L. Zilin, S., Guangxin, R., Youyang, F., Xinhui, H. and Gaphe, Y. (2013) "Biogas production by co-digestion of Gout Manure anaerobic with three crop residues", Plos, ONE, 8(6): e66845.

- Umar, H. S., Firdausi, B. R., Sharifah, R. W. A. and Fadimtu, M. (2013) "Biogas production through Co-digestion of palm oil mill effluent with cow manure", Nigerian J.of Basic and Applied Science 21(1): 79-84

- Xie, S., Zhan, Z. and Lawler, P. G. (2012) "Evaluation of biogas production from anaerobic digestion of pig manure and grass silage", P.h.D