

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هشت، آبان ماه ۹۸

## شبیه سازی فرآیند تولید گاز متان از پسماندهای دامی در یک بیوراکتور ناپیوسته

حسین بیکی<sup>\*۱</sup>

[hbeiki@qiet.ac.ir](mailto:hbeiki@qiet.ac.ir)

الهام جانانه<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۲۶

### چکیده

زمینه و هدف: با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و ضرورت استفاده از انرژی‌های نو و جایگزین سوخت‌های مرسوم، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. با توجه به این ضرورت در این پژوهش یک بیوراکتور ناپیوسته تولید گاز متان از پسماندهای دامی مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

روش بررسی: از سینتیک مونود برای بیان رابطه بین سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها و غلظت سوبسترا استفاده شده است. معادلات مصرف سوبسترا و تولید میکروارگانیسم‌ها و گاز متان از روش عددی رانگ کوتای مرتبه چهار حل می‌شوند. اثر غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها بر تولید گاز متان نیز بررسی شده است. غلظت اولیه سوبسترا و میکروارگانیسم‌ها به ترتیب  $51/74 \text{ g/L}$  و  $1/61 \text{ g/L}$  می‌باشد.

یافته‌ها: نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که مدل ریاضی حدود  $8/53\%$  از داده‌های آزمایشگاهی انحراف دارد. بر اساس مدل ارایه شده میزان گاز متان تولید شده پس از ۷۰ روز برابر با  $10/29 \text{ g/L}$  می‌باشد. میزان تجزیه سوبسترا و تولید گاز متان، به زمان ماند سوبسترا بستگی دارد. افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها موجب تولید گاز متان در مدت زمان کم‌تری می‌شود. میزان گاز متان تولیدی مستقل از غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری: مدل ارایه شده در این پژوهش می‌تواند برای پیش‌گویی مدت زمان مورد نیاز برای انجام واکنش، عملکرد بهینه بیوراکتور، طراحی تجهیزات فرآیندی مربوطه، افزایش مقیاس تجهیزات، مانند مخزن ذخیره سازی و کنترل مناسب جهت تولید متان با خلوص بالا و حجم بیش‌تر در بیوراکتورها مناسب باشد.

واژه‌های کلیدی: تخمیر بی‌هوازی، بیوراکتور ناپیوسته، مدل‌سازی ریاضی، تولید گاز متان.

۱- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران \* (مسئول مکاتبات).

۲- پزشک عمومی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی مشهد، ایران.

## **Simulation of Methane Production Process from Livestock Wastes into a Batch Bioreactor**

**Hossein Beiki<sup>1\*</sup>**

[hbeiki@qiet.ac.ir](mailto:hbeiki@qiet.ac.ir)

**Elham Jananeh<sup>2</sup>**

Admission Date: November 23, 2016

Date Received: March 16, 2016

### **Abstract**

**Background and Objective:** Considering the importance of environmental protection and necessity of using new energy sources and innovative fuels, using of renewable energies have been a great concern. Due to this necessity, in this study, mathematical modeling and simulation of a batch bioreactor to produce methane from livestock waste was investigated numerically.

**Method:** The relationship between microorganism's growth rate and substrate concentration were established by Monod model. The equations of mathematical model were solved with fourth order Rung Kutta. The effect of initial microorganisms' concentration on methane production was also investigated. Initial concentration of substrate and microorganisms are 51.74 g/L and 1.61 g/L, respectively.

**Findings:** The results revealed that the mathematical model average deviation from experimental data is 8.53%. The amount of methane produced after 70 days is equal to 10.29 g/L. The substrate disintegration and methane production are a function of substrate retention time. Enhancement in the initial concentration of microorganisms causes methane gas production in less time. The amount of methane gas produced is independent of initial microorganisms' concentration.

**Discussion and Conclusion:** The model which presented in this study could be used to predict the time required to carry out the reaction, optimum performance of bioreactor, the relevant process equipment design, scale up of equipment such as digestive and appropriate control of operation to produce high-purity methane and higher volume of biogas in the bioreactor.

**Key words:** Anaerobic fermentation, Batch Bioreactor, Mathematical Modeling, Methane gas production

---

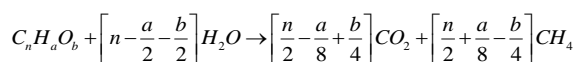
1- Assistant Prof., Department of Chemical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.  
\*(Corresponding Author)

2- General Practitioner, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences, Iran.

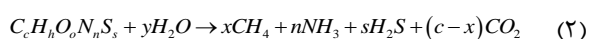
## مقدمه

تخمیر بی‌هوازی که به متان زایی بیولوژیکی نیز شهرت دارد، فرآیندی است که به طور طبیعی در اماکن دفن زباله، فاضلاب‌ها و مرداب‌ها انجام می‌پذیرد (۲ و ۳). از منابع عمده برای تولید بیوگاز، فضولات دامی، فاضلاب‌ها و زباله‌های شهری و صنعتی، زایدات کشاورزی مانند سبوس برنج، چغندر قند و... می‌باشند (۴ و ۵). از آنجا که در کشور ما تمامی منابع مذکور به مقدار زیاد تولید می‌شود بنابراین توانایی بالقوه‌ای در تولید بیوگاز در کشور وجود دارد. امروزه در بسیاری از کشورهای بزرگ و صنعتی اروپایی و کشورهای نظیر کانادا، از بیوگاز برای تولید الکتریسیته و در مقیاس‌های کوچک برای تولید حرارت استفاده می‌شود (۶ و ۷). از مزایای دیگر بیوگاز می‌توان به صرفه اقتصادی، تولید کم لجن (۳ و ۸)، حذف مواد معدنی (۳ و ۹)، حذف بوی بد مواد زاید از محیط (۳) و کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای اشاره نمود (۱۰ و ۱۱ و ۱۲). در سال ۱۹۵۲، باسول و مولر<sup>۴</sup> پیشنهاد کردند که اگر خوراک ورودی به راکتور، مواد آلی با ترکیب معلوم باشد از رابطه (۱) می‌توان میزان گاز متان و دی اکسید کربن تولیدی را با حداکثر خطای ۵٪ محاسبه نمود (۱۳ و ۱۴).

(۱)



در سال ۱۹۷۶، بویل<sup>۵</sup> با اصلاح رابطه (۱)، واکنش زیر را پیشنهاد نمود که در آن با در نظر گرفتن نیتروژن و سولفور، میزان تولید آمونیاک و سولفید هیدروژن را مشخص نمود (۱۵).



که در آن ضرایب  $x$  و  $y$  به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$x = \frac{1}{8}(4c + h - 2o - 3n - 2s) \quad (3)$$

$$y = \frac{1}{4}(4c + h - 2o - 3n - 3s) \quad (4)$$

امروزه یکی از مشکلات اساسی تمامی کشورهای جهان به خصوص کشورهای در حال توسعه، مشکل انرژی می‌باشد. سوخت رسانی به روستاهای دور افتاده حتی در کشوری مانند ایران که منابع غنی انرژی را در اختیار دارد بسیار مشکل و هزینه بر است. از این رو استفاده از روش‌های دیگر تولید انرژی که معایب روش‌های مرسوم را نداشته باشند، امری متداول در سراسر جهان شده است. از جمله این روش‌ها، تولید انرژی از زیست توده<sup>۱</sup> می‌باشد. یکی از فناوری‌های تبدیل زیست توده به انرژی، فرآیندهای بیوشیمیایی است. این فرآیندها به تخمیر بی‌هوازی، هوازی و الکلی زیست توده تقسیم می‌شود. بیوگاز<sup>۲</sup> از روش تخمیر بی‌هوازی زیست توده حاصل می‌شود (۱). در فرآیند تخمیر بی‌هوازی مواد آلی<sup>۳</sup> به وسیله واکنش شیمیایی به صورت محلول و قابل جذب برای میکروارگانیسم‌ها در می‌آیند و برای انجام فعالیت‌های حیاتی خود، از آن‌ها بهره می‌گیرند (۲). بیوگاز، گازی بی‌رنگ، تقریباً بی‌بو، با قابلیت اشتعال پذیری است که درصد قابل توجهی از آن را گاز متان تشکیل می‌دهد. ترکیب بیوگاز در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۱) بیش از نیمی از ترکیب بیوگاز را متان تشکیل داده است. این موضوع اهمیت بیوگاز را به عنوان منبع سوخت و انرژی جدید نشان می‌دهد.

## جدول ۱- ترکیبات بیوگاز (۱)

Table 1- Biogas composition (1)

ترکیب درصد	فرمول	نام گاز
۷۵ تا ۵۵	CH <sub>4</sub>	متان
۴۵ تا ۳۵	CO <sub>2</sub>	دی اکسید کربن
۱ تا ۰	N <sub>2</sub>	نیتروژن
۱ تا ۰	H <sub>2</sub>	هیدروژن
۲ تا ۱	H <sub>2</sub> S	سولفید هیدروژن
مقادیر ناچیز	O <sub>2</sub>	اکسیژن
مقادیر ناچیز	CO	مونواکسید کربن

1- Biomass

2- Biogas

3- Organic Matter

4- Buswell and Mueller

5- Boyle

خوبی توانسته با داده‌های آزمایشگاهی تطابق یابد و می‌توان از آن جهت پیش‌بینی عملکرد واحدهای تولید بیوگاز کشاورزی بهره برد (۴). لی و همکاران<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۱ راکتور تولید بیوگاز از چربی‌ها، روغن‌ها، گریس و ضایعات تولید شده در آشپزخانه‌ها را مدل‌سازی کردند. نتایج حاصل از مدل آنها نشان داد که کوسوبستراها، مرحله تاخیر تجزیه بیولوژیکی آلی را به صورت محسوسی کاهش می‌دهند. آنها دریافتند که استفاده از ضایعات تولید شده در آشپزخانه‌ها، چربی‌ها و روغن‌ها باعث افزایش میزان تولید گاز متان می‌شود (۶). گریدر و همکاران<sup>۷</sup> به بررسی روند بازده تولید گاز متان در طول تخمیر ذرت پرداختند. آنها توانستند رابطه‌ای میان بازده تولید گاز متان و ترکیب شیمیایی و کیفیت علوفه مورد استفاده ارائه دهند (۷). پیا و آتلی از مدل‌سازی راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی دریافتند که مدل کنتوز بهترین تطابق را بین سرعت رشد و تجزیه سوبسترا دارد (۲۱). مدل‌سازی راکتور نیمه پیوسته تولید بیوگاز از ضایعات و زباله‌های شهری (۲۲)، تولید بیوگاز از رسوبات دریاچه پرورش میگو با استفاده از هوش مصنوعی (۲۳) و راکتورهای ناپیوسته و پیوسته تولید بیوگاز از تفاله زیتون (۲۴) نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به نیاز بشر به منابع تجدید پذیر انرژی پژوهش در این زمینه ضروری است. با توجه به مطالعات انجام شده مواد اولیه اکثر مطالعات گذشته شامل ضایعات کشاورزی، گیاهی، پسماندهای شهری و فاضلاب‌ها می‌باشد. با توجه به اهمیت پسماندهای دامی در تولید بیوگاز (۲۵-۲۷) در مقاله حاضر بیوراکتور ناپیوسته تولید گاز متان با استفاده از مدل مونود، شبیه‌سازی شده است. تأثیر تغییرات غلظت میکروارگانیسم ورودی بر میزان مصرف سوبسترا و تولید محصول نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مذکور می‌تواند برای پیش‌گویی

باسرگا<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۸ مواد آلی کوسوبستراها را به سه دسته کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها تقسیم کرد و محصول گاز تولیدی و کسر مولی متان را برای این ترکیبات به شکل جداگانه تعیین نمود (۱۶). پژوهش کیمر و شیلچر<sup>۲</sup> بر پایه مدل باسرگا استوار است. آنها با در نظر گرفتن وابستگی سرعت تجزیه به نوع سوبسترا، مدل باسرگا را بهبود بخشیدند (۱۷). آمون و همکاران<sup>۳</sup> نیز مانند مرجع (۱۷) مواد آلی را برای برآورد میزان انرژی متان از موادی مانند غلات و ذرت تقسیم بندی نمودند (۱۸). به طور کلی مدل کیمر و شیلچر برای سوبستراهای حیوانی و مدل آمون و همکاران برای سوبستراهای گیاهی، مناسب است. با توجه به ضرورت جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع جدید، در زمینه افزایش تولید بیوگاز و خلوص گاز متان مطالعات زیادی انجام شده است. در تحقیقی نشان داده شد که کنترل pH بر روی تولید گاز متان بسیار تاثیر گذار است، به طوری که با کنترل pH راندمان تولید گاز متان حدود ۷/۶ برابر بیش‌تر از حالتی است که pH فرآیند هضم بی‌هواری کنترل نمی‌شود (۱۹). در واقع اسیدهای آلی تولیدی در فرآیند هضم منجر به اسیدی شدن<sup>۴</sup> شدید محیط و جلوگیری از تولید گاز متان می‌شوند. اثر نانوذرات بر تولید بیوگاز نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات نیکل موجب افزایش ۲/۱۷ برابری تولید متان نسبت به حالت بدون نانوذره خواهد شد (۲۰).

در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی راکتورهای تولید بیوگاز نیز پژوهش‌های محدودی انجام شده است. ژو و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۱ مدل خود را برای سوبستراهایی که از ضایعات کشاورزی می‌باشند در یک تخمیر آزمایشگاهی پایا ارایه دادند و دریافتند که مدل آنها به

- 1- Baserga
- 2- Keymer & Schilcher
- 3- Amon et al.
- 4- Acidification
- 5- Zhou et.al

6- Li et.al

7- Grieder et.al

نرخ خالص رشد میکروارگانیسم‌ها که در رابطه (۶) نشان داده شده است، به صورت تفاضل میکروارگانیسم‌های تولید شده از میکروارگانیسم‌هایی که از بین می‌روند تعریف می‌شود.

$$\mu_{net} = \mu - K_d \quad (6)$$

که در آن  $\mu$  سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها و  $K_d$  ضریب مرگ و میر<sup>۲</sup> میکروارگانیسم‌ها می‌باشند.

از روابط (۵) و (۶) نتیجه می‌شود که معادله سرعت واکنش تولید میکروارگانیسم‌ها از درجه یک می‌باشد. پایه و اساس مدل‌سازی سینتیک رشد باکتری‌ها برگرفته از فعالیت دو دانشمند آلمانی به نام میثائل و منتن<sup>۳</sup> است (۱۴ و ۲۱). مدل آن‌ها در سال ۱۹۱۳ ارائه شد و بیان می‌داشت که فعالیت آنزیمی وابسته به غلظت سوبسترا است (۱۴). مشابه مدل میثائل-منتن، موند رابطه غیرخطی بین سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها و غلظت سوبسترا را ارائه داد. رابطه (۷) مدل موند را نشان می‌دهد.

$$\mu = \frac{\mu_{max} [S]}{K_s + [S]} \quad (7)$$

که در آن  $\mu_{max}$  حداکثر سرعت رشد مخصوص میکروارگانیسم-ها،  $S$  غلظت سوبسترا و  $K_s$  ثابت نیم اشباع می‌باشند. سرعت رشد مخصوص میکروارگانیسم‌ها، تابعی از غلظت سوبسترا و سایر شرایط محیطی مانند بازدارنده‌ها، pH و دما است (۱۴ و ۲۱). در سال‌های بعد با تکمیل مدل موند، مدل‌های کامل‌تری ارائه گردید که برای سوبستراهای پیچیده و محیط‌های ناهمگن مناسب می‌باشند (۱۴ و ۲۸-۳۰). مدل موند برای محیط‌های کشت خالص و همچنین سوبستراهای ساده از دقت بالایی برخوردار می‌باشد (۳۱). این مدل مخصوص محیط‌های همگن بوده و برای محیط‌های غیر همگن و سوبستراهای پیچیده مناسب نمی‌باشد (۱۴). از آنجا که در مقاله حاضر، تولید بیوگاز از فضولات دامی مورد مطالعه قرار گرفته است و فضولات دامی سوبسترای ساده به حساب می‌آید (۲۱)، بنابراین در شبهه سازی‌ها از مدل موند استفاده شده است. با ساده سازی رابطه (۵) و استفاده از روابط (۶) و (۷) در آن نهایتاً تغییرات غلظت

مدت زمان مورد نیاز برای انجام واکنش، عملکرد بهینه، طراحی تجهیزات، افزایش مقیاس تجهیزات، مانند مخزن ذخیره سازی و کنترل مناسب بر روی بیوراکتورها مناسب باشد.

### مدل‌سازی ریاضی

در مقاله حاضر راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از فضولات پسماندهای دامی مدل‌سازی و شبهه سازی شده است. برای تعیین صحت مدل‌سازی از پارامترهای سینتیکی و نتایج آزمایشگاهی موجود در مرجع (۲۱) استفاده شده است. همچنین برای ایجاد رابطه بین سرعت تولید میکروارگانیسم‌ها و سرعت مصرف سوبسترا از مدل موند استفاده شده است (۱۴ و ۲۲).

### فرضیه‌ها مدل‌سازی

در مدل‌سازی راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز، فرضیات در نظر گرفته شده عبارتند از: فرآیند ۱- در حجم ثابت انجام می‌گیرد. ۲- دما و pH محیط واکنش ثابت و به ترتیب  $35^{\circ}\text{C}$  و ۷ می‌باشد (۱۹ و ۲۱). ۳- مواد جامد فرار<sup>۱</sup> به بیوگاز تبدیل می‌شوند. ۴- میزان از بین رفتن مواد جامد فرار با میزان تولید بیوگاز متناسب است. ۵- هم‌زمان با مصرف سوبسترا در راکتور بیوگاز تولید می‌شود.

عواملی چون رشد میکروارگانیسم‌ها، تجزیه سوبسترا و شکل‌گیری محصول بر روی تولید بیوگاز تأثیر گذار می‌باشند. در فرآیند ناپیوسته تولید بیوگاز، میزان تجزیه سوبسترا و تولید بیوگاز به زمان ماند سوبسترای ورودی به راکتور بستگی دارد.

### رشد میکروارگانیسم‌ها

موازنه کلی جرم برای میکروارگانیسم‌ها در راکتور ناپیوسته به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{d[X]}{dt} = \mu_{net} [X] \quad (8)$$

که در آن  $X$  غلظت میکروارگانیسم‌ها،  $\mu_{net}$  نرخ خالص رشد میکروارگانیسم‌ها و  $t$  زمان می‌باشند.

## تولید محصول

با فرض اینکه هم‌زمان با مصرف سوبسترا، گاز متان در راکتور تولید می‌شود، معادله تغییرات غلظت گاز متان تولید شده در راکتور ناپیوسته به صورت زیر می‌باشد (۱۴).

$$\frac{d[P]}{dt} = Y_p \mu [X] \quad (11)$$

که در آن  $p$  غلظت گاز متان و  $Y_p$  ضریب بازده تولید آن می‌باشد.

جهت تعیین میزان گاز متان تولید شده در راکتور، می‌بایست معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۱) به طور هم‌زمان حل شوند. این معادله‌ها با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهار در نرم افزار Matlab 2013 حل شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی مرجع (۲۱) مقایسه شده است. اطلاعات استفاده شده در شبیه سازی در جدول (۲) ارائه شده است.

میکروارگانیسم‌ها در راکتور ناپیوسته به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$\frac{d[X]}{dt} = \left( \frac{\mu_{\max} [S]}{K_s + [S]} - K_d \right) [X] \quad (8)$$

## مصرف سوبسترا

موازنه کلی جرم سوبسترا برای فرآیندهای ناپیوسته به صورت رابطه (۹) می‌باشد.

$$\frac{d[S]}{dt} = -\mu [X] \quad (9)$$

که در آن  $Y_{x/s}$  بازده تولید میکروارگانیسم‌ها می‌باشد که به صورت نسبت میکروارگانیسم‌های تولید شده به سوبسترای مصرف شده تعریف می‌شود. بنابراین بازده تولید میکروارگانیسم‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) نوشت (۱۴) و (۳۳-۳۲).

$$Y_{x/s} = \frac{[X] - [X_0]}{[S_0] - [S]} \quad (10)$$

که زیر نویس 0 در آن به معنی غلظت اولیه است.

## جدول ۲- اطلاعات سینتیکی مورد نیاز (۲۱)

Table 2. Kinetic details (21)

ثوابت معادله‌ها	$Y_{x/s}$	$K_s$	$X_0$	$S_0$	$\mu_{\max}$	$Y_p$
مقدار	۰/۲۲۶	۲۴/۵۷ g/L	۱/۶۱ g/L	۵۱/۷۴ g/L	۰/۱۰۸۵ day <sup>-1</sup>	۱/۴۱

## جدول ۳- نسبت وزنی اجزاء در سوبسترای مورد

## استفاده در تولید بیوگاز (۲۱)

Table 3. Components weight fraction in Substrate used in the production of biogas (21)

نوع آزمایش	%(w/w)
رطوبت	۸۳/۹۱
کل مواد جامد	۱۶/۰۹
کربن موجود در کل مواد جامد	۴۰/۷۰
نیتروژن موجود در کل مواد جامد	۲/۹۰
مواد جامد فرار آلی (بر مبنای خشک)	۸۱/۵۲

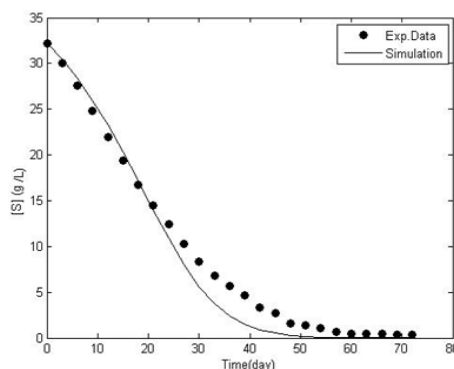
## نتایج و بحث

شبیه سازی انجام شده بر اساس میزان غلظت سوبسترای ورودی  $51/74 \text{ g/L}$  می‌باشد. جدول (۳) نسبت اجزاء موجود در سوبسترای مورد استفاده را نشان می‌دهد (۲۱).

## روش بررسی

در شبیه سازی‌ها از مدل مونود استفاده شده است. مدل مونود برای سوبستراهای ساده از دقت خوبی برخوردار است.

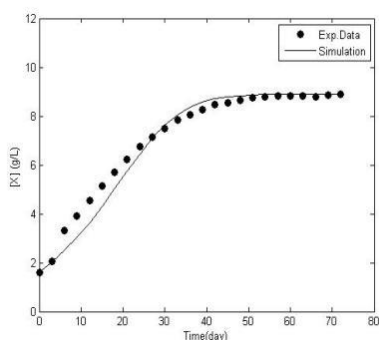
در شکل (۱) تغییرات غلظت سوبسترا با زمان نشان داده شده است. با افزایش زمان، سوبسترای ورودی تجزیه شده و بدین ترتیب انرژی لازم برای تولید، رشد و بقاء میکروارگانیسم‌ها تأمین می‌شود. با توجه به شکل (۱) غلظت سوبسترای پس از گذشت تقریباً ۷۰ روز به صفر می‌رسد.



شکل ۱- تغییرات غلظت سوبسترا با زمان

Figure 1. Variation of substrate concentration with time

شکل (۲) تغییرات غلظت میکروارگانیسم‌ها با زمان را نمایش می‌دهد. با افزایش زمان و مصرف سوبسترای ورودی میکروارگانیسم‌ها شروع به رشد و تکثیر می‌نمایند تا زمانی که با کم شدن غلظت سوبسترا به مقدار ثابتی برسند و با مصرف کامل آن وارد مرحله مرگ شوند. با توجه به شکل‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود که همزمان با مصرف کامل سوبسترا، تولید میکروارگانیسم‌ها نیز متوقف شده و به یک مقدار ثابت می‌رسد. شکل (۳) تغییرات غلظت گاز متان تولیدی نسبت به زمان را نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل (۳) مشخص است، با افزایش زمان، تولید گاز متان نیز افزایش می‌یابد تا زمانی که با مصرف کامل سوبسترا، میزان تولید به یک مقدار مشخص می‌رسد و ثابت می‌ماند.



شکل ۲- تغییرات غلظت میکروارگانیسم‌ها با زمان

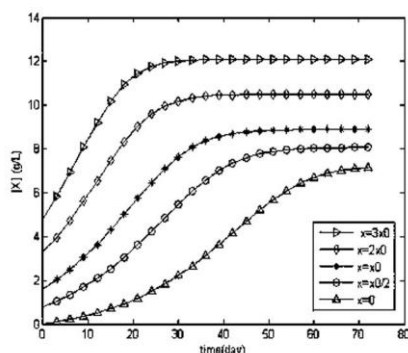
Figure 2. Variation of microorganisms' concentration with time

از مقایسه بین نتایج بدست آمده و نتایج آزمایشگاهی مرجع (۲۱)، مشخص می‌شود که مدل‌سازی انجام شده می‌تواند برای پیش بینی میزان تولید گاز متان از فضولات و پسماندهای دامی با دقت خوبی مورد استفاده قرار گیرد. میانگین خطای نسبی متوسط مدل ارائه شده برای پیش‌گویی میزان گاز متان تولید شده در روز و نتایج آزمایشگاهی ۸/۵۳٪ می‌باشد. با توجه به مطابقت خوب داده‌های آزمایشگاهی با مدل ارائه شده اثر غلظت میکروارگانیسم‌های اولیه بر میزان تولید گاز متان در راکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۴) تأثیر غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها را بر غلظت سوبسترا بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سرعت مصرف سوبسترا افزایش می‌یابد، زیرا این امر باعث می‌شود که باکتری‌های تولیدکننده بیوگاز در ابتدای فرآیند به طور مستقیم وارد محیط تخمیر شده و عمل تجزیه مواد زودتر شروع شود. به عبارت دیگر، افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سبب تسریع در سرعت تجزیه سوبسترای ورودی می‌گردد، بنابراین در صورت عدم استفاده از میکروارگانیسم‌ها، یا کاهش غلظت اولیه آن‌ها، مدت زمانی برای تولید خود به خودی میکروارگانیسم‌ها سپری می‌شود تا واکنش تجزیه سوبسترا و تولید بیوگاز شروع شود که به این مدت زمان، مرحله تأخیر<sup>۱</sup> گفته می‌شود. با توجه به شکل (۴) با کاهش

غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، زمان مرحله تأخیر افزایش می‌یابد.

- مرحله نمایی<sup>۱</sup> که در آن رشد میکروارگانیسم‌ها به صورت تابع نمایی بوده و از روز ۹ الی ۵۷ می‌باشد.
- مرحله کاهش سرعت رشد<sup>۲</sup> که دقیقاً بعد از مرحله نمایی است و از روز ۵۷ تا ۶۳ می‌باشد.
- مرحله سکون<sup>۳</sup> که در آن رشد میکروارگانیسم‌ها ثابت می‌شود و از روز ۶۳ به بعد شروع می‌شود.

شکل (۵) نشان می‌دهد که با کاهش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها مرحله تأخیر افزایش می‌یابد و مرحله کاهش سرعت رشد و مرحله سکون به تعویق می‌افتند. در حالی که افزایش غلظت میکروارگانیسم‌ها دقیقاً نتایج معکوسی در پی دارد.

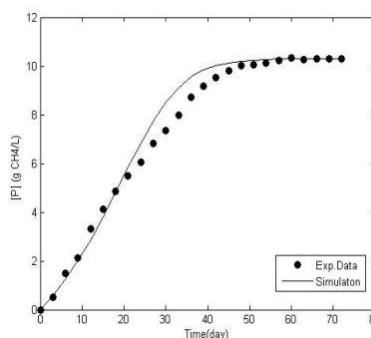


شکل ۵ - تغییرات غلظت میکروارگانیسم‌ها با زمان برای

#### غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم‌ها

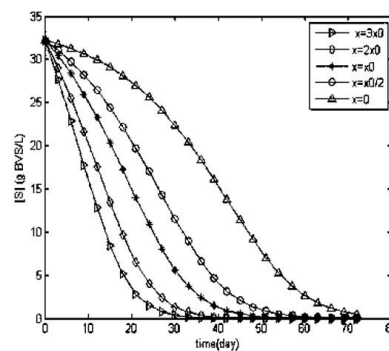
Figure 5. The effect of different load of microorganisms on microorganisms' concentration

در شکل (۶) مشخص است که افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، با کاهش مرحله تأخیر و افزایش شیب مرحله نمایی، باعث افزایش میزان تولید گاز متان شده است. در تمامی غلظت‌های مورد استفاده، مرحله سکون دارای مقدار معینی می‌باشد. غلظت گاز متان در مرحله سکون برابر با  $10/29 \text{ g/L}$  می‌باشد. از این رو می‌توان دریافت که حداکثر بیوگاز تولیدی مقدار مشخصی می‌باشد و وابسته به میزان سوبسترای ورودی است. افزایش غلظت میکروارگانیسم‌ها با کاهش مرحله تأخیر باعث تسریع در واکنش و تجزیه سوبسترا می‌شود.



شکل ۳- تغییرات غلظت گاز متان با زمان

Figure 3. Methane concentration versus time



شکل ۴- تغییرات غلظت سوبسترای ورودی با زمان برای

#### غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم‌ها

Figure 4. Variation of inlet substrate concentration with time at different load of microorganisms

با توجه به شکل (۵)، با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه سوبسترای ورودی سریع‌تر تجزیه خواهد شد. پس می‌توان انتظار داشت که با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تولید محصول نهایی در مدت زمان کم‌تری انجام پذیرد. همان گونه که از شکل (۵) مشخص است، رشد میکروارگانیسم را به چهار مرحله می‌توان تقسیم کرد. به عنوان نمونه برای غلظت  $X=X_0=0$  شرایط زیر برقرار است:

- مرحله تأخیر که تقریباً از زمان صفر الی ۹ روز می‌باشد.

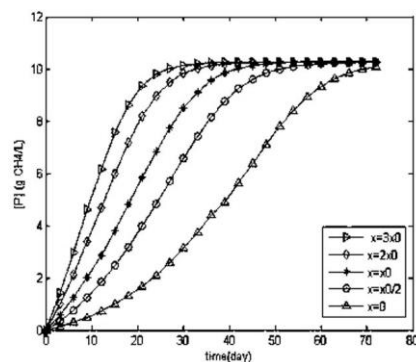


تأخیر کوتاه‌تر و به تبع آن زمان مورد نیاز برای تجزیه کامل سوبسترای ورودی کم‌تر می‌شود.

۵- تغییر در غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تغییری در میزان تولید محصول نهایی ایجاد نمی‌کند و فقط با تسریع در عمل تخمیر سوبسترا، باعث افزایش سرعت تولید بیوگاز می‌شود و زمان رسیدن به حداکثر غلظت محصول را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر میکروارگانیسم‌های اولیه همانند کاتالیست عمل می‌نمایند. بنابراین می‌توان گفت که واکنش تولید بیوگاز از فضولات دامی، یک واکنش اتوکاتالیستی می‌باشد.

## Reference

- Hilkiah Igoni, A., Abowei M., Ayotamuno, M., Eze, C., 2009. "Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste using Mathematical Models". The CIGR Ejournal, Manuscript EE Vol. 10, pp. 7-19.
- Buekens, A., 2005. "Energy Recovery from Residual Waste by Mean Anaerobic Digestion Technologies". The Future of Residual Waste Management in Europe Conference.
- Wilkie, A. C., 2005. "Anaerobic digestion". Biology and Benefits". Dary Manure Management Conference, Natural resource, Cornell University, Ithaca, March 15-17, pp. 63-72.
- Zhou, H., Loffer, D., Kranert, M., 2011. "Model-based Predictions of Anaerobic Digestion of Agricultural Substrates for Biogas Production". Bioresource Technology, Vol. 102, pp. 10819-10828.
- Show, K., Lee, D., Pan, X., 2013. "Simultaneous Biological Removal of Nitrogen-Sulfur-Carbon: Recent



شکل ۶- تغییرات غلظت متان تولیدی با زمان برای

غلظت‌های ورودی متفاوت میکروارگانیسم

Figure 6. The effect of microorganism's load on methane produced concentration

## نتیجه گیری

با توجه به ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مطالعات تئوری در زمینه تولید بیوگاز انجام شده است که اکثراً تولید بیوگاز از پسماندهای گیاهی، چربی، فاضلاب‌ها و ... مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به توانایی کودهای دامی در تولید بیوگاز در این پژوهش راکتور ناپیوسته تولید بیوگاز از فضولات و پسماندهای دامی مدل‌سازی و شبهه سازی شده است. شبهه سازی هاضم تولید بیوگاز با استفاده از مدل سینتیکی ساده انجام شده است و همچنین از روش مرسوم و ساده رانگ کاتای مرتبه ۴ جهت حل معادلات استفاده شده است. با این وجود نتایج مدل به خوبی با نتایج آزمایشگاهی فرآیند تولید بیوگاز از پسماندهای دامی مطابقت دارند. در این پژوهش اثر غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها بر تولید گاز متان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

- ۱- معادله سرعت تولید میکروارگانیسم‌ها از درجه یک می‌باشد.
- ۲- با مصرف کامل سوبسترا، تولید میکروارگانیسم‌ها نیز متوقف شده و به یک مقدار ثابت می‌رسد.
- ۳- میزان تجزیه سوبسترا و تولید گاز متان، به زمان ماند سوبسترا بستگی دارد.
- ۴- با افزایش غلظت اولیه میکروارگانیسم‌ها، تولید محصول نهایی در مدت زمان کم‌تری انجام پذیرد. همچنین مرحله

- Research Achievements and Perspectives". *Bio resources Technology*, Vol. 74, pp. 3-16.
13. Buswell, A. M., Mueller, H. F., 1952. "Mechanism of Methane Fermentation", *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 44, pp. 550 – 552.
  14. Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
  15. Boyle, W. C., 1977. "Energy Recovery from Sanitary Landfills". *Microbial Energy Conversion*, Edited by: H. G. Schlegel & J. Barnea, pp. 119 – 138.
  16. Baserga, U., 1998. "Land wirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT-Berichte Nr. 512, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, Schweiz. Cited by Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
  17. Keymer, U.; Schilcher, A., 2003, "Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. Cited by Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
  18. Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Machmüller, A.; Hopfner-Sixt, K.; Advances and Challenges". *Bio Technology Advances*, Vol. 31, pp. 409-420.
  6. Li, Ch., Champagne, P., Anderson, B., 2011. "Evaluating and Modeling Biogas Production from Municipal Fat, Oil and Grease and Synthetic Kitchen Waste in Anaerobic Co-digestions". *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 9471-9480.
  7. Grieder, Ch., Mittweg, G., Dhillon, B., Montes, J., Orsini, E., Melchinger, A., 2012. "Kinetics of Methane Fermentation Yield in Biogas Reactor: Genetic Variation and Association with Chemical Composition in Maize". *Biomass and Bioenergy*, Vol.37, pp. 132-141.
  8. Meltcalf and Eddy, 2003. "Wastewater Engineering-Treatment, Disposal and Reuse". 4<sup>th</sup>Edition, Tata McGraw Hill, New Delhi.
  9. Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., Hamidi, M., 2005. "Bioreactor Performance in Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Wastes". *Process Biochem*, Vol. 40, pp. 989-995.
  10. Callaghan, F.J., Wase, D. A. J., Thyaniythy, K., Forster, C. F., 2002. "Continuous CoDigestion of Cattle Slurry with Fruit and Vegetable Waste and Chicken Manure". *Biomass Bioenergy*, Vol. 27, pp. 71-77.
  11. Vieitez, E. R., Ghsh, S., 1999. "Bio gasification of Solid Wastes by Two Phases Anaerobic Fermentation". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 16, pp. 299-309.
  12. Mata Alvarez, J., Maca, S., Liabres, P., 2000. "Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of

2010. "Mathematical Modeling and Parameters Estimation of an Anaerobic Digestion of Shrimp of Culture Pond Sediment in a Biogas Process". *International Journal of Energy and Environment*, Vol. 4, pp. 213-220.
24. Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Ahring, B.K., Lyberatos, G., 2006. "Thermophilic anaerobic fermentation of olive pulp for hydrogen and methane production: modeling of the anaerobic digestion process". *Water Sci. Technol*, Vol. 53, pp. 271-279.
25. Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, Sh., Nosrati, M., 2014, "An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 380-386.
26. Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Farabi Asl, H., Yousefi, H., Hajinezhad, A., 2015, "Biogas production potential from livestock manure in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 748-754.
27. Abdeshahian, P., Lim, J. Sh., Ho, W., Hashim, H., Lee, Ch. T., 2016, "Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 714-723.
28. Powell, E. O., 1967. "The Growth Rate of Microorganisms as a Function of Substrate Concentration", *Microbial Physiology and Continuous Culture*. 3rd International Symposium, Salisbury, London, pp. 34- 56.
29. Birjukow, W. W.; Kantere, W. M., 1985. "Optimizing periodical processes of microbiological synthesis", (russ.). Nauka, Moskau.
30. Gompertz, B., 1825. "On the Nature of the Function Expressive of the Law of Bodiroza, V.; Hrbek, R.; Friedel, J.; Pötsch, E.; Wagentristsl, H.; Schreiner, M.; Zollitsch, W.; Pötsch, E., 2007 : Methane Production through Anaerobic Digestion of Various Energy Crops Grown in Sustainable Crop Rotations. *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 17, 3204 -3212. Cited by Gerber, M., Span, R., 2008. "An Analysis of Available Mathematical Models for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas". *International Gas Union Research Conference*.
19. Yang, L., Huang, Y., Zhao, M., Huang Z., Miao, H., Xu, Z., Ruan, W., 2015. "Enhancing biogas generation performance from food wastes by high solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 105, pp. 153-159.
20. Abdelsalam, E., Samer, M., Attia, Y. A., Abdel-Hadi, M. A., Hassan, H. E., Badr, Y., 2016, "Comparison of nanoparticles effects on biogas and methane production from anaerobic digestion of cattle dung slurry", *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 592-598.
21. Beba, A., Atalay, F. S., 1986. "Mathematical Models for Methane Production in Batch Fermenters". *Biomass*, Vol. 11, pp. 173 - 184.
22. Biswas, J., Chowdhury, R., Bhattacharya, P., 2006. "Experimental Studies and Mathematical Modeling of a Semibatch Bio-digester Using Municipal Market Waste as Feed Stock". *Indian Journal of Biotechnology*, Vol. 5, pp. 498-505.
23. Srisertpol, J, .Srinakorn, P, .Kheawnak, A, .Chamnirasart, K,

33. Aworanti, O. A., Agarry, S. E., Arinkoola, A. O., Adeniyi, V., 2011. "Mathematics Modeling for the Conversion of Animal Waste to Methane in Batchbioreactor". International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3, pp. 573-581.
31. Contois, D. E., 1959. "Kinetics of Bacterial Growth: Relationship between Population Density and Specific Growth Rate of Continuous Cultures". Journal of General Microbiology, Vol. 21, pp. 40 – 50.
32. Okpokwasili, G. C., Nweke, C. O., 2005. "Microbial Growth and Substrate Utilization Kinetics". African Journal of Biotechnology Vol. 5, pp. 305-317.
- Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies", Philos. Trans. R. Soc. Lond., Vol. 115: pp. 513-585.