

مدلسازی زمانی و تحلیل روند تولید بیوگاز با استفاده از زمین آمار

سمیرا زارعی*، جلال خدائی، فرزاد الماسی و راشد محمدرضایی**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. تلفن: ۰۸۷(۳۳۶۲۷۷۲۳)، پیام‌نگار: s.zareei@uok.ac.ir
** به‌ترتیب: استادیاران گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه کردستان؛ کارشناس مرکز آموزش جهاد کشاورزی استان کردستان؛ و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه کردستان
تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۳۰

چکیده

یکی از منابع تأمین انرژی، تولید بیوگاز از فضولات دامی به‌کمک تخمیر بی‌هوازی است. استفاده از همزن‌ها و ایجاد اختلاط یکی از روش‌هایی است که برای بهبود تولید بیوگاز در مخازن استفاده می‌شود. تحقیق حاضر با هدف مدلسازی و تحلیل روند تولید بیوگاز و تأثیر همزن در یک مخزن ۱۲۰۰ لیتری با حجم مایع ۸۰۰ لیتر با استفاده از زمین‌آمار اجرا شده است. به این منظور برای مدلسازی تولید بیوگاز در حالت بدون همزن (I) و همچنین با همزن با دورهای ۴۰ و ۱۰۰ دور در دقیقه (به ترتیب II و III)، از واریوگرام استفاده شده است. برای سنجش صحت مدل‌های به‌کار رفته، از آنها برای بازتولید داده‌های مشاهده‌ای با کریجینگ استفاده شده است. ارزیابی متقابل و شاخص‌های آماری ضریب تبیین و مجذور مربعات باقیمانده ملاک این ارزیابی بوده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روند تولید بیوگاز در حالت جریان یکنواخت، با همبستگی ۰/۹۷ دارای بیشترین پیوستگی ساختاری داده‌ای و در حالت (III) با همبستگی ۰/۳۳ دارای کمترین پیوستگی ساختاری داده‌ای است.

واژه‌های کلیدی

تخمیر بی‌هوازی، راکتور، کریجینگ، کود دامی، هم‌زدن

مقدمه

بسیاری شده است که از جمله می‌توان به استفاده از ترکیبات و افزودنی‌هایی اشاره کرد که با درصدهای مختلف به مواد آلی تولیدکننده بیوگاز اضافه می‌کنند. از دیگر تحقیقات در این زمینه، استفاده از همزن‌ها و ایجاد اختلاط در مخازن تولید بیوگاز است (Shen et al., 2013). تخمیر بی‌هوازی مواد با غلظت جامد بالا مانند کودهای حیوانی عموماً در مخازن همزن‌دار انجام می‌شود که به‌طور پیوسته تغذیه می‌شوند. عملکرد مخازن همزن‌دار به زمان ماند هیدرولیکی مواد و میزان تماس مواد ورودی و جمعیت باکتری‌ها بستگی دارد (Karim et al., 2005). هر دو این عوامل، تابعی از رژیم

در شیوه زندگی امروزی که تقاضای انرژی در آن به‌شدت رو به افزایش است، تحقیق برای افزایش بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست یک ضرورت خواهد بود (Yadvika et al., 2004). یکی از منابع تأمین انرژی، تولید بیوگاز از فضولات دامی است که در گذشته در کشورهای پرجمعیتی که از نظر منابع انرژی در مضیقه بودند، مانند هند، سهم عمده‌ای در تولید انرژی داشته است؛ اما امروزه این شیوه به‌صورت فراگیر در کشورهای پیشرفته نیز به‌کار گرفته می‌شود. در زمینه بهبود روش‌های تولید بیوگاز تلاش‌های

بخشد؛ در حالی که هم‌زدن ناکافی منجر به تشکیل لایه‌هایی از مواد جامد معلق در داخل مخزن می‌شود (Chapman, 1989; Chen *et al.*, 1990; Lema *et al.*, 1991). در مطالعه‌ای دیگر، نتایج ارزیابی تأثیر شدت همزنی ۱۵۰ و ۲۵ دور در دقیقه و نیز حداقل همزنی بر میزان بیوگاز تولیدی طی تخمیر بی‌هوای بخش آلی ضایعات جامد شهری نشان داده است که شدت هم‌زدن پایین‌تر منجر به افزایش سرعت و حجم تولید بیوگاز می‌شود (Lindmark *et al.*, 2014).

یکی از چالش‌های اصلی در تولید بیوگاز، شناسایی روند تولید آن است. تحقیق حاضر با هدف مدلسازی و تحلیل روند تولید بیوگاز و تأثیر همزنی در یک مخزن ۱۲۰۰ لیتری با حجم مایع ۸۰۰ لیتر با استفاده از زمین‌آمار^۱ اجرا شده است. زمین‌آمار، به‌علت سادگی و همچنین توانایی در شناسایی ارتباط بین داده‌ها، در زمینه‌های مدلسازی و بهینه‌سازی در علوم محیطی و مهندسی کاربرد فراوانی دارد. اخیراً در مدلسازی و بهینه‌سازی تولید بیوگاز نیز از روش زمین‌آمار استفاده شده است (Zaefferer *et al.*, 2016). این محققان در مطالعات خود از روش‌های کریجینگ^۲ و کوکریجینگ^۳ برای مدلسازی تولید بیوگاز از ترکیبات مختلف مواد استفاده کردند. با این حال تا کنون مطالعه‌ای در زمینه مدلسازی تأثیر شدت‌های مختلف هم‌زدن بر تولید بیوگاز و تحلیل روند تولید بیوگاز با استفاده از روش زمین‌آمار صورت نگرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از فضولات گاوی رقیق شده با آب به‌عنوان مواد تغذیه‌ای به هاضم برای تولید بیوگاز استفاده شده است. راکتور مورد استفاده در این مطالعه از نوع غیرپیوسته به‌صورت استوانه‌ای با ارتفاع ۱/۵ و قطر ۱ متر و از جنس ورق آهن سفید طراحی و ساخته شد. بعد از

هیدرولیکی (هم‌زدن) در مخازن هستند. هم‌زدن باعث ایجاد مخلوطی همگن می‌شود، از ایجاد پوسته روی سطح مواد و نیز از رسوب جامدات در کف مخزن جلوگیری می‌کند (Kaparaju *et al.*, 2008).

در مطالعه‌ای، پاره‌ای از محققان تأثیر دما و هم‌زدن را بر شاخص‌های انرژی حاصل از تولید بیوگاز از فضولات گاوی در یک هاضم بی‌هوای در مقیاس صنعتی به حجم ۹۲۵ لیتر بررسی و برای ایجاد اختلاط در مخزن و جبران کمبود تماس لجن با مایع از پمپ برگشت‌دهنده استفاده کردند (Afazeli *et al.*, 2013). نتایج حاصل از مطالعه آنها نشان داده است که استفاده از همزنی تأثیر زیادی در تولید بیوگاز دارد. در مطالعه‌ای دیگر، یک همزنی مکانیکی از نوع پارویی برای یک واحد بیوگاز مدل چینی ارائه شد (Omran *et al.*, 2007). نتایج ارزیابی‌ها از عملکرد همزنی نشان داده است که میزان تولید بیوگاز پس از استفاده از همزنی تا حدود ۴۲ درصد افزایش می‌یابد.

اثر هم‌زدن بر تخمیر بی‌هوای کود در دمای ۵۵ درجه سلسیوس در مقیاس آزمایشگاهی و واقعی را کاپاراجو و همکاران (Kaparaju *et al.*, 2008) بررسی و تأثیر هم‌زدن مداوم، حداقل همزنی (۱۰ دقیقه هم‌زدن قبل از تغذیه) و هم‌زدن متوسط (هم‌زدن به مدت ۲ ساعت قبل از تغذیه) را بر میزان تولید متان مطالعه کردند. این محققان نتیجه گرفتند که هم‌زدن پیوسته مواد به روش‌های هم‌زدن متوسط و حداقل همزنی به ترتیب میزان تولید متان را ۱/۳ درصد و ۱۲/۵ درصد افزایش می‌دهد. اهمیت اختلاط در تبدیل مواد تغذیه شده به بستری کارآمد در مخازن تولید بیوگاز را چندین محقق گزارش داده‌اند (Smith *et al.*, 1996; Stroot *et al.*, 2001; Karim *et al.*, 2005; Vavilin & Angelidaki, 2005; Vedrenne *et al.*, 2008). مطالعات نشان می‌دهد که هم‌زدن کافی می‌تواند توزیع مواد، آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌ها را در هاضم‌های بی‌هوای بهبود

1- Geostatistic
3- Cokriging

2- Kriging

همزن شدن مخزن، فضولات گاوی تازه و آب به نسبت مساوی مخلوط و به حجم ۸۰۰ لیتر به داخل مخزن تغذیه فرستاده شد. سهم ماده جامد کل و pH فضولات در هنگام بارگیری به ترتیب ۴۴/۹ درصد و ۷/۶ اندازه گیری شد. دمای مخزن ۳۰-۳۵ درجه سلسیوس. مقادیر تولید گاز به صورت روزانه و با استفاده از کنتور مدل G4 ساخت شرکت گازسوزان قرائت و اندازه گیری شده است. علاوه بر مخزن، برای بررسی تأثیر اختلاط فضولات و آب بر تولید گاز، همزنی دو پروانه ای با پره های شش تیغه ای توربینی طراحی و ساخته شد. سرعت گردش

همزن برای ایجاد جریان یکنواخت^۱ ۴۰ و برای ایجاد جریان آشفته^۲ ۱۰۰ دور در دقیقه انتخاب شد (Shen et al., 2013). نیروی محرک همزن با استفاده از یک الکتروموتور سه فاز با توان یک اسب بخار تأمین و برای تنظیم دوره های مختلف اختلاط از یک اینورتر^۳ استفاده گردید. مراحل آزمایش با سرعت گردش همزن ۰، ۴۰ و ۱۰۰ (به ترتیب حالت I، II و III) برای بررسی تولید بیوگاز بدون دخالت همزن، جریان یکنواخت و جریان آشفته انجام گرفته است. شکل ۱ تصویر مخزن را نشان می دهد.



شکل ۱- مخزن تولید بیوگاز

تفاوت زمین آمار با آمار کلاسیک در این است که در آمار کلاسیک تنها از مقادیر متغیر تصادفی استفاده می شود، در حالی که در زمین آمار علاوه بر مقدار متغیر تصادفی، فاصله فضایی آنها نیز دخالت داده می شود که این فاصله فضایی می تواند مکانی یا زمانی باشد (Hassani-Pak, 1998).

زمین آمار

پس از اجرای آزمایش ها با سه حالت مختلف همزنی و ثبت مقادیر بیوگاز تولیدی، برای تحلیل روند تولید بیوگاز و همچنین تأثیر همزن، از روش زمین آمار استفاده شده است. اساس روش های زمین آماری بر وجود ساختار فضایی بین داده هاست.

واریوگرام^۱

$$\gamma^* = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

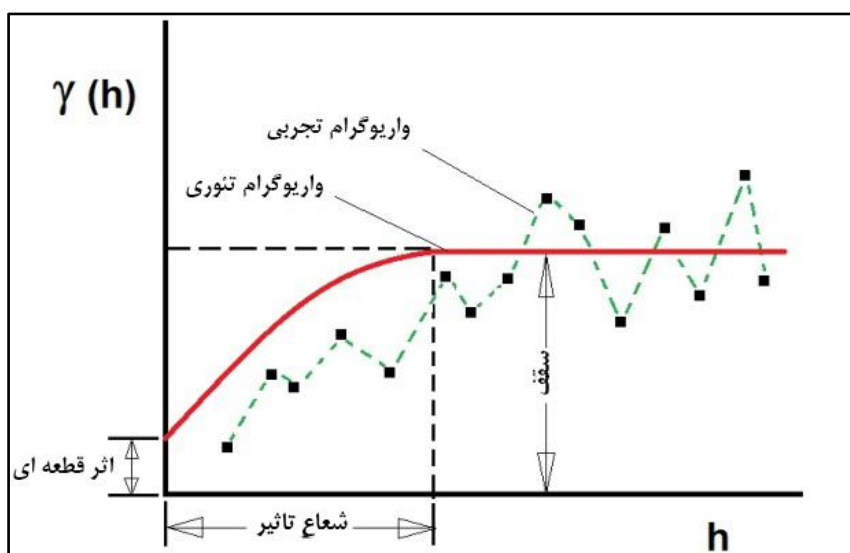
که در آن،

$\gamma(h)$ = مقدار نیم تغییرنا برای فاصله زمانی مشخص h ؛
 N = تعداد زوج‌های مشاهداتی؛ و $Z(X_i)$ و $Z(X_i+h)$ =
 مقادیر متغیر به ترتیب در زمان X_i و X_i+h .

پس از محاسبه واریوگرام‌های تجربی با استفاده از رابطه ۱ و مدل‌های نظری مختلفی مانند کروی، نمایی، گوسی و...، خصوصیات واریوگرام استخراج می‌شود. هر واریوگرام دو ویژگی مهم دارد که با آن ساختار داده‌ها تفسیر می‌شود. این ویژگی‌ها شامل شعاع تأثیر^۳، سقف^۴ و اثر قطعه‌ای^۵ است (شکل ۲).

کاربرد دیگر تغییرنا، علاوه بر شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی و نحوه ارتباط متغیر مورد نظر، تخمین زمین‌آماري متغیر در محدوده‌های مورد نظر است.

یکی از ابزارهای اصلی زمین‌آمار و مهم‌ترین ابزار شناسایی ساختار و فهم ارتباط بین داده‌ها، واریوگرام است. همبستگی متقابل مقدار یک متغیر تصادفی، که در فاصله h از هم قرار دارند، می‌تواند با استفاده از واریانس آنها بیان شود. در صورت وجود ساختار فضایی، وابستگی متغیرهای نزدیک به هم بیشتر از وابستگی متغیرهایی است که از لحاظ فضایی نسبت به هم دورترند. میزان تأثیرپذیری هر متغیر از متغیرهای دیگر می‌تواند با استفاده از این واریانس تعیین شود. این واریانس وابسته به فاصله را تغییرنا $\gamma(h)$ و نصف آن را نیم تغییرنا^۲ می‌گویند. نیم تغییرنا که نمایانگر میانگین مربعات تفاضل دو متغیر ناحیه‌ای با فاصله h است، به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:



شکل ۲- واریوگرام تجربی و تنوری و اجزای آن

- 1- Variogram
- 3- Range
- 5- Nugget Effect

- 2- Semivariogram
- 4- Sill

کریجینگ

RSS¹ و R² برای انتخاب بهترین مدل استفاده شد و بهترین مدل‌ها بر اساس کمترین RSS و بیشترین R² انتخاب شدند (Robinson & Metternicht, 2006).

از نیم تغییرنما می‌توان برای تعیین وزن‌های تخمین‌گر کریجینگ استفاده کرد. در صورت وجود یک ساختار داده‌ای خوب، می‌توان تغییر نماهای با کمترین خطا و به تبع آن تخمین‌های بهتری از تولید بیوگاز داشت. معیار به‌کار رفته برای سنجش تخمین مقادیر بیوگاز تولیدی، روش ارزیابی متقابل^۳ است. در این روش، یک نقطه به‌صورت موقتی حذف و مقدار آن با کریجینگ تخمین زده می‌شود. پس از آن، مقدار حذف شده به‌جای خود برگردانده و این عمل برای دیگر نقاط تکرار می‌شود. از رسم مقدار واقعی نقاط و مقادیر تخمینی، نمودار برآزش متقابل ایجاد می‌شود. همچنین، از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و ضریب تبیین (R²) برای سنجش عملکرد مدل استفاده شده است. روابط به‌کار رفته به‌صورت زیر است (روابط ۳ تا ۵):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^*)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - z_i^*| \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n \left(z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right)^2} \quad (5)$$

که در آن‌ها،

n = تعداد نمونه‌ها؛ Z = غلظت اندازه‌گیری شده؛ و Z^* = غلظت محاسباتی (Kord et al., 2015).

کریجینگ روشی است تخمینی که بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار و بهترین تخمین‌گر خطی ناریب^۱ است. کریجینگ از رابطه^۲ قابل محاسبه است (Hassani-Pak, 1998):

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

که در آن،

$z^*(x)$ = غلظت برآوردی؛ λ_i = وزن وابسته به نمونه λ_i ؛ $z(x_i)$ = مقدار متغیر اندازه‌گیری شده؛ و n = تعداد نقاط اندازه‌گیری شده. جمع وزن‌های اختصاص داده شده λ_i باید برابر واحد شود.

در این تخمین‌گر وزن‌ها بیشترین تأثیر را در صحت و دقت تخمین دارند؛ از این‌رو تعیین وزن‌ها مهم‌ترین بخش کریجینگ است. در زمین‌آمار، این وزن‌ها با استفاده از تغییر نما محاسبه می‌شوند. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ این است که به‌ازای هر تخمین، خطای مرتبط با آن را می‌توان محاسبه کرد در حالی‌که در روش‌های کلاسیک معمولاً چنین نیست. به‌عبارت دیگر میزان عدم قطعیت تخمین‌ها قابل محاسبه است. شرط استفاده از کریجینگ این است که متغیر باید توزیع نرمال داشته باشد وگرنه باید ابتدا با تبدیل مناسب توزیع داده‌ها نرمال گردد.

معیار ارزیابی نتایج

برای تعیین ساختار داده‌ها و تحلیل روند تولید بیوگاز، از نیم تغییر نما استفاده شده است. به‌همین علت برای برآزش بهترین مدل از مدل‌های کروی، گوسی، نمایی و خطی با استفاده از نرم‌افزار GS+ و از معیارهای آماری

1- Unbiased

3- Cross Validation

2- Root of Sum of Squares

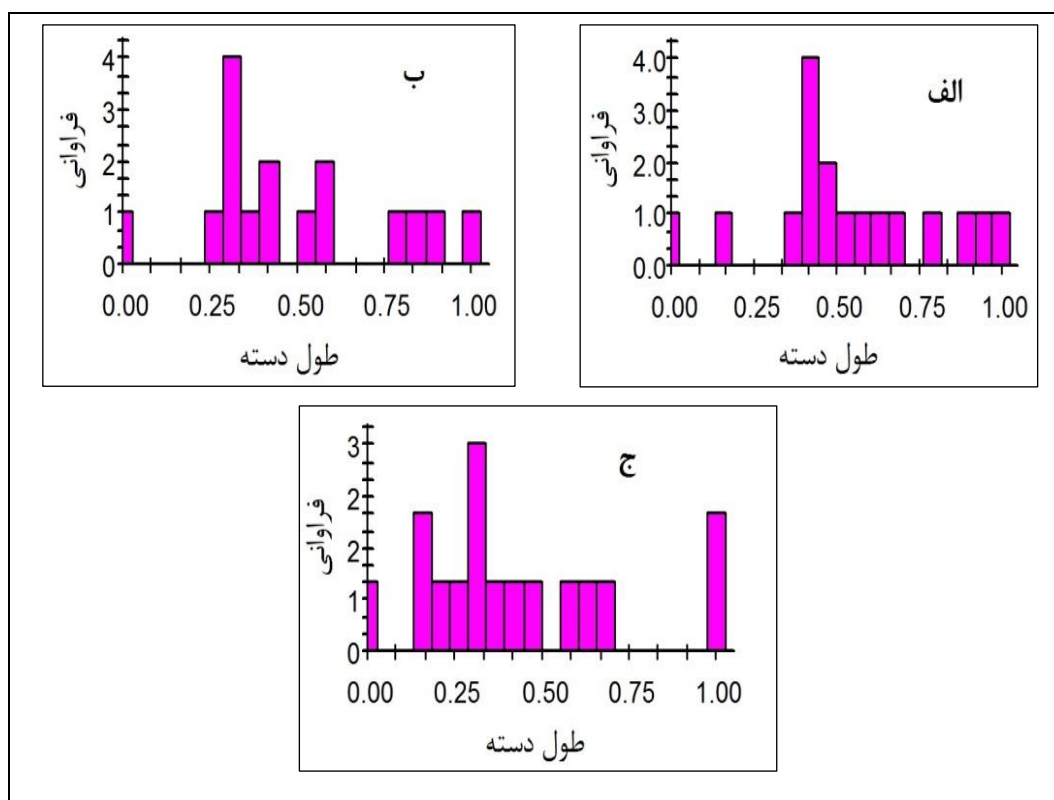
نتایج و بحث

از مطالعات (Stroot et al., 2001) و (Vavilin et al., 2007) همخوانی دارد. پژوهش‌های ذکر شده نشان می‌دهند که مخازن همزن‌دار با شدت همزنی بالا عملکرد بی‌ثباتی دارند در حالی که مخازن با حداقل میزان همزنی در تمام سرعت‌های بارگذاری عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند. نمودار ستونی برای هر یک از آزمایش‌ها در شکل ۳ آورده شده است.

در جدول ۱، خلاصه آماری از مقادیر بیوگاز تولید شده بر حسب لیتر (به ازای ۸۰۰ لیتر کود گاوی رقیق شده با آب) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین حجم تولید بیوگاز مربوط به حالت (II) و کمترین حجم تولید شده مربوط به حالت (III) است. این نتایج با نتایج به دست آمده

جدول ۱- خلاصه آماری مقادیر بیوگاز تولید شده بر حسب لیتر به ازای ۸۰۰ لیتر کود گاوی رقیق شده با آب به نسبت مساوی از کود و آب

آزمایش	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	حجم تولید بیوگاز
بدون همزن	۱۰۶۰/۰۰	۰/۰۰	۵۷۵/۱۲	۲۷۸/۶۱	۹۷۷۷/۰۰
اختلاط ۴۰ دور بر ثانیه	۱۱۳۵/۰۰	۰/۰۰	۶۱۰/۰۶	۲۸۹/۸۷	۱۰۳۷۱/۰۰
اختلاط ۱۰۰ دور بر ثانیه	۹۱۹/۰۰	۰/۰۰	۴۶۷/۱۲	۲۳۷/۶۱	۷۹۴۱/۰۰



شکل ۳- نمودارهای ستونی

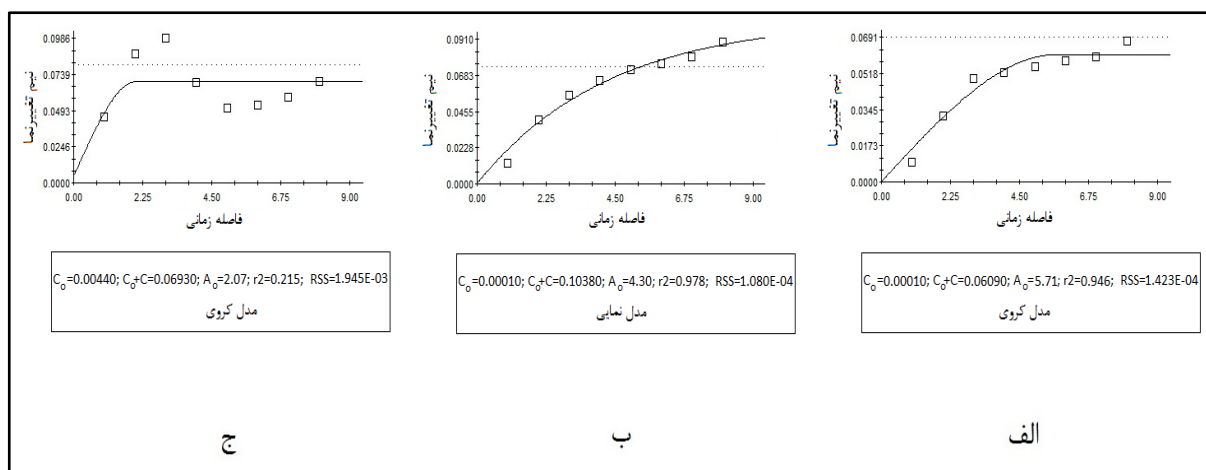
(الف) بدون همزن، (ب) همزن‌دار با سرعت ۴۰ دور در دقیقه و (ج) همزن‌دار با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

برای بررسی همبستگی زمانی داده‌های تولید بیوگاز مدلهای تئوری مختلف بر آن برازش داده شد. مشخصات نیم تغییرنمای تجربی بر اساس رابطه ۱ محاسبه و مدلهای برازش شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مدل‌های برازش شده بر واریوگرام تجربی برای حالت‌های مختلف آزمایش

آزمایش	مدل	اثر قطعه ای (C ₀)	سقف (C+C ₀)	شعاع تأثیر (روز)	شعاع تأثیر مؤثر (روز)	C/(C+C ₀)	R ²	RSS
بدون همزن (I)	کروی	۰/۰۰۰۱۰۰	۰/۰۶۰۹۰۰	۵/۷۱۰۰	۵/۷۱۰۰	۰/۹۹۸۰	۰/۹۴۶۰	۰/۰۰۰۱۴۲
	نمایی	۰/۰۰۰۱۰۰	۰/۰۷۲۹۰۰	۳/۴۷۰۰	۱۰/۴۱۰۰	۰/۹۹۹۰	۰/۹۴۶۰	۰/۰۰۰۱۵۰
	خطی	۰/۰۱۷۰۹۶	۰/۰۷۱۷۹۶	۸/۰۰۰۰	۸/۰۰۰۰	۰/۷۶۲۰	۰/۸۰۸۰	۰/۰۰۰۴۶۶
	گوسی	۰/۰۰۱۹۰۰	۰/۰۶۰۰۰۰	۲/۴۵۰۰	۴/۳۴۳۵	۰/۹۶۸۰	۰/۹۶۲۰	۰/۰۰۰۰۹۲۹
با همزن با سرعت ۴۰ دور (II)	کروی	۰/۰۰۰۲۰۰	۰/۰۸۲۷۰۰	۶/۷۴۰۰	۶/۷۴۰۰	۰/۹۹۸۰	۰/۹۶۵۰	۰/۰۰۰۱۵۰
	نمایی	۰/۰۰۰۱۰۰	۰/۱۰۳۸۰۰	۴/۳۰۰۰	۱۲/۹۰۰۰	۰/۹۹۹۰	۰/۹۷۸۰	۰/۰۰۰۱۰۸
	خطی	۰/۰۱۸۶۹۹	۰/۰۹۴۸۷۲	۸/۰۰۰۰	۸/۰۰۰۰	۰/۸۰۳۰	۰/۸۹۲۰	۰/۰۱۸۵
	گوسی	۰/۰۱۰۹۰۰	۰/۰۸۱۸۰۰	۳/۱۴۰۰	۵/۴۳۸۶	۰/۸۶۷۰	۰/۹۶۳۰	۰/۰۰۰۱۵۸
با همزن با سرعت ۱۰۰ دور (III)	کروی	۰/۰۰۰۴۴۰۰	۰/۰۶۹۳۰۰	۲/۰۷۰۰	۲/۰۷۰۰	۰/۹۳۷۰	۰/۲۱۵۰	۰/۰۰۱۹۴
	نمایی	۰/۰۵۵۹۰۰	۰/۱۱۱۹۰۰	۲۰/۹۹۰۰	۶۲/۹۷۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰۳۸۰	۰/۰۰۲۹۳
	خطی	۰/۰۶۶۴۵۴	۰/۰۶۶۴۵۴	۸/۰۰۰۰	۸/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۴۱۰	۰/۰۰۲۴۶
	گوسی	۰/۰۶۳۰۰۰	۰/۱۲۶۱۰۰	۲۰/۹۹۰۰	۳۶/۳۵۵۷	۰/۵۰۰۰	۰/۰۵۷۰	۰/۰۰۲۷۲

جدول ۲ نشان می‌دهد که بهترین مدلی که بتواند تولید گاز را بر اساس زمان توجیه کند، مدل کروی برای حالت I و III و مدل نمایی برای حالت II است. این مدل‌ها بر اساس بالاترین مقدار R² و کمترین مقدار RSS بر نقاط نیم تغییرنا انتخاب شدند. نیم تغییرناهای برتر در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



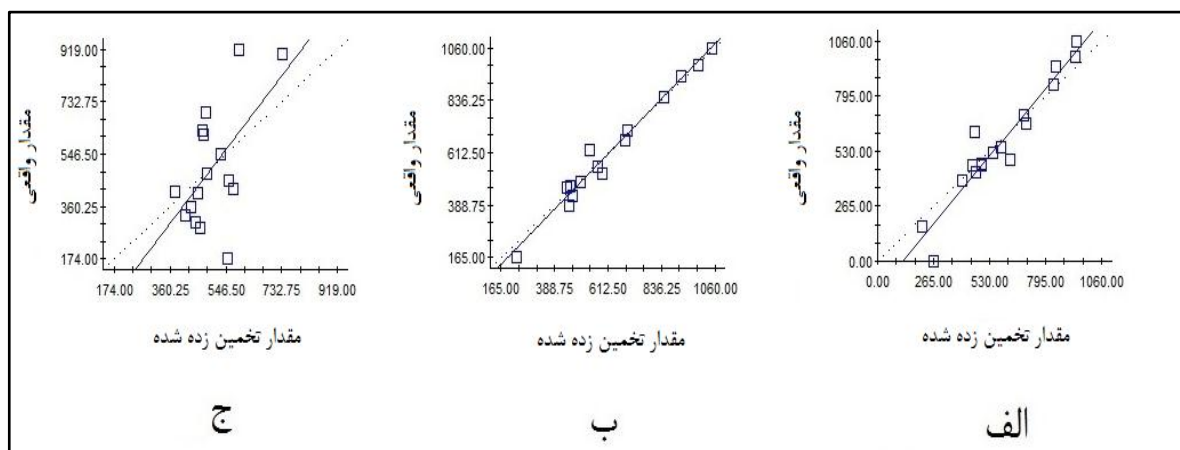
شکل ۴- بهترین واریوگرام‌های برازش شده بر واریوگرام تجربی برای حالت‌های: الف) بدون همزن، ب) همزن‌دار با سرعت ۴۰ دور در دقیقه و ج) همزن‌دار با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

نسبت کم اثر قطعه‌ای به سقف نیم تغییرنما نشان‌دهنده همبستگی بالای زمانی داده‌های تولید گاز است. وقتی این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد، متغیر مورد نظر ساختاری قوی دارد. نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد، ساختار متوسط و بزرگتر از ۷۵، ساختار ضعیف دارد. بر اساس این معیار، تمام حالت‌ها استحکام فضایی قوی دارند اما این نسبت برای حالت اول و دوم بهتر از حالت سوم است و حالت سوم پیوستگی زمانی کمتری نسبت به حالت‌های دیگر دارد. همچنین، شعاع تأثیر در حالت‌های (I)، (II)، و (III) به ترتیب حدود ۱۲/۹، ۵/۷ و ۲ روز است. شعاع تأثیر بیشتر حاکی از همبستگی زمانی بیشتر و ساختار قوی‌تر داده هاست. یعنی داده‌ها در یک بازه زمانی بیشتری با هم وابسته‌اند و اختلاط در حالت جریان یکنواخت سبب همگنی مخلوط و تولید گاز شده است. به عبارت دیگر، در حالتی که از همزن با دور ۴۰ دور بر دقیقه استفاده شده و جریان یکنواخت است، مقدار گاز تولیدی هر روز را می‌توان از حدود ۱۳ روز قبل تخمین زد این عدد در مورد حالت (I) حدود ۵/۵ روز و در مورد حالت

(III) حدود ۲ روز است.

در بررسی ساختار مکانی یا زمانی داده‌ها با واریوگرام، ممکن است واریوگرامی ایجاد شود که در فضا به صورت تناوبی تکرار شود. این حالت را که اثر سوراخ^۱ می‌گویند در مورد حالت (III) صادق است و می‌تواند نشان‌دهنده توزیع نشدن یکنواخت تولید گاز باشد. به عبارت دیگر، جریان توربولانت سبب بی‌نظمی در تولید گاز شده است یا به مفهومی دیگر، تولید گاز هر روز به صورت مستقل عمل می‌کند. بنابراین، به نظر می‌رسد در حالتی که جریان یکنواخت در مایع مخزن حاکم است تولید گاز روندی قابل پیش‌بینی‌تر دارد. پس از تحلیل واریوگرام در فاز بعدی تحقیق، برای کنترل مضاعف صحت مدل‌های برازش شده بر نیم تغییرنماهای تجربی، از به‌کارگیری این مدل‌ها در کریجینگ برای تخمین و شبیه‌سازی تولید گاز بر حسب زمان استفاده شد.

شکل ۵ نمودار ارزیابی متقابل داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را برای هر سه حالت تولید گاز نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار های ارزیابی متقابل برای حالت‌های:

(الف) بدون همزن، (ب) همزن‌دار با سرعت ۴۰ دور در دقیقه و (ج) همزن‌دار با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه

جدول ۳- خصوصیات آماری مقادیر واقعی و تخمینی با کریجینگ

R ²	RMSE	MAE	Std	Mean	داده‌ها	آزمایش
۰/۹۱۰۳	۹۴/۶۶۳۱	۶۵/۸۹۲۳	۲۱۶/۰۷۵۰	۵۸۴/۰۷۴۷	محاسباتی	بدون همزن
-	-	-	۲۷۸/۶۱۲۲	۵۷۵/۱۱۷۶	مشاهداتی	
۰/۹۷۴۵	۵۱/۰۴۴۰	۳۵/۹۳۸۲	۲۲۹/۴۷۸۴	۶۱۶/۰۱۶۳	محاسباتی	با همزن با سرعت
-	-	-	۲۴۳/۶۶۱۴	۶۱۱/۰۶۲۵	مشاهداتی	۴۰ دور در دقیقه
۰/۳۳۰۳	۱۶۵/۰۹۴۲	۱۲۶/۷۶۸۲	۸۶/۵۲۲۶	۵۰۰/۴۱۴۴	محاسباتی	با همزن با سرعت
-	-	-	۲۱۱/۵۸۶۶	۴۹۶/۳۱۲۵	مشاهداتی	۱۰۰ دور در دقیقه

بدون همزن نیز کمتر است و در این حالت، تولید گاز از رابطه‌ای خاص پیروی نمی‌کند. در حالت جریان یکنواخت، حجم تولید گاز بیشتر و روند تولید گاز مشخص‌تر و پیش‌بینی آن به واقعیت نزدیک‌تر است. در حالتی که از همزن با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه استفاده می‌شود و جریان یکنواخت است، مقدار گاز تولیدی هر روز را می‌توان از حدود ۱۳ روز زودتر تخمین زد؛ این عدد در حالت بدون همزن حدود ۵/۵ روز و در سرعت همزنی ۱۰۰ دور در دقیقه حدود ۲ روز است. از آنجا که عملکرد کریجینگ به شدت به صحت واریوگرام بستگی دارد، میزان صحت و دقت واریوگرام مجوز استفاده از کریجینگ است. ناچیز بودن خطای تخمین کریجینگ در حالت (I) و (II) و همچنین نزدیک بودن میانگین و انحراف معیار داده‌های محاسباتی با داده‌های واقعی نشان‌دهنده عملکرد خوب کریجینگ در مدلسازی تولید بیوگاز است و استفاده از روش‌های زمین‌آماري برای تعیین توزیع تولید گاز و استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماري به منظور سنجش قطعیت بسیار مفید و کاراست.

بررسی خصوصیات آماری میانگین و انحراف معیار بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده نا اریب بودن روش به کار رفته است. بر اساس این نتایج، علاوه بر تأیید میزان صحت واریوگرام‌ها، سطح قطعیت ارتباط ساختاری زمانی تولید گاز برای هر یک از حالت‌های آزمایش مشخص و نشان‌دهنده این است که در حالت یکنواخت با داشتن کمترین MAE و RMSE و بیشترین ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و محاسباتی، دارای بیشترین پیوستگی ساختاری داده‌ای است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از واریوگرام برای شبیه‌سازی روند تولید بیوگاز از فضولات گاوی استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که وجود همزن تأثیر بسزایی در حجم و نیز در روند تولید بیوگاز دارد. بیشترین حجم تولید بیوگاز در سرعت همزنی ۴۰ دور در دقیقه و کمترین حجم در سرعت همزنی ۱۰۰ دور در دقیقه مشاهده می‌شود. حجم تولید گاز در جریان آشفته حتی از حالت

مراجع

- Afazeli, H., Jafari, A., Rafeei, S., Nosrati, M., Almasi, F. and Feghipour, A. 2013. Investigation of temperature and mixing effect on energy indicators of biogas production from animal wastes. *J. Res. Mech. Agric. Machin.* 2(3), 19-26. (in Persian)
- Chapman, D. 1989. Mixing in Anaerobic Digester: State of the Art. In: Cheremisinoff, P. (Ed.) *Encyclopaedia of Environmental Control Technology*. Vol. 3. Gulf Pub. Co. Houston.
- Chen, T., Chynoweth, D. P. and Biljetina, R. 1990. Anaerobic digestion of municipal solid waste in a nonmixed solids concentrating digester. *Appl. Biochem. Biotech.* 24/25, 533-544.
- Hassani-Pak, A. A. 1998. *Geostatistics*. First Ed. University of Tehran Press. (in Persian)
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L. and Angelidaki, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technol.* 99(11): 4919-28.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K. T. and Al-Dahhan, M. H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: effect of mode of mixing. *Water Res.* 39, 3397-3606.
- Kord, M., Asghari-Moghaddam, A. and Nakhaei, M. 2015. Quantitative modeling of nitrate distribution in Ardabil plain aquifer using fuzzy logic. *J. Environ. Stud.* 41(1): 67-79. (in Persian)
- Lema, J. M., Mendez, R., Iza, J., Garcia, P. and Fernandez-Polanco, F. 1991. Chemical reactor engineering concepts in design and operation of anaerobic treatment processes. *Water Sci. Technol.* 24, 79-86.
- Lindmark, J., Eriksson, P. and Thorin, E. 2014. The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Manage.* 34, 1391-1397.
- Omrani, G. A., Safa, M. and Golbabaei, F. 2007. Investigation of mechanical paddle mixer efficiency for Chinese biogas plant. *J. Environ. Stud.* 32(2): 19-26. (in Persian)
- Robinson, T. P. and Metternicht, G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Comput. Electron. Agr.* 50, 97-108.
- Shen, F., Tian, L., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., Zou, D., Zhu, B., Liu, Y. and Li, X. 2013. Improving the mixing performances of rice straw anaerobic digestion for higher biogas production by Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. *Appl. Biochem. Biotech.* 171, 626-642.
- Smith, L. C., Elliot, D. J. and James, A., 1996. Mixing in upflow anaerobic filters and its influence on performance and scale-up. *Water Res.* 30, 3061-3073.
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I. and Raskin, L. 2001. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. Digester performance. *Water Res.* 35, 1804-1816.
- Vavilin, V. A. and Angelidaki, I. 2005. Anaerobic degradation of solid material: importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. *Biotechnol. Bioeng.* 89(1): 13-22.
- Vavilin, V. A., Loshina, L. Y., Flotats, X. and Angelidaki, I. 2007. Anaerobic digestion of solid material: multidimensional modeling of continuous flow reactor with non-uniform influent concentration distributions. *Biotechnol. Bioeng.* 97(2): 354-366.
- Vedrenne, F., Beline, F., Dabert, P. and Bernet, N. 2008. The effect of incubation conditions on the laboratory measurement of the methane producing capacity of livestock wastes. *Bioresource Technol.* 99(1): 146-155.

- Yadvika, S., Sreekrishnan, T.R., Kohli, S. and Rana, V. 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review. *Bioresource Technol.* 95, 1-10.
- Zaefferer, M., Gaida, D. and Bartz-Beielstein, T. 2016. Multi-fidelity modeling and optimization of biogas plants. *Appl. Soft Comput.* 48, 13-28.

Time Variation Modeling and Trend Analysis of the Biogas Production Using Geostatistic

S. Zareei^{*}, J. Khodaei, F. Almasi and R. Mohammadrezaei

* Corresponding Author: Associated Professor, Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: s.zareei@uok.ac.ir

Received: 11 September 2016, Accepted: 18 February 2017

Biogas production from anaerobic digestion of livestock manure is one of valuable energy resources. The use of stirrer and mixing of substrate can improve biogas production rate in digesters. Present research was carried out in order to model and trend analysis of biogas production and mixing effect in a full scale batch reactor 1200 lit. With liquid volume of 800 lit using geostatistic. Variograms were used for modeling biogas production in three states: (I) without stirring and (II), (III) stirring at 40 and 100 rpm, respectively. Then, the proposed models were evaluated by reproducing observed data using kriging. Cross validation and statistical indices such as determination coefficient and remaining sum of squares were the assessment criterion. Simulation results showed that biogas production trend under uniform flow condition had most data structural continuity with correlation of 0.97 and in state of (III) with correlation of 0.33 had the lowest data structural continuity.

Keywords: Anaerobic Digestion, Kriging, Livestock Manure, Stirring, Reactor