مدلسازی سینتیک تولید بیوگاز از هضم ترکیبی کود گاوی و ضایعات کدوی آجیلی

پریسا جهانگیر مقدم[۱]، سمیرا زارعی[۲و*]

۱و۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

چکیده

کدوی آجیلی (*Cucurbita pepo*) یکی از محصولاتی است که ضایعات بسیاری دارد و تنها دانه آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، از این‌رو می‌تواند به عنوان منبعی برای تولید بیوگاز در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، فضولات دامی که در حجم بالا از دامداری‌ها دفع شده و انباشته شدن آن‌ها در محیط می¬تواند آلودگی‌های زیست¬محیطی ایجاد کند، غنی از مواد آلی هستند و می¬توانند به عنوان مواد خام برای تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گیرند. این پژوهش به منظور مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب نسبت‌های مختلف از ضایعات کدوی آجیلی و کود گاوی (۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰ و ۳۰:۷۰) انجام شد. نتایج نشان داد که نسبت ترکیب ۱۰:۹۰ بالاترین میزان تولید بیوگاز را در بین نسبت های مورد آزمایش داشت. سه مدل گومپرتز اصلاح شده، لاجستیک و تابع نمایی ماکزیمم برای مدل‌سازی بیوگاز تولیدی در نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار داده شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که مدل-های گومپرتز اصلاح شده و لاجستیک عملکرد قابل قبولی داشتند و میزان تولید بیوگاز را نسبت به تابع نمایی ماکزیمم بهتر پیش‌بینی کردند.

کلمات کلیدی:

انرژی تجدیدپذیر، گومپرتز، لاجستیک، نمایی ماکزیمم، هضم بی‌هوازی.

*نویسنده مسئول Email: s.zareei@uok.ac.ir

مدلسازی سینتیک تولید بیوگاز از هضم ترکیبی کود گاوی و ضایعات کدوی آجیلی

مقدمه

امروزه یکی از مسائل جدی جوامع بشری، افزایش رو به رشد تولید ضایعات شهری، روستایی و صنعتی می‌باشد و در صورت عدم توجه کافی به نحوه جمع‌آوری و دفع این مواد، مشکلات انتشار بوی ناخوشایند بر اثر فساد ضایعات تجزیه‌پذیر، نشر گازهای گلخانه‌ای، آلودگی آب‌های زیرزمینی و اسیدی شدن خاک به وسیله شیرابه‌ی حاصل از فساد در محل‌های انباشت ضایعات به وجود خواهد آمد [۱]. علاوه بر تمام مشکلات ذکر شده در بسیاری از روستاها و نواحی دور افتاده در تامین انرژی مورد نیاز خود مشکل دارند و سوخت‌رسانی به این نواحی به دلیل صعب العبور بودن مسیرها بسیار دشوار و هزینه‌بر است. یک راه برای غلبه بر این مشکلات، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر است. یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر بیوگاز است که به دلیل دارا بودن جنبه‌های مختلف تولید انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تهیه کودهای غنی شده کشاورزی [۲] و استفاده از ضایعات کشاورزی، شهری و صنعتی بیشتر از قبل مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است [۳].

بیوگاز از تخمیر بی‌هوازی زیست توده تولید می‌شود و عمدتاً شامل ۵۰ تا ۷۰ درصد گاز متان، ۲۵ تا ۴۵ درصد دی‌اکسیدکربن به همراه سایر گازها از قبیل سولفید هیدروژن، نیتروژن و آمونیاک به مقادیر ناچیز می‌باشد [۴]. زیست توده، اصطلاحی گسترده است و به طور کلی به گیاهان و بقایای کشاورزی (ضایعات پس از برداشت)، ضایعات جنگلی، فضولات حیوانی و ضایعات آلی شهری و فاضلاب اطلاق می‌شود. با توجه به میزان تولید بالای محصولات کشاورزی، ضایعات نیز در این بخش فراوان است. بنابراین محصولات کشاورزی می‌تواند به عنوان یکی از بهترین منابع زیست توده مورد استفاده قرار گیرد. یکی از محصولات کشاورزی که در ایران تولید می‌شود و ضایعات بسیاری دارد کدوی آجیلی می‌باشد که تنها، دانه این محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد و مابقی آن (۹۵ درصد میوه تازه شامل پوست، بخش گوشتی و فیبرهای داخلی) دور ریخته می‌شود. تولید جهانی کدو آجیلی در سال ۲۰۱۸، معادل ۲۷ میلیون تن برآورد شده است که سهم ایران از این مقدار، ۱۵۴ هزارتن تخمین زده می‌شود. با توجه به آمار و ارقام موجود در رابطه با میزان تولید کدوی آجیلی، میزان پسماند حاصل از برداشت آن بسیار قابل توجه است. از طرفی، این ضایعات به دلیل رطوبت بالا باعث ایجاد کپک در محیط می‌شوند که در سطح مزرعه مشکلاتی 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 ضایعات در فرآیند هضم بی هوازی جهت تولید بیوگاز و کود زیستی می‌باشد. بر اساس تحقیقات ما، تاکنون مطالعه علمی بر روی فرآیند تولید بیوگاز از کدوی آجیلی صورت نگرفته است؛ بدین جهت لازم است که پژوهشی دقیق و جامع در خصوص نحوه‌ی تولید بیوگاز از این محصول و همچنین ترکیب آن با مواد دیگر صورت گیرد. دفع حجم بسیار زیادی از فضولات از مراکزی مانند دامداری‌ها در محیط می‌تواند آلودگی زیست‌محیطی ایجاد کند و تجزیه این فضولات در محیط‌های باز می‌تواند باعث نشر بسیاری از آلاینده‌ها از جمله متان، آمونیاک و بسیاری از میکروب‌های بیماری‌زا شود.از طرف دیگر فضولات دام و طیور غنی از مواد آلی هستند و می‌توانند به عنوان مواد خام برای تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گیرند.

در سال‌های اخیر، فعالیت بسیاری از محققین بر پیدا کردن راه‌هایی برای افزایش میزان تولید بیوگاز متمرکز شده است [۵ و ۶]. برخی از عوامل تأثیرگذار بر میزان تولید بیوگاز عبارتند از: دما [۷]، pH [۸]، ترکیبات مختلف ضایعات یا نسبت کربن به نیتروژن C/N [۹]، هم-زدن [۱۰ و ۱۱]، محتوای ماده جامد کل [۱۲] و زمان ماند[۱۳]. تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی یک فرآیند پیچیده و غیرخطی است و به ویژگی‌های خوراک و شرایط عملیاتی بستگی دارد. از این‌رو، مدل‌سازی به درک بهتر این فرآیند و همچنین افزایش

عملکرد و کاهش هزینه عملیاتی کمک می کند [۱۴]. روش های مدل‌سازی به سه دسته روش‌های مدل‌سازی هوش مصنوعی، مدل‌سازی عددی و مدل-سازی ریاضی تقسیم می‌شوند. مدل‌سازی ریاضی در واقع بیان ریاضی رفتار فیزیکی و شیمیایی تغییرات و تحولات انجام یافته در یک یا چند سیستم مرتبط با یکدیگر است و شامل سه مرحلهٔ اساسی فرمول‌بندی مسأله، حل معادله‌های حاصل و تحلیل نتایج می‌باشد. در واقع هدف از به کارگیری مدل ریاضی این است که رفتار فرآیند را به ازای تغییر در شرایط عملیاتی یا ورودی‌های مورد نظر پیش‌بینی کند. از مدل‌های ریاضی مانند گومپرتز، ریچاردز و لاجستیک در بررسی و تحلیل فرآیند هضم بی‌هوازی به دلیل توانایی در تخمین پارامتر-های لازم برای بهتر انجام شدن آزمایش، موضوع تحقیقات زیادی در این زمینه بوده است. چند مورد از این تحقیقات عبارتند از توصیف منحنی رشد باکتری در فرآیند هضم بی‌هوازی با استفاده از مدل‌های لاجستیک، گومپرتز، ریچاردز، اسنوت و استنارد [۱۵]، بررسی تأثیر دما بر فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی با پوشال با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی از جمله مدل گاوسی [۱۶]، بررسی میزان تولید بیوگاز از ترکیبات مختلف کود گاوی و ضایعات حاصل از گلاب‌گیری به کمک سه مدل ریاضی گومپرتز، ریچاردز و لاجستیک [۱۷]، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی با لجن غنی از باکتری با استفاده از از مدل‌های گومپرتز، ریچاردز و تابع نمایی ماکزیمم [۱۸]، بررسی سینتیک تولید بیوگاز از دو نوع ترکیب شامل: ویناس+ محتویات شکمبه و ویناس+ محتویات شکمبه + اوره در pHهای مختلف در شرایط هضم بی‌هوازی ناپیوسته با استفاده از دو مدل گومپرتز اصلاح شده و مدل چند جمله‌ای درجه اول [۱۲]، مدل‌سازی هاضم ناپیوسته بیوگاز برای هضم بی‌هوازی کود گاوی با استفاده از مدل گومپرتز اصلاح شده [۱۹]، مدل‌سازی سینتیک تولید بیوگاز از هضم بی‌هوازی ترکیب فضولات خوک و علف‌های هرز در یک هاضم ناپیوسته با بهره‌گیری از مدل گومپرتز اصلاح شده [۲۰]، مطالعه فرآیند تولید بیوگاز از فاضلاب شهری در هضم ترکیبی با خاکستر با استفاده از مدل‌های کرت خطی، کرت نمایی، گاوسی و اصلاح شده‌ی گومپرتز [۲۱].

در این پژوهش میزان تولید بیوگاز از ترکیب ضایعات کود گاوی و کدوی آجیلی با ترکیب نسبی‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از معادلات ریاضی گومپرتز اصلاح شده، لاجستیک و نمایی ماکزیمم انجام می‌شود و بهترین مدل برای پیش‌بینی فرآیند معرفی خواهد شد.

مواد و روش ها

۱- مواد خوراک

برای انجام آزمایش‌ها، کدوی 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 گوشتی- که ضایعات این محصول محسوب می‌شوند- به منظور هضم بهتر کاملاً خرد شدند. کود گاوی تازه از یک گاوداری واقع در روستای دوشان، سنندج به صورت تصادفی جمع‌آوری گردید. مشخصات خوراک هاضم شامل درصد رطوبت (خشک کردن در آون و محاسبه از طریق فرمول مربوطه)، میزان کل ماده جامد (خشک کردن در آون و محاسبه از طریق فرمول مربوطه) و کل ماده فرار (سوزاندن در کوره و محاسبه از طریق فرمول)، مقدار نیتروژن (روش کجلدال) و کربن (سوزاندن در کوره و محاسبه از طریق فرمول) با انتخاب تصادفی نمونه هایی از ضایعات کدوی آجیلی و کود گاوی طبق دستورالعمل های استاندارد (سفیدکار و همکاران، ۱۳۹۲) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱)

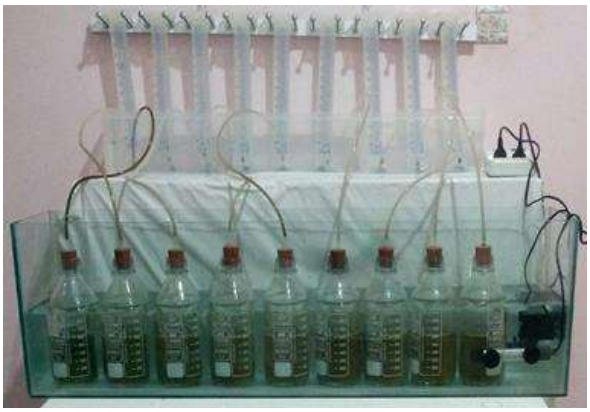
جدول ۱- مشخصات نمونه‌های کدو و کود گاوی برای به دست آوردن پارامترهای موثر در تولید بیوگاز

نمونه	درصد	درصد کل	درصد	درصد کربن	درصد	درصد کربن به	درصد کل ماده

	خاکستر	مواد جامد	رطوبت		نیتروژن	نیتروژن	فرار
ضایعات کدو	۲۴/۳۱	۵/۴۳	۹۴/۱۰	۴۲/۰۴	۱/۹۶	۲۲/۶۶	۹۹/۷۵
کود گاوی	۱۷/۷۸	۱۸/۴۲	۸۱/۵۷	۴۵/۶۷	۳/۰۱	۱۵/۱۷	۹۹/۸۱

۲- سامانه استحصال بیوگاز

در این پژوهش از ۹ هاضم ناپیوسته شیشه‌ای از جنس پیرکس به حجم یک لیتر استفاده شده است. 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). برای ثابت و یکنواخت نگه‌داشتن دما در هاضم‌ها (در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد) از حمام آب گرم استفاده شد. کنترل pH از اهمیت بسیاری برخوردار است به همین دلیل به منظور اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر قلمی استفاده شد. میزان بیوگاز تولید شده، از طریق روش جابه‌جایی آب که روشی کاربردی و متداول محسوب می‌شود اندازه‌گیری شد. به این ترتیب که گاز تولید شده به درون استوانه‌های مدرجی که از آب پر شده‌اند و به صورت معکوس درون تشتک‌های آب قرار داده شده‌اند، هدایت شده و از طریق لوله‌های سیلیکونی وارد تشتک‌های محتوی آب می‌شود. فشار گاز جمع شده باعث جابجایی آب از کف تشتک به استوانه مدرج می‌شود و این میزان آب جابه‌جا شده برابر با میزان گاز تولید شده است. میزان بیوگاز قرائت شده، به صورت روزانه ثبت شد.



شکل ۱- سامانه استحصال بیوگاز

۳- روش انجام آزمایش ها

آزمایش‌ها برای بررسی اثر ترکیب خوراک هاضم بر روی میزان تولید بیوگاز طراحی و انجام شدند. برای این منظور سه ترکیب نسبی مختلف از ضایعات کدوی آجیلی و کود گاوی (۹۰:۱۰، ۸۰:۲۰ و ۷۰:۳۰) انتخاب و با نسبت ۲:۱ با آب مخلوط شدند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، از ۹ هاضم با حجم یکسان و تحت شرایط دمایی کنترل شده و هم‌زدن دستی در مدت زمان یکسان برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد (جدول ۲). مواد در تمامی هاضم‌ها با وزن یکسان (۶۰۰ gr)، اما با ترکیبات متفاوت از ضایعات و آب در به مدت ۶۹ روز نگهداری شدند. برای هر ترکیب نسبی سه هاضم مورد استفاده قرار داده شد تا تکرار در آزمایش‌ها لحاظ شود. برای جلوگیری از ته‌نشین شدن مواد در ته هاضم‌ها و ایجاد محیطی همگن و همچنین ایجاد یکنواختی در ترکیب مواد، همزدن به‌صورت روزانه و با تکان دادن ملایم هاضم ها انجام می‌شد. همچنین از پیش‌تیمار فیزیکی خرد کردن قطعات کدوی آجیلی برای ترکیب بهتر با کود گاوی استفاده شد و اندازه قطعات خرد شده تقریباً ۱ تا ۳ میلی‌متر بود.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، میزان pH در خوراک هاضم تولید بیوگاز را تحت تاثیر قرار می‌دهد و طبق منابع موجود باید در حالت خنثی قرار گیرد [۸ و ۹]. در صورتی که تعادل بین باکتری‌های متان‌زا و اسیدزا از بین برود pH در محدوده پایین قرار گرفته، مخلوط خوراک اسیدی شده و تولید بیوگاز کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل برای حفظ تعادل pH از آهک استفاده می‌شود تا pH را در محدوده مناسب جهت فعالیت بهتر باکتری‌های متان‌زا قرار دهد. در اوایل انجام آزمایش هیچ‌گونه ماده‌ای به راکتورها اضافه نشد و تولید بیوگاز به صورت طبیعی و با pH اولیه محیط درونی خود راکتورها صورت گرفت و پس از پایان ۹ روز با کاهش بیوگاز و همچنین با کاهش pH مقدار ۵ گرم آهک به هاضم‌های ۱، ۴ و ۷ جهت افزایش pH اضافه شد.

جدول ۲- مشخصات خوراک درون هاضم‌ها در هر آزمایش

نام هاضم	نسبت ضایعات کدو به کود گاوی	درصد ضایعات کدو	درصد کود گاوی	درصد آب	درصد کل ماده جامد در ضایعات جامد	درصد کل مواد فرار در ضایعات جامد
R1-1	۱۰:۹۰	۳/۳۳	۳۰	۶۶/۶۷	۱۷/۱۲	۹۸/۶۹
R1-2	۱۰:۹۰	۳/۳۳	۳۰	۶۶/۶۷	۱۷/۱۲	۹۸/۶۹
R1-3	۱۰:۹۰	۳/۳۳	۳۰	۶۶/۶۷	۱۷/۱۲	۹۸/۶۹
R2-1	۲۰:۸۰	۶/۶۶	۲۶/۶۷	۶۶/۶۷	۱۵/۸۳	۹۷/۵۸
R2-2	۲۰:۸۰	۶/۶۶	۲۶/۶۷	۶۶/۶۷	۱۵/۸۳	۹۷/۵۸
R2-3	۲۰:۸۰	۶/۶۶	۲۶/۶۷	۶۶/۶۷	۱۵/۸۳	۹۷/۵۸
R3-1	۳۰:۷۰	۱۰	۲۳/۳۳	۶۶/۶۷	۱۴/۵۳	۹۶/۴۶
R3-2	۳۰:۷۰	۱۰	۲۳/۳۳	۶۶/۶۷	۱۴/۵۳	۹۶/۴۶
R3-3	۳۰:۷۰	۱۰	۲۳/۳۳	۶۶/۶۷	۱۴/۵۳	۹۶/۴۶

۴- مدل‌سازی

یکی از مهم‌ترین فواید استفاده از مدل‌سازی در هضم بی‌هوازی کاهش هزینه‌های اضافی برای انجام آزمایش‌های مکرر است. همچنین امکان صرفه‌جویی در وقت را مهیا می‌کند و حتی در بسیاری از موارد تصمیم‌گیری ساده‌تر شده و عملکرد سیستم افزایش پیدا می‌کند [۲۰]. به همین دلیل در مطالعه حاضر از معادلات ریاضی گومپرتز اصلاح شده، لاجستیک و نمایی ماکزیمم برای مدل‌سازی، تخمین و پیش‌بینی میزان تولید بیوگاز به صورت تابعی از زمان استفاده می‌گردد.

٤-١- معادله گومپرتز اصلاح شده

این معادله برای تخمین پارامترهای یک فرآیند بی‌هوازی، تولید تجمعی بیوگاز از هضم بی‌هوازی مواد را تابعی از رشد باکتری‌ها در نظر می‌گیرد و به صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود [۳].

$$M = Pexp\{-\exp\left(\frac{R_m e}{P}\right)(\lambda - t) + 1\} \quad (۱)$$

که در آن: M= حجم گاز تجمع یافته در زمان هضم (ml)، P = پتانسیل حجم گاز تولیدی (ml)، Rm = بیشینه نرخ حجم تولید گاز (ml/day)، پ= فاز تاخیر (day)، t = مدت زمان دوره هضم (day) و e= ثابت ریاضی برابر با ۲/۷۱۸۲۸۲ می‌باشد. این پارامترها از

منحنی رشد باکتری‌ها استخراج می‌شوند؛ برای مثال، مقدار λ عرض از مبدأ روی محور x شیب خط مماس بر بخش رشد نمایی باکتری‌ها یا میکروارگانیسم‌ها می باشد.

به طور کلی معادله گومپرتز به چند دلیل بیشتر از سایر مدل‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد این مدل قادر است پارامترها را به خوبی تفسیر کند و همچنین پتانسیل عملکرد بیوگاز، حداکثر میزان تولید بیوگاز و مدت زمان تأخیر را به خوبی برآورد می‌کند. تنها مشکلی که محققان با این مدل دارند این است که برای توصیف رشد میکروبی بدون ارتباط مستقیم با بیوگاز یا سایر انواع داده‌های محصول فرموله شده است. در حال حاضر مدل گومپرتز به طور گسترده‌ای برای بررسی سینتیک تولید بیوگاز استفاده می‌شود [۲۲ و ۲۳]

٤-۲- معادله لاجستیک

معادله لاجستیک نیز از یکی دیگر از انواع مدل‌های ریاضی است که در پیش‌بینی و تخمین پتانسیل تولید بیوگاز با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش به‌کار برده می‌شود. بسیاری از محققان از این معادله برای بررسی میزان تولید بیوگاز استفاده کرده‌اند که نتایج بسیاری از آن‌ها نشان داده که این معادله نیز همانند معادله گومپرتز به خوبی می‌تواند میزان تولید بیوگاز را تخمین بزند [۱۸]. این معادله به‌صورت رابطه (۲) ارائه می‌شود.

$$M = P\left\{1 + \exp\left[\left(\frac{4R_m}{P}\right)(\lambda - t) + 2\right]\right\} \quad (۲)$$

که در آن: M = حجم گاز تجمع یافته در زمان هضم (ml)، P = پتانسیل حجم گازتولیدی (ml)، Rm = بیشینه نرخ حجم تولید گاز (ml/day)، λ = فاز تاخیر (day) و t= مدت زمان دوره هضم (day) می‌باشد.

٤-۳- تابع نمایی ماکزیمم

یکی دیگر از معادلاتی که برای مدل‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی به کار برده می‌شود، تابع نمایی ماکزیمم است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۸].

$$Y = P(1 - \exp(-Kt)) \quad (۳)$$

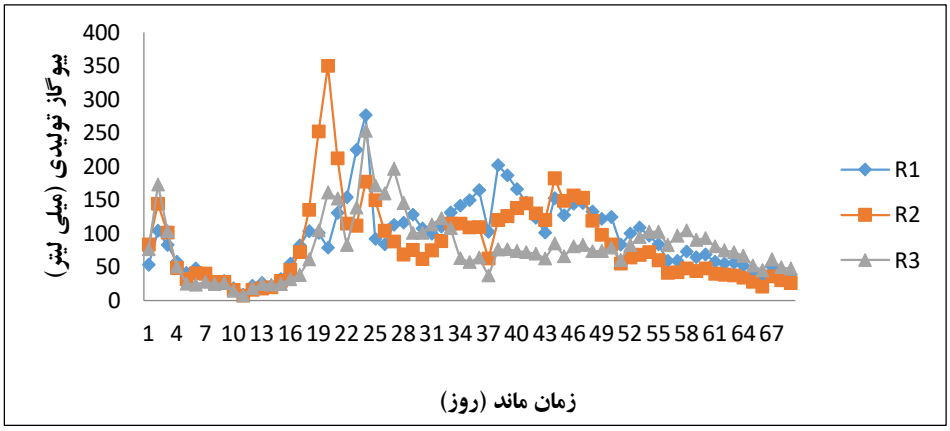
که در آن: Y= میزان تجمعی حجم بیوگاز تولیدی (ml)، P = میزان پتانسیل تجمعی حجم بیوگاز تولیدی (ml/day)، t = زمان پیشرفت فرآیند هضم (day) و k= ثابت‌های به دست آمده از معادله سینتیک فرآیند هضم هستند.

برای انجام مدل‌سازی از جعبه ابزار Curve fitting نرم‌افزار MATLAB 14 استفاده می‌شود که در این جعبه ابزار داده‌های حاصل از آزمایش بارگذاری شده و نمودار تولید تجمعی بیوگاز در طول زمان نگهداری مواد درون هاضم بر حسب روز رسم می‌شود. سپس معادله مورد نظر در قسمت مربوط Custom Equations تعریف می‌شود و الگوریتم مناسب برای انجام عملیات انطباق، انتخاب می‌شود. در ادامه با استفاده از روش مجموع مربعاتِ کمترین خطاها بین داده‌های آزمایش و داده‌هایی که تخمین زده شده‌اند، پارامترهای مورد نیاز تخمین زده می‌شوند و از مقدار محاسبه شده ضریب تبیین برای ارزیابی کیفیت انطباق مدل بر داده‌های آزمایشی استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

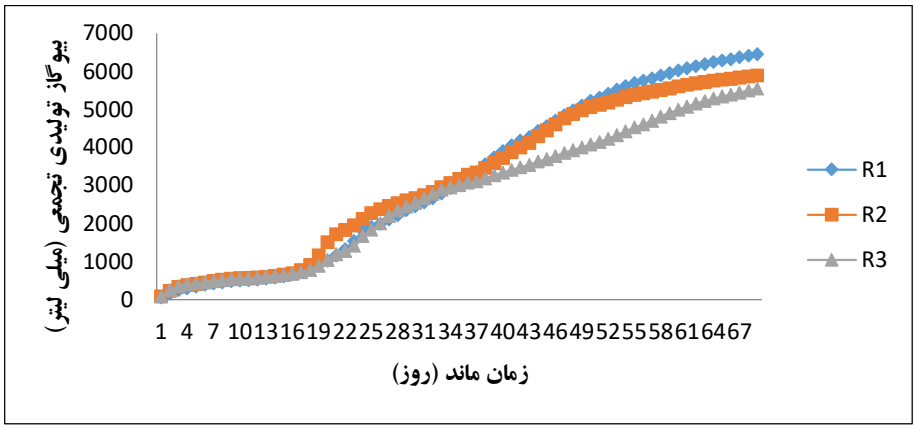
۱- بررسی اثر ترکیبات مختلف ضایعات بر میزان بیوگاز تولیدی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر از ترکیب نسبی‌های ۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰ و ۳۰:۷۰ ضایعات کدوی آجیلی و کود گاوی استفاده شد و سپس ضایعات با نسبت ۲:۱ با آب مخلوط شدند (میزان ۲۰۰ گرم ضایعات و ۴۰۰ میلی لیتر آب). به منظور تحلیل و بررسی میزان بیوگاز تولیدی از رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2016 استفاده شده است. در شکل (۲) نمودار مربوط به تیمارهای (R1, R2, R3) که هر یک از میانگین سه تکرار به دست آمده‌اند نشان داده شده است. نمودار حاصل از R1 شامل میانگین حاصل از سه تکرار (R1-1, R1-2, R1-3) و ترکیب نسبی (۱۰:۹۰) ضایعات کدو و کود گاوی می‌باشد. همچنین نمودار تیمار R2 در ترکیب نسبی (۲۰:۸۰) شامل میانگین حاصل از سه تکرار (R2-1,R2-2,R2-3) می‌باشد و نمودار مربوط به تیمار R3 حاصل میانگین تکرارهای (R3-1, R3-2, R3-3) در ترکیب نسبی (۳۰:۷۰) می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مدت زمان ماند برای تیمارها ۶۹ روز می‌باشد. البته قابل ذکر است که در روزهای بعد از ۶۹ روز نیز مقدار گاز تولیدی قابل اندازه‌گیری بود اما به دلیل ناچیز بودن مورد نظر قرار نگرفت. با توجه به نمودارها اینگونه می‌توان بیان کرد 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. این مسئله می‌تواند به دلیل کاهش pH و اسیدی شدن محیط هضم باشد. به همین علت پس از کاهش میزان تولید بیوگاز در روز دهم آزمایش، مقدار ۵ گرم آهک به برخی تیمارها شامل تیمار (R1-1, R2-1, R3-1) جهت افزایش pH اضافه شد و مشاهده شد که با افزودن آهک تیمارهای R1-1,R2-1 و R3-1 میزان روزانه تولید بیوگاز در حدود یک هفته بعد در مقایسه با تیمارهای که آهک به آن‌ها افزوده نشده بود افزایش اندکی داشته و سپس مقدار گاز تولیدی روندی مشابه با سایر تیمارها را سپری کردند. همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، مقدار تولید روزانه بیوگاز در نمودار R2 در روز دوازدهم 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. در تیمار R3 میزان تولید بیوگاز در روزهای دوم و سوم افزایش داشته و سپس در روز چهارم این مقدار کاهش پیدا کرده و این روند کاهشی تا روز هفدهم ادامه یافته و در روز هجدهم میزان تولید بیوگاز روند صعودی در پیش گرفته است. کلانتری میبدی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهش خود برای تولید بیوگاز از شکمبه گاوی از آهک در غلظت‌های جامد مختلف استفاده کرده‌اند و نتایج نشان داده است که افزودن آهک تأثیر مثبتی در بهبود عملکرد هاضم‌ها و تولید بیوگاز داشته است.



شکل ۲- میزان بیوگاز تولیدی روزانه برای تیمارهای مختلف آزمایش

نتایج بیوگاز تولیدی تجمعی در هر سه ترکیب نسبی از کود گاوی و ضایعات کدوی آجیلی در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به این شکل بیشترین بیوگاز تولیدی مربوط به تیمار R1 یعنی ترکیب نسبی ۱۰:۹۰ می باشد.



شکل ۳- میزان بیوگاز تولیدی تجمعی برای تیمارهای مختلف آزمایش

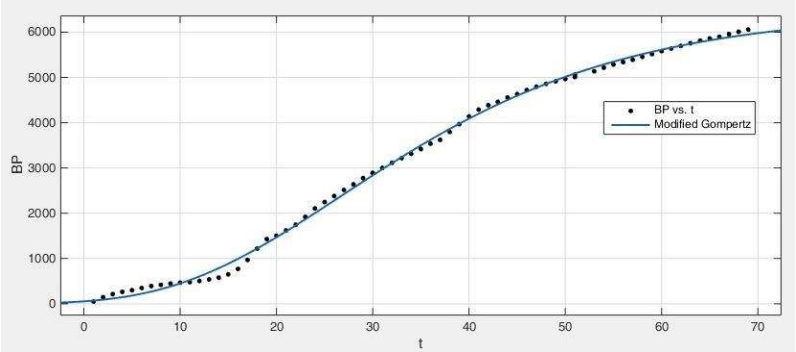
البته همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، در کلیه هاضم‌ها از کود تازه گاوی استفاده شده است که پتانسیل بالایی در تولید گاز متان دارد و در صورت عدم بهره‌برداری از آن، این گاز در محیط آزاد می‌شود و گرمای زیادی را تولید می‌کند. در واقع کود گاوی در ترکیب با ضایعات کشاورزی در فرآیند هضم بی‌هوازی بسیار خوب عمل می‌کند زیرا به رقیق شدن موادی که دارای غلظت جامد بالایی هستند کمک می‌کند و ظرفیت بافری و مواد مغذی لازم را در محیط هضم برای باکتری‌ها فراهم می‌کند. به همین دلیل افزودن درصد بالای کود گاوی در محیط هضم می‌تواند در تسریع و تولید بیوگاز نقش بسزایی داشته باشد [۲۴]؛ که این می‌تواند یکی از دلایل افزایش سریع تولید گاز در روزهای نخست باشد.

روند کاهشی مشاهده شده در کلیه هاضم‌ها هم می‌تواند دلایل بسیاری از جمله کاهش pH محیط هضم داشته باشد که فعالیت باکتری‌های متانزا در چنین شرایطی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه کاهش میزان تولید گاز روزانه را به همراه خواهد داشت. از دلایل دیگر کاهش و متوقف شدن بیوگاز می‌توان به افزایش بیش از حد نیتروژن در محیط هضم می‌شود که منجر به تولید گاز آمونیاک می‌شود اشاره کرد که سبب اختلال در محیط هضم بی‌هوازی می‌گردد.

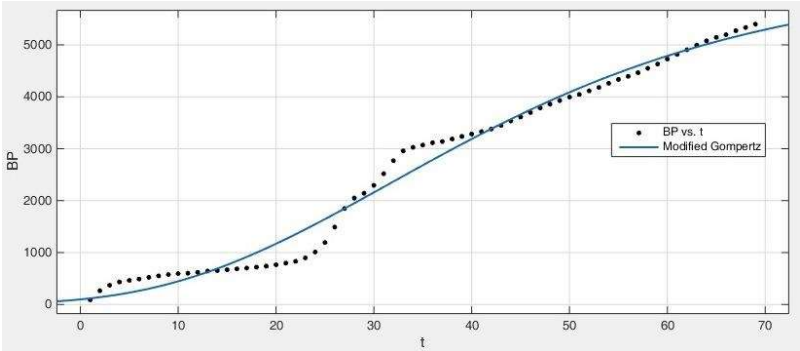
در بررسی مطالعات پیشین، پژوهش [۲۵] از ترکیب تفاله نیشکر و کود تازه گاوی با نسبت‌های ۱۰۰:۰، ۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰ و ۲۵:۷۵ در دو شرایط دمایی مزوفیلیک و ترموفیلیک استفاده کرد که در هر دو دما در روزهای ابتدایی آزمایش، میزان تولید بیوگاز روزانه بالا بوده و سپس یک روند کاهشی را در پی گرفته است. وی این شرایط را به دلیل استفاده از کود تازه گاوی توجیه نموده است که با ادعای پژوهش حاضر همخوانی دارد. علاوه بر این در تحقیق مذکور بیان شده که برای افزایش تولید بیوگاز باید میزان کود گاوی از ضایعات کشاورزی بیشتر باشد که این نتیجه نیز با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. نتایج مطالعه [۲۶] در بررسی میزان تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی و سبوس برنج با استفاده از سه ترکیب نسبی ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵ و ۰:۱۰۰ نشان داد که با استفاده از سبوس برنج به تنهایی به عنوان خوراک هاضم، گازی تولید نشد و با افزایش سهم کود گاوی در ترکیب، میزان تولید بیوگاز افزایش یافت. نتایج تحقیق [۱۷] در بررسی فرآیند تولید بیوگاز از مخلوط کود گاوی و ضایعات گلاب‌گیری با نسبت‌های 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. به طور کلی می‌توان 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 می‌یابد.

۲- نتایج مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از معادله گومپرتز اصلاح شده

شکل (۴) نحوه انطباق معادله گومپرتز بر تیمار با ترکیب نسبی ۱۰:۹۰ و شکل (۵) نحوه انطباق این معادله را بر تیمار با ترکیب نسبی ۳۰:۷۰ از ضایعات کدو و کود گاوی که به ترتیب بهترین و بدترین نتایج انطباق را در بین تیمارهای موجود نشان دادند، ارائه می‌کند. محور افقی زمان نگهداری مواد درون هاضم‌ها (زمان ماند) و محور عمودی میزان تولید تجمعی بیوگاز را نشان می‌دهد.



شکل ٤- انطباق معادله گومپرتز بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R1-3



شکل ٥- انطباق معادله گومپرتز بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R3-2

با مشاهده‌ی شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش سهم کود در ترکیب با ضایعات کدو، دقت معادله گومپرتز و میزان انطباق آن بر داده‌های آزمایش کاسته شده است. در واقع بیشترین میزان گاز تولیدی در عمل هضم مربوط به کود گاوی است و در تیماری که کود گاوی بیشترین سهم را در ترکیب با ضایعات کدو داشته است و منجر به تولید بیشینه مقدار گاز شده است، دقت مدل بالاتر است. کاهش میزان کود گاوی و افزایش سهم ضایعات کدو باعث شده است که روند تولید بیوگاز به صورت یکنواخت طی نشود. در پژوهش [۲۲] برای مدل‌سازی تولید بیوگاز از ضایعات مرغداری در حالت‌های مختلف مانند ضایعات نرم، لجن نامحلول معلق و ضایعات به صورت پاستوریزه از چند مدل از جمله گومپرتز و لاجستیک استفاده کردند. هر دو مدل بر داده‌های حاصل از لجن نامحلول معلق به خوبی منطبق بوده و مدل دقیقی را برای این نمونه ارائه کردند اما در مورد مواد زائد نرم و همچنین پاستوریزه بودن مواد مدل گومپرتز و لاجستیک به خوبی بر داده‌ها انطباق نداشتند و برای توصیف تولید بیوگاز مناسب نبودند. این محققین دلیل این عدم انطباق را به ویژگی‌های خاص توابع رشد اصلی، الگوهای تجزیه بیولوژیکی و همچنین انباشت و تجمع اسیدهای چرب نسبت داده‌اند.

جدول (۳) پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل گومپرتز اصلاح شده به ازای تیمارهای موجود در آزمایش‌های تحقیق حاضر را ارائه می‌کند. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین پتانسیل تولید بیوگاز (P) و بیشترین نرخ تولید بیوگاز (Rm) برای

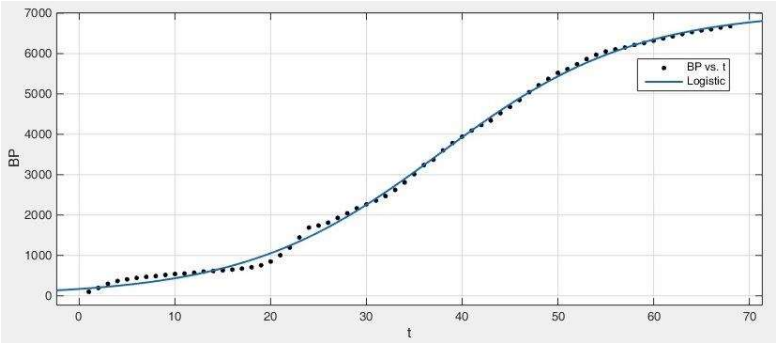
تیمارهای R1-2 و R1-1 پیش‌بینی شده است. همچنین میزان بیوگاز تجمعی نیز در اکثر تیمارها به میزان پتانسیل تولید بیوگاز بسیار نزدیک است که بیشترین میزان این پتانسیل تولید مربوط به تیمار R 1-1 می‌باشد که دارای بیشترین سهم کود در ترکیب ضایعات می‌باشد. علاوه بر این، معیارهای ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بیانگر انطباق خوب مدل گومپرتز با داده‌های حاصل از آزمایش به‌ویژه با تیمار R 1-1 هستند. همچنین با مشاهده جدول (۳) می‌توان به این نتیجه دست یافت که هر چه فاز تأخیر کوچک‌تر باشد نشان-دهنده‌ی آن است که باکتری‌های متانزا به زمان کمتری برای حضور در فرآیند هضم بی‌هوازی نیاز داشته‌اند. بنابراین با کمتر بودن این زمان، میزان تولید بیوگاز افزایش می‌یابد.

جدول ۳- پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل گومپرتز برای تیمارهای موجود در آزمایش

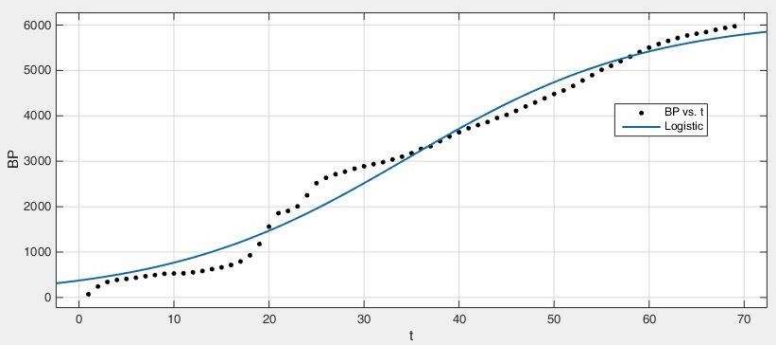
تیمارها	ترکیب نسبی	ترکیب نسبی خوراک با آب	M (ml)	P (ml/day)	Rm (ml/day)	λ (day)	R^2	RMSE
R1-1	۱۰:۹۰	۲:۲	۶۸۴۴/۳۳	۸۳۸۱	۱۴۸/۵	۱۴/۹۲	۰/۹۹۵۱	۱/۶۲
R1-2	۱۰:۹۰	۲:۲	۶۹۱۲/۷۲	۸۰۵۶	۱۵۸/۷	۱۵/۱۱	۰/۹۹۴۴	۱/۸۰
R1-3	۱۰:۹۰	۲:۲	۵۹۴۹/۶۷	۶۴۶۸	۱۴۰/۱	۹/۶۷۲	۰/۹۹۸۳	۰/۸۶
R2-1	۲۰:۸۰	۲:۲	۶۰۰۵/۹۴	۶۶۷۴	۱۳۲/۱	۸/۴۲۳	۰/۹۹۳۳	۱/۶۶
R2-2	۲۰:۸۰	۲:۲	۵۹۶۵/۴۷	۶۹۸۶	۱۲۴/۸	۱۰/۲۲	۰/۹۹۳۴	۱/۶۲
R2-3	۲۰:۸۰	۲:۲	۶۱۲۰/۵۹	۶۹۶۴	۱۳۱	۹/۲۲۵	۰/۹۹۳۹	۱/۶۱
R3-1	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۹۲۶/۹۶	۷۱۶۸	۱۱۴/۱	۷/۳۳۴	۰/۹۸۸۰	۲/۱۲
R3-2	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۲۵۱/۴۹	۶۳۱۷	۱۰۵/۲	۹/۴۲۱	۰/۹۸۲۶	۲/۳۱
R3-3	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۱۸۰/۱۱	۶۴۹۳	۹۸/۶۳	۸/۵۶۹	۰/۹۸۶۸	۱/۹۴

۳- نتایج مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از معادله لاجستیک

نحوه انطباق معادله لاجستیک بر تیمار با ترکیب نسبی ۱۰:۹۰ در شکل (۶) و انطباق این معادله با تیمار با ترکیب نسبی ۳۰:۷۰ در شکل (۷) ارائه شده است که به ترتیب بهترین و بدترین نتایج انطباق را در بین تیمارهای مورد بررسی نشان داده‌اند. در این شکل‌ها محور افقی نشان‌دهنده زمان نگهداری مواد درون هاضم‌ها و محور عمودی نشان‌دهنده میزان تولید تجمعی بیوگاز است.



شکل ٦- انطباق معادله لاجستیک بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R1-2



شکل ۷- انطباق معادله لاجستیک بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R3-1

همان‌طور که در شکل‌های فوق قابل مشاهده است، مدل لاجستیک در روزهای ابتدایی انطباق خوبی بر منحنی داده‌ها نداشته است که این می‌تواند به دلیل تولید گاز دی‌اکسیدکربن در روزهای ابتدایی فرآیند و عدم سازگاری میکروارگانیسم‌ها نسبت به خوراک ورودی به هاضم‌ها باشد. سپس در ادامه فرآیند و در روزهای بعد، این انطباق حالت بهتری دارد که این می‌تواند به دلیل استفاده از کود گاوی که نقش تسریع کننده و شتاب دهنده در تولید را دارد باشدکه با یافته‌های مطالعه [۱۸] مطابقت دارد.

پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل لاجستیک در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه این جدول می‌توان دریافت که از بین ۹ تیمار موجود در آزمایش، بیشترین پتانسیل تولید بیوگاز به ترتیب مربوط به تیمارهای R1-1 و R1-2 با (ml/day) ۷۰۵۵ و (ml/day) ۷۰۴۴ می‌باشد که در هر دوی این تیمارها سهم کود گاوی در ترکیب، بیشترین مقدار است. علاوه بر این، بیشترین نرخ تولید بیوگاز نیز در دو تیمار ذکر شده از میزان بالایی برخوردار است.

جدول ٤- پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل لاجستیک برای تیمارهای موجود در آزمایش

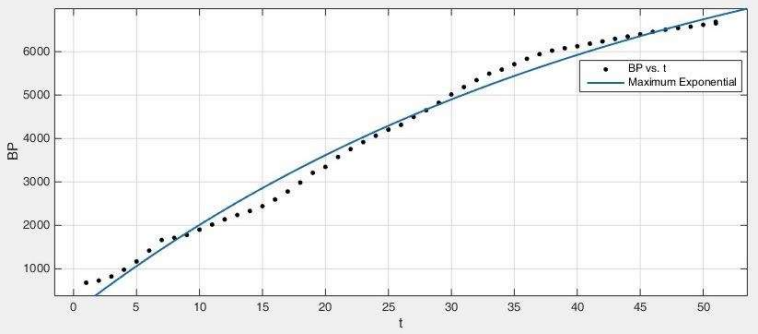
تیمارها	ترکیب نسبی	ترکیب نسبی خوراک با آب	M (ml)	P (ml/day)	Rm (ml/day)	λ (day)	R^2	RMSE
R1-1	۱۰:۹۰	۲:۲	۶۶۳۹/۳۲	۷۰۴۴	۱۶۴/۵	۱۷/۶۴	۰/۹۹۷۹	۱/۰۷
R1-2	۱۰:۹۰	۲:۲	۶۷۴۵/۲۴	۷۰۵۵	۱۷۳/۵	۱۷/۳۵	۰/۹۹۸۵	۰/۹۲
R1-3	۱۰:۹۰	۲:۲	۵۷۵۲/۵۹	۵۸۷۹	۱۴۹/۱	۱۱/۶۵	۰/۹۹۵۰	۱/۴۵

R2-1	۲۰:۸۰	۲:۲	۵۸۵۱/۷۶	۶۰۳۶	۱۴۱/۴	۱۰/۷۵	۰/۹۹۳۱	۱/۶۹
R2-2	۲۰:۸۰	۲:۲	۵۸۰۶/۴۶	۶۰۹۱	۱۳۶/۱	۱۲/۸۸	۰/۹۹۴۵	۱/۴۸
R2-3	۲۰:۸۰	۲:۲	۵۹۶۵/۳۶	۶۲۰۵	۱۴۱	۱۱/۶۳	۰/۹۹۳۳	۱/۶۹
R3-1	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۷۶۷/۸۳	۶۱۴۸	۱۲۱/۶	۹/۳۴۷	۰/۹۸۱۳	۲/۶۵
R3-2	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۰۵۵/۴۹	۵۲۹۴	۱۱۸/۷	۱۲/۶۵	۰/۹۸۱۸	۲/۳۷
R3-3	۳۰:۷۰	۲:۲	۵۰۳۴/۹۹	۵۴۲۰	۱۰۷/۱	۱۱/۱۷	۰/۹۸۳۶	۲/۱۷

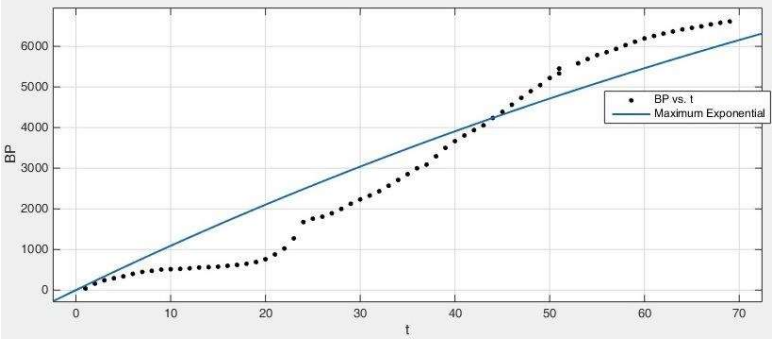
با بررسی مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا که انطباق بین داده‌های حاصل از آزمایش را با داده‌های تخمین زده شده توسط مدل لاجستیک بررسی می‌کنند، می‌توان گفت که مدل لاجستیک به خوبی بر داده‌های حاصل از آزمایش برازش داشته است.

٤- نتایج مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز با استفاده از معادله تابع نمایی ماکزیمم

انطباق معادله تابع نمایی ماکزیمم بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمارهای R1-2 و R1-1 در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است که به ترتیب بهترین و بدترین نتایج انطباق را در بین تیمارهای مورد آزمایش نشان داده‌اند.



شکل ۸- انطباق معادله تابع نمایی ماکزیمم بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R1-2



شکل ۹- انطباق معادله تابع نمایی ماکزیمم بر منحنی تولید تجمعی بیوگاز برای تیمار R1-1

در این نمودار محور افقی نشان‌دهنده زمان نگهداری مواد درون هاضم‌ها و محور عمودی نمایانگر میزان تولید تجمعی بیوگاز است. با بررسی شکل‌های فوق مشاهده می‌شود که معادله مذکور انطباق خوبی بر داده‌های آزمایش ندارد؛ هر چند تیمار R1-2 از انطباق بهتری نسبت به سایر تیمارها برخوردار است. به طور کلی می‌توان گفت که مدل تابع نمایی ماکزیمم مدل مناسبی جهت تخمین فرآیند بیوگاز نیست. مدل نمایی ماکزیمم توسط محققین بسیاری در تحقیقات به کار گرفته شده است که با بررسی نتایج آن‌ها مشاهده می‌شود که دقت

مدل مذکور در تخمین و پیش‌بینی فرآیند تولید بیوگاز از مدل‌های دیگرمانند گومپرتز و لاجستیک پایین‌تر بوده است. این مطلب در پژوهش‌های [۱۸ و ۲۷] گزارش شده است.

جدول (۵) پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل تابع نمایی ماکزیمم برای تیمارهای موجود در آزمایش را ارائه می‌کند.

جدول ۵- پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل تابع نمایی ماکزیمم برای تیمارهای موجود در آزمایش

تیمارها	ترکیب نسبی	ترکیب نسبی خوراک با آب	M (ml)	P (ml/day)	K (ml/day)	R^2	RMSE
R1-1	۱۰:۹۰	۱:۱	۲:۲	$۱/۳۵*۱۰^{+۵}$	$۱/۵*۱۰^{+۵}$	۰/۰۷۵۴۸	۷/۱۸
R1-2	۱۰:۹۰	۱:۱	۲:۲	$۹/۸*۱۰^{+۳}$	$۱*۱۰^{+۴}$	۰/۲۲۴۴	۲/۱۸
R1-3	۱۰:۹۰	۱:۱	۲:۲	$۱/۳۴*۱۰^{+۴}$	$۱/۴*۱۰^{+۴}$	۰/۰۸۱۷۵	۴/۰۳
R2-1	۲۰:۸۰	۱:۱	۲:۲	$۱/۳۵*۱۰^{+۴}$	$۱/۴*۱۰^{+۴}$	۰/۰۸۲۵۲	۳/۷۸
R2-2	۲۰:۸۰	۱:۱	۲:۲	$۱/۹۰*۱۰^{+۴}$	$۲*۱۰^{+۴}$	۰/۰۵۰۴۸	۴/۲۴
R2-3	۲۰:۸۰	۱:۱	۲:۲	$۱/۳۳*۱۰^{+۴}$	$۱/۴*۱۰^{+۴}$	۰/۰۸۱۶۶	۴/۳۳
R3-1	۳۰:۷۰	۱:۱	۲:۲	$۲/۴۵*۱۰^{+۵}$	$۲/۴۹۹*۱۰^{+۵}$	۰/۰۰۳۶۱۶	۲/۶۲
R3-2	۳۰:۷۰	۱:۱	۲:۲	$۹/۵۷*۱۰^{+۴}$	$۹/۹۸۸*۱۰^{+۴}$	۰/۰۰۷۹۵۳	۳/۵۶
R3-3	۳۰:۷۰	۱:۱	۲:۲	$۹/۶۸*۱۰^{+۴}$	$۹/۹۴۵*۱۰^{+۴}$	۰/۰۰۷۸۰۶	۲/۷۵

با بررسی مقادیر ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا در جدول فوق می‌توان استنباط کرد که مدل تابع نمایی ماکزیمم در مقایسه با دو مدل قبل در تخمین بیوگاز ضعیف عمل کرده است. علاوه بر این، با بررسی مقادیر تخمین زده شده برای پتانسیل تولید و بیشینه نرخ تولید بیوگاز و ناچیز بودن این مقادیر می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور در توصیف فرآیند بیوگاز نامناسب بوده است. با بررسی شکل فوق و مقایسه آن با عملکرد دو معادله دیگر می‌توان دریافت که دو مدل گومپرتز و لاجستیک در مقایسه با مدل تابع نمایی ماکزیمم از توانایی بالایی برای تخمین و پیش‌بینی میزان بیوگاز تولیدی برخوردار بوده‌اند. در واقع دو مدل نامبرده در پیش‌بینی پتانسیل تولید بیوگاز به هم نزدیک هستند و کارایی بهتری نسبت به تابع نمایی ماکزیمم دارند. نتایج پژوهش [۱۸] نیز در مورد بررسی هر سه مدل در پیش‌بینی فرآیند تولید بیوگاز از فضولات گاوی مؤید نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر است. همچنین این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط [۲۷] که در پژوهش خود برای مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب کود گاوی و پوست درخت از سه مدل گومپرتز، لاجستیک و تابع نمایی استفاده کردند، هم‌خوانی دارد. آن‌ها گزارش کردند که دو مدل گومپرتز و لاجستیک بهترین برازش را بر داده‌های آزمایش داشته‌اند. [۱۵] در پژوهش خود که از چندین مدل استفاده کرده بودند پس از بررسی مدل‌ها به این نتیجه دست یافتند که برای توصیف روند تولید بیوگاز معادله گومپرتز به تنهایی کافی بوده و نتایج قابل قبول‌تری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه داده است. [۲۸] در مطالعه خود به منظور بهینه‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی ضایعات جامد شهری از چندین مدل از جمله گومپرتز و لاجستیک بهره گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها نیز نشان دادکه مدل گومپرتز نتایج قابل قبول‌تری را در مورد تیمارها ارائه کرده است. به طور کلی می‌توان گفت که مدل‌سازی روند تولید بیوگاز با استفاده از دو مدل گومپرتز و لاجستیک به خوبی انجام شد و این مدل‌ها در پیش‌بینی میزان تولید مناسب عمل کرده‌اند. این در صورتی است که مدل تابع نمایی ماکزیمم در تخمین و پیش‌بینی این فرآیند به خوبی دو مدل دیگر عمل نکرده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب ضایعات کدوی آجیلی و کود گاوی آزمایش‌هایی با استفاده از سه ترکیب نسبی ضایعات به کود گاوی (۹۰:۱۰، ۸۰:۲۰، ۷۰:۳۰) انجام شد. سامانه استحصال تولید بیوگاز شامل ۹ هاضم شیشه‌ای یک لیتری که درون حمام آب گرم قرار داده شدند برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. عوامل موثر در تولید بیوگاز از جمله نسبت کربن به نیتروژن، درصد کل ماده جامد و درصد کل ماده فرار بر روی نمونه‌های ضایعات کدو و کود گاوی اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). برای مدل‌سازی بیوگاز تولیدی از سه مدل گومپرتز اصلاح شده، لاجستیک و تابع نمایی ماکزیمم استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان بیان کرد که مقدار بیوگاز تولیدی در آزمایش‌ها برای ترکیب نسبی ضایعات کدوی آجیلی و فضولات دامی ۹۰:۱۰ بیشتر از سایر ترکیبات بود. نتایج حاصل از مدل‌سازی نیز نشان داد که مدل‌های گومپرتز اصلاح شده و لاجستیک میزان تولید بیوگاز را نسبت به تابع نمایی ماکزیمم بهتر پیش‌بینی کردند و ضریب تبیین بالای آن‌ها حکایت از انطباق خیلی خوب این مدل‌ها بر داده‌های آزمایش داشت.

منابع مورد استفاده

1- Zareei, S. (2018). Project scheduling for constructing Biogas plant using critical path method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 81, 756-759.
2- Das, A. & Mondal, C. (2016). Biogas production from co-digestion of substrates. *Journal of Environment Sciences*, 5(1), 49-57.
3- 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)
4- Bassani, I., Kougias, P.G. & 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.
5- Ai, P., Chen, M., Ran, Y., Jin, K., Peng, J. & Abomohra, A.F. (2020). Digestate recirculation through co-digestion with rice straw: Towards high biogas production and efficient waste recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2631, 121441.
6- Mahmoodi-Eshkaftaki, M. & Ebrahimi, R. (2019). Assess a new strategy and develop a new mixer to improve anaerobic microbial activities and clean biogas production. *Journal of Cleaner Production,* 206, 797-807.
7- Zaher, U., Cheong, D.Y., Wu, B. & 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.
8- Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of anaerobic digesters. John Wiley and Sons, Inc. Publication, United States, America.
9- 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.
10- Latha, K., Velraj, R., Shanmugam, P. & 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.
11- Mohammadrezaei, R., Zareei, S. & Behroozi- Khazaei, N. (2018). Optimum mixing rate in biogas reactors: Energy balance calculations and computational fluid dynamics simulation. *Energy,* 159, 54-60.
12- Budiyono, O., Widiasa, I.N., Johari, S. & 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.
13- Prabhu, A.V., Raja, S.A. & Lee, C.L.R. (2014). Biogas production from biomass waste. *Journal of Innovative Research in Technology*, 1(8), 73-83.
14- Zareei, S. & 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.
15- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M. & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(6), 1875-1881.
16- Ghatak, D.M. & Mahanta, P. (2014). Comparison of kinetic models for biogas production rate from saw dust. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(07), 248-254.

17- Doagoi, A.R., Ghazanfari Moghaddam, A. & 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)
18- Taghinazhad, J., Abdi, R. & Adl, M. (2018). Modeling of Biogas Production Process from Cow Manure with Completely Stirred Tank Reactor under Semi Continuously Feeding. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(1), 159-169.
19- Etuwe, C.N., Momoh, Y.O.L. & Iyagba, E.T. (2016). Development of mathematical models and application of the modified Gompertz models for designing batch biogas. *Waste and Biomass Valorization*, 7(3), 543-550.
20- Matheri, A.N., Belaid, M., Seodigeng, T. & Ngila, C.J. (2016). Modelling the kinetic of biogas co-digestion of pig waste and grass clippings. Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK.
21- Lo, H.M., Kurniawan, T.A., Sillanpaa, M.E.T., Pai, T.Y., Chiang, C.F., Chao, K.P., Liu, M.H., Chuang, S.H., Banks, C.J., Wang, S.C., Lin, K.C., Lin, C.Y., Liu, W.F., Cheng, P.H., Chen, C.K., Chiu, H.Y.& Wu, H.Y. (2010). Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested MSWI ashes in anaerobic bioreactors. *Bioresource Technology*, 101(16), 6329-6335.
22- Ware, A. & Power, N. (2017). Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth function. *Renewable Energy*, 104, 50-59.
23- Siripatana, C., Jijai, S., O-thong, S. & Ismail, N. (2015). Modeling of biomethane production from agro-inndustrial wastewaters with constant biomass: analysis of Gompertz equation. Conference Paper, 4th International Conference on Environmental Research and Technology: Exploring the Frontiers in Environmental Science and Technology Research (ICERT 2015), May 27-29, Penang, Malaysia.
24- Fang, C., Boe, K. & Angelidaki, I. (2011). Anaerobic co- digestion of by- products from sugar production with cow manure. *Water Research,* 45, 3473-3480.
25- Keshavarzian, Z. & 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)
26- Elijah, T.I., Ibifuro, A.M. & 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.
27- Latinwo, G.K. & Agarry, S.E. (2015). Modelling the kinetics of biogas production from mesophilic anaerobic co- digestion of cow dung with plantain peels. *Journal of Renewable Energy Development*, 4(1), 55-63.
28- Nielfa, A., Cano, R., Vinot, M., Fernandez, E. & 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.

Modeling Biogas Production Kinetics of Co-digestion Cow Manure with Pumpkin Waste

Parisa Jahangir Moghadam[1], Samira Zareei[2,*]

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan,Sanandaj, Iran

Abstract

Pumpkin (Cucurbita pepo) is one of the products that has a lot of waste and only its seeds are used, so it can be considered as a source for biogas production. On the other hand, livestock wastes that are disposed of in large volumes from livestock and their accumulation in the environment can cause environmental pollution, are rich in organic matter and can be used as raw materials for Biogas production. This study was conducted to model the biogas production process by combining different ratios of pumpkin waste and cow manure (10:90, 20:80 and 30:70). Results showed that the amount of produced biogas was higher for the pumpkin waste:cow manure ratio of 10:90 than others. Three modified Gompertz models, logistic and maximum exponential function for modeling biogas produced in MATLAB software were investigated. The modeling results showed that the modified Gompertz and logistic models had acceptable performance and predicted the biogas production rate better than the maximum exponential function.

Key words: Anaerobic digestion, Gompertz, Logistics, Maximum exponential, Renewable energy.

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