

## Determination of the Ingredient of Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Karaj and Its Impacts on the Potential of Biogas Production

AHMAD REZA SALEHIYOUN<sup>1</sup>, MOHAMMAD SHARIFI<sup>2\*</sup>, MORTAZA AGHBASHLO<sup>3</sup>,  
HAMID ZILOUEI<sup>4</sup>, SAEED MOFATTEH<sup>5</sup>

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
(Received: May. 18, 2019- Revised: July. 29, 2019- Accepted: Aug. 23, 2019)

### ABSTRACT

Anaerobic digestion in order to produce biogas is a proven method for producing renewable energy from municipal solid waste. In this research, organic fractions of municipal solid waste compounds were determined in Karaj metropolitan area. The organic waste components were monitored in five categories of fruits, fat and protein, starches, vegetables, and cellulose wastes in the winter and summer seasons. Then, a sample representing the average amount of waste components was synthesized and biomethane yield, digestibility indicators and kinetic modeling parameters of biogas production were investigated in batch tests at mesophilic temperature at two concentrations of 8 and 15 TS%. The most part in the organic fraction was fruit and vegetable waste with a total of 62.9% and 70.6% in winter and summer, respectively. The biomethane yield and methane content at 8% and 15% TS had significant difference with 385.2 and 289.2 L/kg VS and of 66.8 and 58.8%, respectively, but there was no significant difference for VS removal with 87.99% and 84.72%. As a result, for source separated MSW, anaerobic digestion at the lower TSs has better results than dry. Continuous anaerobic digestion at 30 day hydraulic retention time is more effective for specific biomethane production and high volumetric biogas production under stable conditions.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Municipal solid waste, Biogas, Batch test, Modeling

## تعیین اجزاء بخش آلی زباله جامد شهری در کرج و تأثیر آن بر پتانسیل تولید بیوگاز

احمدرضا صالحیون<sup>۱</sup>، محمد شریفی<sup>۱\*</sup>، مرتضی آغاباشلو<sup>۱</sup>، حمید زیلویی<sup>۲</sup>، سعید مفتاح<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی،

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۵)

## چکیده

هضم بی‌هوازی به منظور تولید بیوگاز روشی اثبات شده برای تولید انرژی تجدیدپذیر از زباله‌های جامد شهری است. در این تحقیق اجزای بخش آلی زباله جامد شهری در کلان‌شهر کرج تعیین شد. اجزاء بخش آلی زباله در پنج دسته ضایعات میوه، چربی و پروتئین، نشاسته، سبزیجات، و سلولزی در دو فصل زمستان و تابستان رصد شد. سپس یک نمونه که بیانگر متوسط مقدار اجزاء زباله باشد سنتز شده و عملکرد بیومتان، شاخص‌های هضم‌پذیری و پارامترهای مدل‌سازی سینتیک تولید بیوگاز در آزمون وعده‌ای در دمای مزوفیل و در دو سطح غلظت ۸ و ۱۵٪ TS بررسی گردید. بیشترین جزء در بخش آلی زباله به ضایعات میوه و سبزی با مجموع ۶۲/۹ و ۷۰/۶٪ در دو فصل زمستان و تابستان تعلق داشت. عملکرد بیومتان در ۸ و ۱۵٪ TS به ترتیب برابر با ۳۸۵/۲ و ۲۸۹/۲ L/kg VS و درصد متان ۶۶/۸ و ۵۸/۸ تفاوت معناداری داشت، اما تخریب VS با مقادیر ۸۷/۴۹ و ۸۴/۷۲٪ تفاوت معناداری نداشت. در نتیجه برای زباله تفکیک شده در مبدا هضم بی‌هوازی در TS‌های پایین‌تر، نتایج بهتری نسبت به هضم خشک دارد. هضم پیوسته برای زمان ماند ۳۰ روز برای داشتن تولید ویژه بیومتان و تولید حجمی بالا در شرایط پایدار قابل اجرا است.

واژه‌های کلیدی: هضم بی‌هوازی، زباله‌های جامد شهری، بیوگاز، آزمون وعده‌ای، مدل‌سازی

## مقدمه

افزایش رشد جمعیت مناطق شهری در سال‌های اخیر و توسعه شهرها و مناطق صنعتی، موجب تولید بیش از اندازه زباله‌های جامد شهری (MSW) و محصولات جانبی آن شده است که مشکلات عدیده‌ای برای ساکنان و مسئولان شهری ایجاد کرده است. از طرفی مدیران شهری بر کاهش تولید MSW و تفکیک آن در مبدا تأکید می‌کنند و از طرف دیگر بر فناوری‌های بازیافت و استحصال تکیه می‌شود. علاوه بر این، مشکلات زیست محیطی و توجه به سیاست‌های توسعه پایدار بیش از پیش در مدیریت زباله‌های شهری اهمیت یافته است (Salehiyou et al., 2020; Behrooznia et al., 2018; Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). بخش آلی زباله‌های جامد شهری (OFMSW) با درصد رطوبت بالا و میزان مواد جامد فرار زیاد دلیل اصلی بوی آزار دهنده و تولید زیاد شیرابه در حین جمع‌آوری، حمل و نقل و دیو در سایت‌های دفن زباله است (Salehiyou et al., 2019; Lin et al., 2011). روش‌های مختلفی برای فرآوری زباله‌های جامد شهری مانند زباله سوزی، و روش‌های بیولوژیک شامل کمپوست

کردن و هضم بی‌هوازی استفاده می‌شود (Behrooznia et al., 2018; Alibardi and Cossu, 2015). فرآیند حرارتی-شیمی زباله سوزی به دلیل پایین بودن ارزش حرارتی OFMSW محدودیت دارد، اما تولید کمپوست نیز به دلیل مصرف انرژی و مشکلات بازاریابی و فروش آن با تنگنانهایی همراه است (Salehiyou et al., 2013; Morris et al., 2019). موفقیت ناکامل روش‌های مذکور و نیز روش دفن زباله، موجب توجه جهانی به فرآیند هضم بی‌هوازی برای تولید بیوگاز شده است، خصوصاً در کشورهایی که چالش تامین سوخت‌های فسیلی دارند که موجب تامین انرژی تجدیدپذیر در قالب بیوگاز، اتانول و اسیدهای چرب فرار از این منابع می‌گردد (Lei et al., 2015). علی‌رغم دیدگاه‌های ناصحیح در حمایت از تولید انرژی از منابع زیست توده در ایران، توجه به این فناوری به دلیل مزایای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی ضرورت دارد.

در حال حاضر شهر تهران بزرگ‌ترین تولید کننده زباله در ایران به میزان ۸۵۰۰ تن در روز با سرانه تولید ۱/۱ کیلوگرم به ازای هر نفر است (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). بخش آلی

OFMSW غنی از غلات، غنی از پروتئین و یک نمونه حد واسط سنتز شد. نتایج نشان داد مقادیر بیشتر نشاسته در ترکیب زباله موجب تولید بیشتر بیوهیدروژن می‌گردد، اما زباله حاوی درصد بیشتر پروتئین پتانسیل تولید بیومتان بیشتری دارد (Alibardi and Cossu, 2015). بنابراین تعیین ترکیبات بخش آلی زباله بیانگر اطلاعاتی اساسی است که می‌تواند در مقایسه نتایج تحقیقات هضم بی‌هوازی زباله شهری نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تغییرات فصلی اجزاء OFMSW برای یک منطقه می‌تواند در بهینه سازی میزان خوراک مشترک افزودنی به یک نیروگاه بیوگاز موثر واقع شود.

تحقیقات هضم بی‌هوازی OFMSW به عنوان تک خوراک و عوامل موثر برای تولید بیوگاز در تحقیقات بسیاری چه برای زباله مخلوط به صورت مکانیکی جدا شده (Mu et al., 2018; Fernández-Rodríguez et al., 2016; Novarino and Zanetti, 2011; Di Maria et al., 2012; Fdez.-Güelfo et al., 2011) و چه برای ضایعات سنتز شده (Alibardi and Cossu, 2015; Pavi et al., 2017; Fonoll et al., 2016) بررسی شده است. اما در تحقیقات اندکی به ترکیبات بخش آلی زباله واقعی پرداخته شده است. همچنین اجزاء بخش آلی زباله و تغییرات فصلی آن به منظور تولید انرژی بیوگاز تا کنون برای کلان شهرهای ایران بررسی نشده است.

اولین اقدام برای بررسی امکان پذیری هضم بی‌هوازی برای یک خوراک تست ساده در حالت وعده‌ای برای بدست آوردن پتانسیل بیوشیمیایی متان (BMP) است. این آزمایش اطلاعات مفیدی در مورد ظرفیت تبدیل ضایعات به متان، طراحی پارامترهای عملیاتی نیروگاه بیوگاز و نیز اطلاعاتی در مورد ارزیابی اقتصادی آن در زمان تأسیس خواهد داد (Wellinger et al., 2013). هضم بی‌هوازی بسته به میزان محتوای جامد کل<sup>۴</sup> (TS) مواد در راکتور به دو دسته هضم تر (<math>TS < 15\%</math>) و هضم خشک (>math>TS > 15\%</math>) تقسیم می‌شود که برای OFMSW در دو دهه اخیر تمایل به سمت اجرای هضم خشک بیشتر بوده است. همچنین با استفاده از مدل‌های سینتیک فرآیند در آزمون وعده‌ای، مانند مدل مرتبه اول و گمپرتز اصلاح شده، می‌توان سرعت فرآیند، میزان تولید و مقدار تقریبی زمان ماند هیدرولیکی (HRT) را تخمین زد (Zhao et al., 2016; El-Mashad et al., 2010). پس از آن، آزمون پیوسته اطلاعات مفیدی از عملکرد هضم یک خوراک در طولانی مدت را داده و می‌توان پارامترهای اجرایی مانند تغییر نرخ باردهی آلی (OLR<sup>۵</sup>) را نزدیک به شرایط واقعی

پس از جداسازی اولیه با غربال های چرخان، کمپوست می‌شود و تنها بخش اندکی به میزان ۳۰۰ تن در روز به سمت کارخانه بیوگاز تهران (آبعلی) ارسال می‌شود. بنابراین هنوز ظرفیت قابل توجهی برای احداث کارخانه های بیوگاز در تهران و دیگر کلانشهرها وجود دارد.

تعیین مقدار و خصوصیات شیمیایی بخش آلی زباله نه تنها برای سنجش میزان بیوگاز آنها و تجزیه پذیری زیستی آن ضروری است، بلکه بر خصوصیات لجن باقیمانده به عنوان کودهای غنی کشاورزی اثر گذار است. میزان تولید و ترکیبات زباله در یک منطقه خاص به جغرافیای محل، تعداد ساکنین و شرایط اجتماعی آنها، فعالیت های غالب اقتصادی، استاندارد متوسط زندگی، عادات های غذایی منطقه، فصل و سامانه های جمع آوری زباله وابسته است (Hansen et al., 2007). در آمریکا OFMSW عمدتاً شامل مخلوطی از ضایعات غذایی، ضایعات باغی و کاغذ است، در حالی که در اروپا برای پسماند غذا، آشپزخانه، باغچه و پارکها تعریف می‌شود (Campuzano and González-Martínez, 2016). غالباً در تحقیقات آزمایشگاهی تخمین بیوگاز از زباله، ضایعات غذایی تهیه شده از سلف‌های دانشگاه یا رستوران‌ها به عنوان نمونه OFMSW انتخاب شده که در برخی از موارد به اجزای مختلف آن اشاره نمی‌شود. بنابراین، طبیعتاً این نمونه‌ها نمی‌تواند برای تخمین بیوگاز زباله تفکیک شده در مبدا یا زباله مکانیکی جدا شده در سایت‌های پردازش استفاده شود، چرا که در محاسبات پتانسیل بیومتان حاصل و نیز آنالیزهای اقتصادی خطا ایجاد می‌کند. همچنین پتانسیل تولید بیومتان (BMP) از یک خوراک علاوه بر اجزا آلی آن، به خصوصیات بیوشیمیایی و غذاشناسی OFMSW بستگی دارد، در صورتی که در اغلب تحقیقات بیوگاز تنها خصوصیات بیوشیمیایی مانند کربن کل، نیتروژن، تقاضای اکسیژن شیمیایی<sup>۲</sup> (COD) و عناصر کمیاب بیان می‌شود (Campuzano and González-Martínez, 2016). از آنجایی که نشاسته و قندها در ترکیب زباله سریعاً قابل تجزیه هستند، نمونه برداری و تعیین اجزا بخش آلی زباله را پر مشقت می‌سازد. در تحقیقی در ایتالیا، تأثیر اجزاء OFMSW و تغییرات آن در طی یک سال بر تولید بیومتان و بیوهیدروژن در فرآیند هضم بی‌هوازی بررسی شد. بخش آلی زباله به پنج دسته شامل نان-غلات، سبزیجات، میوه، ضایعات پروتئینی یعنی گوشت، ماهی و پنیر و پسماندهای آلی زیر سرند به اندازه ۲۰ میلی متر تقسیم شد. سپس سه دسته مخلوط از این ۵ دسته شامل

4. Hydraulic retention time  
5. Organic loading rate

1. Biochemical methane potential  
2. Chemical oxygen demand  
3. Total solid content

### مایه تلقیح

مایه تلقیح از کارخانه بیوگاز تهران از زباله شهری واقع در جاده آبلعی، انتخاب شد. هاضم به صورت دو مرحله‌ای و در شرایط دمایی مزوفیل بود. به دلیل اینکه در این تحقیق در آزمون وعده‌ای به مایه تلقیح با غلظت بالا برای انجام آزمایش در TS بالا (۱۵٪) نیاز بود، سه نوع لجن از هاضم اولیه، ثانویه و یک نمونه از لجن پسمانده غلیظ در مخازن نگهداشت انتخاب شد و با نسبت ۲۰، ۴۰ و ۴۰ درصد بر مبنای وزن تر مخلوط گشته و به مدت ۲ هفته پیش از انجام آزمایش در شرایط دمایی آزمایشگاه نگهداری شد تا سوبسترای موجود در آن توسط باکتری‌ها مصرف شود. برای هضم پیوسته از لجن مخازن ذخیره استفاده شد. مشخصات مایه تلقیح در جدول (۲) ارائه شده است.

### هضم وعده‌ای و طرح آزمایش

آزمایش‌ها به صورت وعده‌ای، در هاضم‌های شیشه‌ای با حجم یک لیتر انجام شد. مجموع خوراک و مایه تلقیح بارگذاری شده ۶۵۰ گرم به عنوان حجم مفید (مایع) پر شد. آزمایش در شرایط مزوفیل  $37^{\circ}\text{C}$  با قرار دادن نمونه‌ها در حمام آب گرم انجام شد. بخش آلی زباله بر مبنای داده‌های رکوردگیری و میانگین تقریبی ترکیبات زباله در زمستان و تابستان سنتز شد. آزمایش در ۲ سطح محتوای کل جامد (TS) ۸ و ۱۵٪ انجام شد. برای انجام آزمایش در TS ۱۵٪، هم غلظت مایه تلقیح و هم غلظت خوراک بالا برده شد (Capson-Tojo *et al.*, 2017). غلظت مایه تلقیح توسط افزودن مایه تلقیح خشک شده در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  و استفاده از میانگین وزنی طبق رابطه (۱) تا ۱۱ درصد رسانیده شد. TS خوراک ( $TS_f$ ) نیز در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  با توزین پیوسته نمونه در ۵۰٪ تنظیم شد.

$$TS_t = \frac{\sum_0^n TS_i \times m_i}{\sum_0^n m_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$TS_i$  مقدار جامد جزء  $i$  ام و  $m_i$  مقدار جرم جزء  $i$  ام است. نسبت جامد فرار (VS) مایه تلقیح به خوراک در هر آزمایش ۱:۱ تنظیم شد. بر مبنای این نسبت، برای وزن معین ۱۰۰۰ گرم مخلوط، و با داشتن TS و VS خوراک و مایه تلقیح، جرم هر کدام بدست آمد. سپس درصد TS نهایی در راکتور، با اضافه کردن آب مقطر به ۸ و ۱۵٪ رسانیده شد. پس از ورود مواد به راکتور، فضای بالای آن توسط گاز نیتروژن به مدت ۱ الی ۲ دقیقه شستشو<sup>۳</sup> شد. در نهایت VS نهایی ( $VS_t$ ) در راکتور متناسب با مقدار VS هر جزء با استفاده از رابطه (۲) به دست آمد.

بررسی کرد. اگرچه افزایش OLR در فرآیند هضم بی‌هوازی یک شاخص مطلوب محسوب شده و می‌تواند موجب افزایش تولید بیوگاز و ظرفیت عبوردهی هاضم شود، اما در سوی دیگر می‌تواند موجب بی‌ثباتی فرآیند به دلیل تولید بازدارنده‌هایی مانند اسیدهای چرب فرار (VFA) و نهایتاً توقف کلی فرآیند گردد (Liu *et al.*, 2012).

هدف از انجام این تحقیق تعیین اجزاء بخش آلی زباله جامد شهری در شهر کرج و هضم بی‌هوازی آن در روش وعده‌ای و پیوسته است. برای این منظور ابتدا اجزاء متشکله زباله در دو فصل زمستان و تابستان بررسی شد. سپس هضم بی‌هوازی وعده‌ای در دو غلظت TS ۸ و ۱۵٪ اجرا شد و متغیرهای مدل‌سازی سینتیک تولید بیومتان استخراج شد. در انتها هضم پیوسته در یک راکتور اختلاط دائم با هدف بررسی پتانسیل ویژه تولید بیومتان در حالت پیوسته و نرخ بارگذاری آلی در محدوده پایدار انجام شد.

### مواد و روش‌ها

#### تعیین اجزاء بخش آلی زباله

اجزای بخش آلی زباله توسط رکوردگیری از زباله‌های شهری ۵ خانوار با درآمد متوسط در شهر کرج، تهیه گردید. رکوردگیری در دو فصل مختلف زمستان در ماه‌های دی و اسفند در هشت نوبت و تابستان در تیرماه در سه نوبت انجام شد. نکات جمع‌آوری برای خانواده‌ها بیان شد و تنها زباله خانگی تحویل گرفته شد. پس از جداسازی اجزای خشک غیر آلی مانند شیشه، پلاستیک، مقوا، و فلزات و غیره، بخش آلی به ۵ دسته کلی شامل ضایعات میوه، سبزیجات (برگی و غیر برگی)، نشاسته (نان، ماکارونی، برنج، شیرینی، چیپس و ...)، پروتئین و چربی (لبنیات، پوست مرغ و تخم مرغ، ماهی، چربی خورشت، استخوان و ...) و در آخر، ضایعات سلولزی به جز مقوا و بسته‌های روکش‌دار<sup>۲</sup> که راحت قابل تجزیه هستند (مانند دستمال کاغذی، تکه‌های کاغذ، تفاله چای، پوسته تخمه و مانند آن که از الک‌های پردازش زباله قابل عبور بوده و رطوبت زیادی را به خود جذب می‌کنند) تقسیم گردید. شیرابه زباله خارج شد و فقط بخش آلی زباله به عنوان زباله تفکیک شده در نظر گرفته شد. پس از استخراج آمار پنج دسته، هر بخشی توسط خرد کن تیغه دار به اندازه کمتر از یک سانتی متر خرد شد. سپس بر اساس درصدهای بدست آمده بر مبنای میانگین تقریبی دو فصل زمستان و تابستان یک نمونه سنتز شده تهیه گردید و در دمای ۴ درجه تا قبل از مصرف در یخچال نگهداری شد.

3. Purge

1. Volatile fatty acids  
2. Pack

اندازه‌گیری می‌شد، اما در نهایت عملکرد متان در فشار و دمای استاندارد (۲۷۳ K و ۱ atm) تبدیل شد (Kafle and Kim, 2013). درصد بیومتان با استخراج یک نمونه ۱۰ میلی لیتری توسط سرنگ از کیسه گاز و تزریق و عبور دهی آن از محلول سود ۳ مولار برای حذف دی اکسید کربن و هیدروژن سولفید سنجیده می‌شد (شکل ۱). با توجه به اینکه ترکیب بیوگاز از آغاز بارگذاری تا انتها، روزانه تغییر می‌کند، از میانگین وزنی برای محاسبه میانگین درصد متان استفاده شد (El-Mashad et al., 2010).



شکل ۱- سامانه سنجش محتوای متان بیوگاز شامل شیشه شستشو با سدیم هیدرواکسید ۳ مولار و سامانه جابه‌جایی آب

تیغه دار به طور متناوب (۵ دقیقه روشن در هر یک ساعت) در دور ۶۰ rpm هم زده می‌شد. ترکیب خوراک مقدار متوسط مقایر بدست آمده از رکورد گیری زباله در دو فصل زمستان و تابستان بود، با این تفاوت که ضایعات سلولزی شامل دو بخش برابر ضایعات کاغذ خرد شده و برگ پاییزی درختان چنار بود. راکتور به صورت روزانه خوراک دهی شد. راکتور در ابتدا با مایه تلقیح پر شد و سه تیمار HRT ۵۰، ۴۰ و ۳۰ روز با هدف تولید بیشینه مقدار عملکرد ویژه بیومتان و عملکرد حجمی بیوگاز تولیدی و داشتن ثبات در روند تولید آزمایش شد. بیوگاز تولیدی در کیسه های گاز با حجم مشخص جمع آوری شده و در دما و فشار استاندارد تبدیل شد. درصد متان مانند روش وعده‌ای در هر روز با سه تکرار سنجیده شد. هدف از اجرای هضم پیوسته در این تحقیق، مقایسه مقدار پتانسیل بیومتان (BMP) در هضم وعده‌ای و عملکرد ویژه تولید متان (SMP) در هضم پیوسته در شرایط پایدار فرآیند بود.

$$VS_t = \frac{\sum_0^n VS_i \times TS_i \times m_i}{\sum_0^n m_i \times TS_i} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که  $VS_i$  میزان جامد فرار جزء  $i$  ام است. به منظور همزدن داخل هاضم، راکتورها به صورت دستی روزی یکبار تکان داده شد. آزمایش برای هر تیمار در ۳ تکرار اجرا شد. سه نمونه شاهد بر تعیین میزان بیوگاز تولیدی از مایه تلقیح استفاده شد. هر راکتور به یک کیسه گاز متصل شده و سپس حجم بیوگاز در یک سامانه جابه‌جایی آب سنجش شد. حجم بیوگاز در دمای آزمایشگاه

شاخص‌های نهایی شامل عملکرد متان، درصد کاهش جامد فرار و میزان درصد متان بود. عملکرد روزانه بیومتان با کم کردن حجم بیومتان تولید شده در هر روز از پس زمینه بیومتان مایه تلقیح تقسیم بر  $VS$  اضافه شده ( $VS_{added}$ ) محاسبه گردید و برای عملکرد بیومتان (BMP)، میزان تجمعی بیوگاز روزانه طبق رابطه (۳) محاسبه شد.

$$BMP = \frac{\sum_0^n (V_i - V_{ino})}{VS_{added}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که  $V_i$  و  $V_{ino}$  به ترتیب مقدار بیومتان تولید شده از هر راکتور و مایه تلقیح بر حسب لیتر در روز  $i$  ام است. آزمایش زمانی خاتمه پیدا کرد که تولید بیوگاز به کمتر از ۱ درصد میزان تولید تجمعی رسید (VDI standard, 2006).

#### هضم پیوسته

هضم پیوسته در یک راکتور فلزی اختلاط دائم (CSTR) به حجم کل ۳۰ لیتر و حجم مایع ۱۸ لیتر در دمای ثابت ۳۷ °C در یک انکوباتور انجام شد (شکل ۲). مواد با یک همزن مکانیکی عمودی

که A حجم (ml) سولفوریک اسید ۰/۱ نرمال مصرف شده تا رسیدن به pH=۵ اشاره دارد و B حجم (ml) اسید مصرف شده تا pH=۴/۴ را بیان می‌کند و v حجم نمونه سانتریفیوژ شده لجن (ml) است. مقدار تخریب VS خوراک در هضم وعده‌ای به عنوان شاخصی از موثر بودن هضم بی‌هوازی در تبدیل مواد و کاهش بار آلاینده‌گی آن، با محاسبه درصد حذف VS کل راکتور ( $VS_{remal.total}$ ) و با کم کردن از مقدار درصد حذف VS مایه تلقیح ( $VS_{remal.i}$ ) متناسب با وزن آن طبق رابطه (۵) محاسبه شد (El-Mashad et al., 2010):

$$VS_{remal.total} = \frac{m_f}{(m_f+m_i)} VS_{remal.f} + \frac{m_i}{(m_f+m_i)} VS_{remal.i} \quad (\text{رابطه } ۵)$$

که  $m_i$  و  $m_f$  جرم خوراک و مایه تلقیح اعمال شده به هر راکتور (g) است.  $VS_{remal.f}$  مقدار درصد حذف VS خوراک است. تخریب VS در هضم پیوسته با محاسبه VS لجن هضم شده و مقایسه آن با VS خوراک اضافه شده محاسبه شد.

#### تحلیل آماری و مدل‌سازی

از نرم افزار SPSS18 برای مقایسه آماری بین دو غلظت TS در آزمایش وعده‌ای در طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. متغیر مستقل، درصد TS و متغیر وابسته عملکرد بیوگاز، محتوای متان و درصد تخریب VS بود. مقدار p در سطح احتمال ۵٪ خطا ( $\alpha = ۰/۰۵$ ) تحلیل شد.

برای مدل‌سازی تولید بیومتان در آزمون وعده‌ای از دو مدل مرتبه اول و گومپرتز اصلاح شده که بیشترین کاربرد برای مواد با هضم شونده‌گی بالا را دارند بر حسب تابعی از زمان (روز) استفاده گردید. در مدل مرتبه اول، تولید تجمعی بیومتان به صورت نمایی طبق رابطه زیر افزایش می‌یابد تا به مقدار نهایی طبق رابطه (۶) برسد (Zhao et al., 2016):

$$B = B_0(1 - \exp(-kt)) \quad (\text{رابطه } ۶)$$

که B میزان تولید بیومتان تجمعی (l/kg VS) تا زمان t (روز) و  $B_0$  میزان عملکرد بیومتان (l/kg VS) است. k ثابت مدل مرتبه اول (1/day) است. همچنین ضایعاتی که نرخ تجزیه اندکی در ابتدا دارند، نیاز به یک فاز تاخیر زمانی  $\lambda$  برای راه اندازی فعالیت میکرواورگانیزم‌ها دارند. در مدل کمپرتز اصلاح شده فرض می‌شود تولید بیوگاز متناسب با فعالیت میکرواورگانیزم‌ها طبق رابطه (۷) است (Zhao et al., 2016):

$$B = B_0 \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_{max} \cdot e}{B_0}(\lambda - t)\right] + 1\right\} \quad (\text{رابطه } ۷)$$

که  $R_{max}$  بیشینه نرخ تولید بیومتان در روز (ml/g VS.d)،  $\lambda$  فاز تاخیر بر حسب روز، e عدد نپر (۲/۷۱۸۳) است. از نرم



شکل ۲- راکتور اختلاط دائم (CSTR) برای انجام هضم بی‌هوازی پیوسته

#### تحلیل‌های شیمیایی

مقدار جامد کل (TS) با قرار دادن نمونه‌های مرطوب در آن در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد (APHA, 1999). سپس نمونه‌های خشک شده آسیاب شد و برای تعیین درصد VS، در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  در کوره تا رسیدن به وزن ثابت سوزانیده شد (APHA, 1999). pH خوراک و مایه تلقیح توسط یک pH متر قابل حمل اندازه گرفته شد (Milwaukee pH55, Australia). مقدار کل کربن آلی (TOC) بر حسب درصدی از TS طبق استاندارد 5310 APHA تعیین شد (APHA, 1999). مقدار نیتروژن کج‌لدال<sup>۲</sup> (TKN) با استفاده از یک سامانه اتوکج‌لدال و سپس تیتراسیون با سولفوریک اسید بر طبق استاندارد ISO 1871 انجام شد. برای سنجش آمونیوم نیتروژن از دستگاه اسپکتروفوتومتر خودکار HACH Lange DR 3900 ساخت آلمان استفاده شد. مقدار آمونیوم در تست وعده‌ای (mg/l) با کورت شماره 303 LCK اندازه‌گیری شد. نمونه‌های لجن هضم شده<sup>۳</sup> ابتدا در دور ۶۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شده و سپس از کاغذ صافی ۴۵ میکرون عبور داده شد. نسبت قلیابیت یا نسبت ریپلی برای دایجست خروجی در هضم نیمه پیوسته بر طبق رابطه نوردمن محاسبه شد و از تقسیم اسیدهای چرب فرار کل (FOS) به بی‌کربنات کل غیر آلی (TAC) بر طبق رابطه (۴) محاسبه شد (Kim and Kafle, 2010; Drog, 2013).

$$FOS/TAC = \frac{[(B - A) * (\frac{20}{v}) * 1.66 - 0.15] * 500}{A * 250 * (\frac{20}{v})} \quad (\text{رابطه } ۴)$$

1- Total organic carbon  
2- Total kjeldahl nitrogen  
3- Digestate

(Das and Bhattacharyya, 2013). افزایش میزان دو بخش میوه و سبزی در زباله از نقطه نظر تأمین آب زباله در فرآیند هضم بی‌هوازی، افزایش سینتیک فرآیند و کاهش زمان ماند، و بالابردن عملکرد متان آن موثر است (Jiang et al., 2012). از طرف دیگر، این مقدار بیشتر از مقدار بدست آمد در ایتالیا با مجموع ۵۰٪ برای این دو بخش است (Alibardi & Cossu, 2015). اثبات شده است که تفاوت ترکیبات بخش آلی تحقیقات بر زباله، بیشتر به تغییرات کشورها وابسته است تا تفاوت شهر به شهر. تفاوت در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و غذائشناسی زباله در تحقیقات مختلف به نحوه تعریف زباله، اقلیم و هوا، شرایط اقتصادی مردم، فرهنگ مصرف و تغییرات فصلی و نیز سامانه های جمع آوری و پردازش بستگی دارد (Campuzano & González-Martínez, 2016). افزایش نسبت مجموع ضایعات میوه و سبزی در تابستان نسبت به زمستان به دلیل کشت بیشتر در تابستان است. همچنین، در زمستان میزان ضایعات میوه دو برابر ضایعات سبزی بود، اما این نسبت در تابستان بر عکس شد. دلیل آن، کشت بسیار بیشتر سبزیجات در فصل تابستان نسبت به زمستان در ایران و فرهنگ رایج برای مصرف غذاهای حاوی سبزیجات و به تبع آن افزایش درصد آن در OFMSW است.

جدول ۱- اجزاء بخش آلی زباله در کرج بر حسب درصد

جزء آلی	زمستان	تابستان	نمونه سنتر شده
ضایعات میوه	۳۹/۸ (۱۱/۰)	۱۲/۰ (۳/۹)	۲۹/۶
ضایعات سبزیجات	۲۳/۱ (۸/۶)	۵۸/۶ (۶/۰)	۳۶/۳
ضایعات نشاسه دار	۱۰/۱ (۶/۸)	۶/۷ (۳/۰)	۸/۶
ضایعات پروتئین و چربی	۷/۰ (۶/۳)	۴/۲ (۱/۳)	۶/۲
ضایعات سلولزی	۲۰/۱ (۶/۹)	۱۸/۶ (۲/۸)	۱۹/۳

\* مقادیر داخل پرانتز بیانگر انحراف معیار است.

میزان ضایعات سلولوزی در زباله در هر دو فصل بالا بود و مقدار متوسط ۱۹/۳٪ داشت. البته فرض شد مقوا و کاغذهای ضخیم و مجله، از بخش آلی توسط خانوار یا زباله‌گردا یا در سایت های پردازش نهایتاً جدا می‌شود و کاغذهای کوچک و روزنامه در بخش آلی زباله به حساب آمد. علت آن با توجه به مشاهدات حین نمونه برداری، مصرف گرایی بیش از حد دستمال‌های یکبار مصرف، بالا بودن مقدار شیرابه در زباله و به تبع آن جذب توسط این بخش و افزایش سهم آن در OFMSW، ورود دستمال‌های مصرفی توالی و غیره به زباله خانگی و جدا نکردن موثر کاغذ و روزنامه از ضایعات آشپزخانه‌ای در نمونه‌ها بود. میزان

افزار Matlab 2013,a و جعبه ابزار برازش منحنی برای برازش کردن دو مدل غیر خطی مرتبه اول و کمپرتز اصلاح شده استفاده شد. برازندگی مدل و یا همبستگی بین داده‌های تجربی و پیش بینی شده با ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) بیان شد.

## نتایج و بحث

### خصوصیات خوراک

نتایج تعیین اجزای بخش آلی زباله در طی دو فصل زمستان و تابستان در جدول (۱) آورده شده است. دو بخش میوه و سبزی‌ها به طور متوسط در دو فصل، حدود ۶۶٪ از کل OFMSW را به خود اختصاص می‌دهد. از این منظر که بیش از نیمی از اجزاء زباله میوه و سبزیجات است، با نتایج دیگر محققان مطابق داشت (Riber et al., 2009 ; Hanc et al., 2011; Alibardi & Cossu, 2015). Boni و همکاران (۲۰۱۳) میزان مجموع ضایعات میوه و سبزیجات را در زباله سالن های غذاخوری ۸۱ درصد در نظر گرفتند. میزان ضایعات میوه در ترکیب زباله شهری در چین ۲۸٪ و نزدیک به مقدار متوسط زباله ساخته شده در این تحقیق است

میزان ضایعات پروتئین و چربی به طور میانگین ۵/۶ درصد بود که کمترین مقدار از بخش آلی زباله را به خود اختصاص می‌دهد. این مقدار در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه فرایند هضم بی‌هوازی و تولید هیدروژن از بخش آلی زباله با درصد پروتئین ۷٪ (Alibardi & Cossu, 2015) و ۱۱٪ (Fonoll et al., 2016) پائین تر است، زیرا مقدار گوشت و پروتئین و لبنیات مصرفی به درآمد خانوار و قیمت تمام شده محصولات پروتئینی و لبنی در یک کشور و نیز به منابع تولید و توسعه‌یافتگی صنایع مربوطه وابسته است. باید ذکر شود بخشی از این جزء، شامل قسمت‌هایی مانند استخوان گوسفند و پوست تخم مرغ بود.

شیمیایی اجزاء زباله در طی فصول مختلف بررسی نشد، اما اثبات شده است که تغییرات فصلی، سامانه های جمع آوری و قوانین و دستوالعمل های تفکیک زباله در مبداء موجب تغییرات شیمیایی و فیزیکی OFMSW می شود (Hansen et al., 2007). میزان TS برای زباله سنتز شده ۲۰/۴۵٪ بود. میزان TS زباله در سایت های پردازش مکانیکی زباله در ایران مانند تهران بالاتر و حدود ۲۷٪ است (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). این امر به علت خروج شیرابه در طی جمع آوری و حمل و نقل و تبخیر تدریجی آن می باشد. مقدار TS بخش آلی زباله نزدیک به تحقیقات انجام شده بر زباله خانگی با ۲۱٪ (Forster-Carneiro et al., 2007) یا ضایعات غذایی مدل شده (Capson-Tojo et al., 2017) بود. اما میزان آن نسبت به مقدار متوسط TS برای کشورهای مختلف که Campuzano & González (2016) است، پایین تر بود (۲۷٪/۲۰٪). به طور کلی در صورتی که نمونه OFMSW در یک تحقیق از سایت زباله یا کارخانه کمپوست گرفته شده باشد، درصد رطوبت کمتری نسبت به تحقیقاتی که در آن ضایعات سنتز شده است، دارد. از جمله دلایل دیگر می توان به فرهنگ تفکیک شیرابه از زباله در مبداء اشاره کرد که یک چالش در مدیریت پسماند ایران است. در مشاهدات میدانی، بطری یا شیشه با محتویات آبیگون به وفور مشاهده شد. مقدار VS زباله ۹۱/۳۴٪ بود که نزدیک به تحقیقات مشابه رکورد گیری شده از زباله بود (Hansen et al., 2007; Alibardi & Cossu, 2015; Campuzano & González-Martínez, 2016). میزان کربن، TS و نسبت VS/TS از جمله خصوصیات است که پراکندگی کمتری در تحقیقات دارد (Campuzano & González-Martínez, 2016).

رطوبت این بخش با گذاشتن نمونه ها در آون بیش از ۵۰٪ بدست آمد. میزان درصد ضایعات سلولوزی و کاغذی که به OFMSW نفوذ می کند، در تحقیقات اندکی بررسی شده و غالباً کاغذ به عنوان اجزاء خشک از کل MSW بیان می شود. Nielfa و همکاران (۲۰۱۵) در مدلسازی تولید بیومتان در آزمون BMP، سهم ضایعات کاغذ را ۲۷/۷٪ در نظر گرفتند. در برخی از تحقیقات، میزان ضایعات سلولوزی بر مبنای آنالیز فیبر خام به دست آمده است. بر این اساس برای ۱۱ شهر در سوئد برای زباله جدا شده در مبداء، به طور میانگین ۱۸/۶٪ (بر مبنای وزن خشک) از OFMSW را فیبر خام ناشی از گونی، کیسه های کاغذی و کاغذهای آشپزخانه تشکیل داد. این دسته در تعیین اجزای بخش آلی زباله توسط Alibardi & Cossu (2015) در نظر گرفته نشده است. ضایعات سلولوزی زباله دارای دو بخش کاملاً متضاد است. بخشی از ضایعات مربوط به این طبقه خواص لیگنوسلولوزی شدیدی دارند مانند پوست دانه ها (پوست پسته و گردو) و الیاف مانند پوست ذرت که حاوی لیگنین زیاد است و بدون پیش تیمار متلاشی و هضم نمی شود. اما عمده اجزاء تشکیل دهنده دستمال کاغذی و کاغذ است که هضم پذیری مناسب دارد. به دلیل اجتناب از آسیب دستگاه خرد کن، بخش اول به زباله سنتز شده اضافه نشد. اگرچه می توان کاغذ و مقواهای نازک را از زباله به طور موثرتری جدا کرد، اما جداسازی آن علاوه بر گسترش دستوالعمل های تفکیک در مبداء و تکنولوژی های جداسازی در سایت های پردازش، می تواند بر عملکرد AD در پایین دست به دلیل بالا بودن مقدار آن در زباله در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درصد کل MSW تاثیر گذار باشد (Fonoll et al., 2016).

نتایج تعیین خصوصیات زباله سنتز شده در جدول (۲) ارائه شده است. اگرچه در این تحقیق تغییرات خصوصیات فیزیکی و

جدول ۲- خصوصیات زباله سنتز شده در هضم وعده ای و پیوسته

مشخصه	بخش آلی زباله		ماه تلخیص	
	آزمون وعده ای	آزمون پیوسته	آزمون وعده ای	آزمون پیوسته
TS	۲۰/۴۵	۲۴-۲۹	۷/۹۱	۱۱/۹۸
TS/VS	۹۱/۳۴	۹۰/۰۵	۴۹/۹	۶۵/۲۸
PH	۴/۳	-	۷/۹	۷/۴
TOC (g/kg TS)	۴۱۹/۹(۶/۶)*	۳۸۰/۰۰	-	-
TKN (g/kg TS)	۱۹/۰۰ (۰/۷۰)	۱۷/۳۰	-	-
C/N	۲۲/۱۰ (۰/۵۵)	۲۱/۹۷	-	-

\* مقادیر داخل پرانتز بیانگر انحراف معیار است.

روی OFMSW به ترتیب ۴۶ و ۲/۹٪ و مقدار C/N متناظر آن ۱۶ است (Campuzano & González-Martínez, 2016). میزان نیتروژن کجدال دارای پراکندگی بیشتری در مقالات است که به

نسبت C/N در ترکیب زباله ۲۲/۱۰ به دست آمد که در محدوده مناسب ۲۰-۳۰ برای هضم بی هوازی قرار دارد. مقدار متوسط کربن و نیتروژن بر اساس درصدی از TS در تحقیقات بر



۳۷/۷۵ (Cecchi et al., 1991) و برای مخلوط زباله سنتز شده حاوی کاغذ، مقوا و ضایعات باغی ۳-۳/۷ (Kayhanian and Tchobanoglous, 1993) و برای زباله تفکیک شده با آب ۲/۳ (Dong et al., 2010) به دست آمده است.

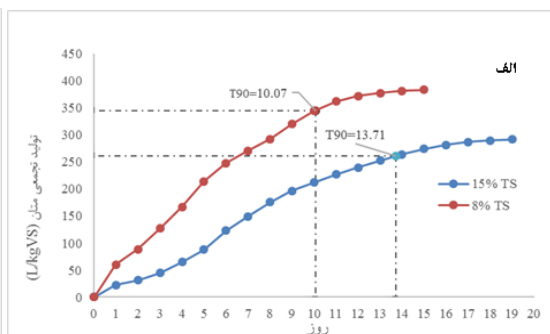
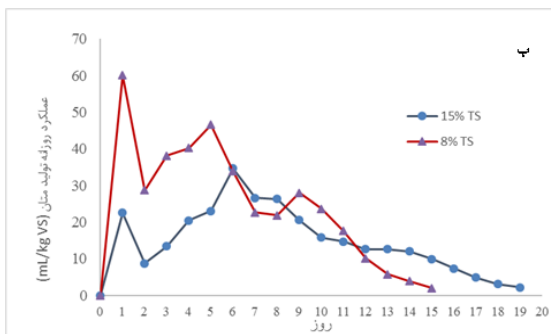
**پتانسیل تولید بیومتان**

نتایج مقدار عملکرد بیومتان، درصد متان و درصد تخریب VS در جدول (۳) آمده است. همچنین میزان عملکرد تجمعی بیومتان (L/kg VS) بر حسب روز و نیز عملکرد روزانه متان به ترتیب در شکل‌های (۳ الف) و (۳ ب) نشان داده شده است.

جدول ۳- شاخص‌های تولید بیومتان، تجزیه پذیری و پایداری فرآیند هضم بی‌هوازی در آزمون وعده‌ای

مشخصه	% TS۸	% TS۱۵
دما (C)	۳۷	۳۷
مقدار بار آلی (g VS/L)	۲۵/۵۱۸	۴۷/۸۴۸
عملکرد بیومتان (L/kg VS)	۳۸۵/۲ (۲۰/۵)	۲۸۹/۸ (۲/۲)
محتوای متان (%)	۶۶/۸ (۱/۰)	۵۸/۸ (۲/۱)
درصد حذف VS	۸۷/۴۹ (۱/۶۸)	۸۴/۷۲ (۲/۶۷)
T 90%	۱۰/۰۷	۱۳/۷۱
pH نهایی	۷/۸	۷/۹
آمونیم نیتروژن (mg/L)	۳۱/۲	۱۷/۵
نسبت قلیائیت	۰/۲۶۴	۰/۳۱۹

\* مقادیر داخل پرانتز بیانگر انحراف معیار است.



شکل ۳- مقدار متوسط عملکرد تجمعی بیومتان (الف) و تولید ویژه روزانه (ب) در دو TS ۸٪ و ۱۵٪

(González-Martínez, 2016). بنابراین مقدار BMP برای زباله در تحقیق حاضر نزدیک به تحقیقات پیشین بود. مقدار پتانسیل بیومتان برای ضایعات جامد شهری مخلوط ناشی از سایت‌های پردازش زباله ۳۴۰ (Fernández-Rodríguez et al., 2014)، برای زباله تفکیک شده در مبداء در دانمارک ۳۰۰ تا ۴۰۰ (Davidsson et al., 2007)، و برای زباله‌های سنتز شده ۱۴۵ (Nielfa et al., 2015)، ۲۱۴/۵ (Abudi et al., 2016) و ۴۹۰ L/kg VS (Alibardi & Cossu, 2015) گزارش شده است. به طور کلی در

تفاوت زباله کشور یا نحوه سنتز زباله بر می‌گردد. افزایش درصد کاغذ و روزنامه در ترکیب OFMSW موجب کاهش درصد نیتروژن و افزایش کربن می‌شود (Hartmann and Ahring, 2006). متفاوت بودن نسبت C/N در OFMSW تحقیقات مختلف به دلیل تفاوت در ترکیب زباله و نوع زباله MSW است (Hartmann and Ahring, 2006; Campuzano & González-Martínez, 2016). مقدار نیتروژن زباله تفکیک در مبدا بیشتر از زباله جدا شده به صورت مکانیکی است، زیرا سهم ضایعات چربی و پرتیینی نسبت به کل زباله کاهش می‌یابد. مقدار نیتروژن برای زباله تفکیک در مبدا ۶/۴٪ و برای زباله پردازش شده مکانیکی

نتایج آزمون تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد درصد TS آزمون وعده‌ای اثر معناداری بر تولید بیومتان (sig.=۰/۰۰۲) و محتوای متان بیوگاز (sig.=۰/۰۰۶) دارد، اما تأثیر معناداری بین دو تیمار ۸٪ و ۱۵٪ TS در تخریب VS مشاهده نشد (۰/۲۰۲ sig.=). مقدار عملکرد بیومتان برای زباله در ۸٪ TS در طی ۱۵ روز ۳۸۵،۲ L/kg VS به دست آمد. میانگین مقدار متوسط جهانی پتانسیل بیومتان از OFMSW در تحقیقات متنوع در کشورهای متفاوت، ۴۱۵ L/kgVS گزارش شده است (Campuzano & González-Martínez, 2016).

است و باید تغییرات فصلی در تولید آنها در نظر گرفته شود (Alibardi & Cossu, 2015).

اگرچه تأثیر غلظت TS راکتور بر تخریب VS معنادار نشد (۰/۲۰۲، sig=)، اما در ۸٪ مقدار بیشتری برابر با ۸۷/۴۹٪ داشت که به دلیل انتقال جرم بهتر میکروارگانیزمها است. ثابت شده با افزایش بار آلی راکتور، کاهش نرخ تجزیه پذیری به دلیل تولید محصولات واسط مانند VFA رخ می‌دهد.

صورتی که سهم ضایعات غذایی (پروتئین‌ها) در ترکیب زباله نسبت به ضایعات باغی و کاغذ و روزنامه بیشتر باشد، BMP بیشتری بدست می‌آید (Nielfa et al., 2015). در تحقیق حاضر عملکرد بیومتان برای مقدار متوسط اجزاء اصلی بخش آلی در دو فصل تابستان و زمستان به دست آمد و این نتایج ممکن است برای زباله در فصل تابستان مقادیر متفاوتی به دلیل وجود میوه و سبزی بیشتر تا ۷۰٪ تغییر کند. نتایج تحقیقات مشابه نشان می‌دهد تغییرات فصلی ترکیب زباله بر تولید هیدروژن بیشتر از متان

جدول ۴ - تجزیه واریانس برای سه متغیر وابسته عملکرد متان، محتوای متان و تخریب VS در دو سطح TS ۸٪ و ۱۵٪

شاخص	درجه آزادی (دو سطح TS)	میانگین مربعات خطا	Sig.
عملکرد متان	۱	۲۱۲/۹۲ *	۰/۰۰۱۷
محتوای متان	۱	۲/۸۰ *	۰/۰۰۵۶
تخریب VS	۱	۴/۹۷ ns	۰/۲۰۲۴

ns معنادار نبودن در سطح ۵٪ خطا است.

\* معناداری در سطح خطای ۵٪ است.

که فعالیت باکتری‌های متان‌زا را متوقف می‌کند. برای زباله تفکیک شده با آب با افزایش TS راکتور از ۱۱ به ۱۶ میزان عملکرد متان از ۳۱۴ به ۲۷۳ و میزان درصد حذف VS از ۴۱/۸ به ۲۶/۱ کاهش یافت (Dong et al., 2010) که با این نتایج مطابقت دارد. به طور کلی، ضایعات غذایی، کودهای دامی و لجن فاضلاب به روش هضم تر به طور کارآمدتری تجزیه می‌شوند، درحالی که بخش آلی زباله مخلوط و ضایعات لیگنوسلولزی را می‌توان به روش هضم خشک هم فرآوری کرد (Kothari et al., 2014). بنابراین به نظر می‌رسد برای اجرای فرآیند با بازده بیشتر در شرایط عملیاتی برای زباله تفکیک شده، مقدار TS در محدوده هضم تر باید انجام شود.

#### مدل‌سازی سینتیک فرآیند در آزمون وعده‌ای

زمان تولید ۹۰ درصد مقدار بیومتان (T90) در جدول (۵) نشان داده شده است. زمان هضم فنی T90 پارامتر مهمی است که اطلاعاتی اولیه در تعیین زمان ماند هیدرولیکی (HRT) برای هضم پیوسته خوراک مورد نظر را تخمین می‌زند (Kafle and Kim, 2013). در TS ۸٪ زمان T90 کمتر از تیمار ۱۵٪ و به ترتیب برابر با ۱۰/۰۷ و ۱۳/۷۱ روز بود. Dong و همکاران (۲۰۱۰) TS کمتر را برای کوتاه کردن زمان هضم بی‌هوازی زباله و افزایش تولید بیومتان از زباله تفکیک شده با آب برتر دانسته‌اند.

در جدول ۵ ضرایب مدل مرتبه اول (FO) و گمپرتز اصلاح شده (MG) در قسمت برازش منحنی نرم افزار MATLAB آورده شده است. نتایج نشان داد مدل گمپرتز اصلاح شده با R<sup>2</sup> بیشتر (با بیشینه مقدار ۰/۹۹۷۱) و RMSE کمتر نسبت به مدل مرتبه

ترکیب متان در ۸٪ و ۱۵٪ TS تفاوت معناداری داشت و در ۸ درصد، مقدار بیشتری نسبت به تیمار مشابه در ۱۵٪ داشت. مقدار متوسط متان بیوگاز برای زباله در حدود ۶۰ درصد است (Hartmann and Ahring, 2006; Matheri et al., 2018). طبق شکل ۲ و ۳، درصد متان در ۲ تا ۳ روز اول به دلیل بالاتر بودن نرخ هیدرولیز کمتر و سپس با افزایش فعالیت متان‌زها، افزایش یافت. Dong و همکاران (۲۰۱۰) در هضم زباله در هاضم وعده ۳۰ لیتری بالارفتن اسیدهای چرب فرار کل در ۴ روز اول برای ۱۶ و ۱۳٪ TS و در روز اول برای ۱۱٪ را مشاهده کردند که باعث بالا بودن درصد CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub> است.

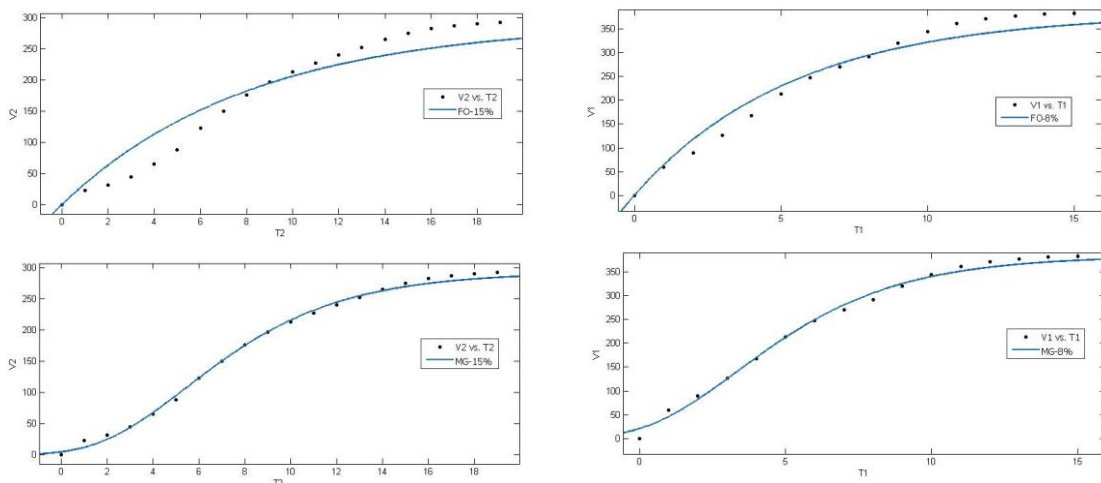
مقادیر نهایی نسبت قلیائیت، pH و آمونیوم در جدول (۳) نشان داده شده است. pH نهایی در انتهای اجرا، به pH مایه تلقیح برگشته است. مقدار آمونیم برای همه تیمارها در حد نرمال و پایدار در محدوده ۱۳ تا ۳۷ mg/l بود (Drosge, 2013). با توجه به جدول (۳) میزان نسبت قلیائیت با افزایش TS افزایش یافته است. اگر چه، نسبت قلیائیت ۰/۴ آستانه پایداری یک هاضم بر مبنای شاخص FOS/TAC تعیین شده است (Scano et al., 2014).

اگرچه هضم خشک زباله دارای مزایایی همچون حجم کوچک‌تر هاضم است، اما عملکرد متان و نرخ تولید متان (l/kg VSfeed.day) با افزایش TS از آستانه تعریف شده در هضم خشک (۱۵-۲۰) کاهش می‌یابد (Xu et al., 2014). در حقیقت، میزان محتوای آب کمتر در راکتور، موجب یک تجمع سریع اسیدهای چرب فرار خصوصاً برای خوراک‌های راحت هضم شونده می‌شود

اول برتری دارد. مقایسه این دو مدل در دو غلظت ۸٪ و ۱۵٪ در شکل (۴) نشان داده شده است. پارامتر  $k$  در مدل مرتبه اول به شیب نمودار تولید تجمعی متان بر می‌گردد که سرعت رشد میکروارگانیسم‌ها را نشان می‌دهد (Nielfa et al., 2015). با افزایش  $k$ ، در حقیقت سرعت تجزیه پذیری خوراک بیشتر می‌شود که برای فرآیند مطلوب است (Zhao et al., 2016). مقدار  $k$  در تیمار ۸٪ بیشتر از تیمار ۱۵٪ و به ترتیب برابر با ۰/۱۸۳ و ۰/۱۲۲ بود. یک ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۵ برای مطلوب بودن یک مدل سینتیک تولید بیومتان مناسب در نظر گرفته می‌شود (Ware and Power, 2013).

جدول ۵- ضرایب مدل مرتبه اول (FO) و گمپرتز اصلاح شده (MG) در تولید بیومتان در آزمون وعده‌ای

تیمار/ پارامتر مدل	$k$	$R_{max}$	$\lambda$	$R^2$ (FO)	RMSE (FO)	$R^2$ (MG)	RMSE (MG)
8% TS	۰/۱۸۳	۴۵/۱۰	۰/۲۲۹	۰/۹۶۶۵	۲۳/۲۶	۰/۹۹۳۵	۱۰/۶۲
15% TS	۰/۱۲۲	۲۸/۲۰	۱/۶۵۴	۰/۹۲۶۰	۲۷/۷۵	۰/۹۹۷۱	۵/۶۸

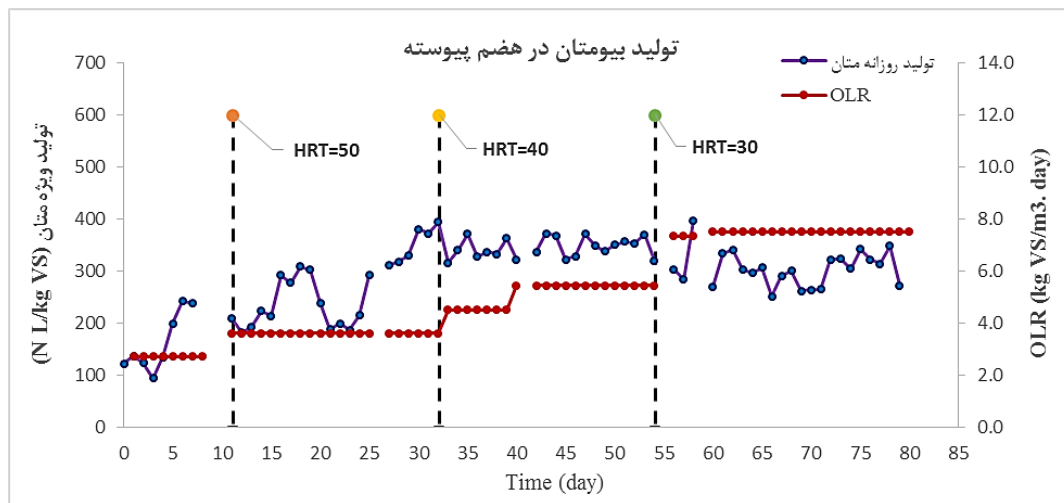


شکل ۴- تولید تجمعی متان در دو مدل مرتبه اول و گمپرتز اصلاح شده در دو TS ۸٪ و ۱۵٪

نتایج آزمایش هضم پیوسته تولید بیومتان برای بخش آلی زباله سنتز شده در شکل (۵) و جدول (۶) ارائه شده است. آزمایش در طی ۸۰ روز و طی سه مرحله تغییر HRT ۵۰، ۴۰ و ۳۰ روز اجرا شد. در دوره اول تغییر TS خوراک ورودی از ۱۵ به ۲۰٪ و در مرحله دوم، تغییر TS از ۲۰ به حدود ۲۵٪ انجام شد و نهایتاً تا آخر آزمایش، راکتور با همین درصد خوراک تغذیه شد. بیشینه مقدار OLR متناظر با HRT ۵۰، ۴۰ و ۳۰ روز به ترتیب برابر با ۳/۶۱، ۵/۴۴ و ۷/۵۲ kg VS/m<sup>3</sup>.day بود. میانگین تولید بیومتان در شرایط استاندارد برای این سه زمان ماند در بیشترین OLR به ترتیب برابر با ۲۶۸، ۳۴۷ و ۳۱۳ L/kg VS بود. بیشترین مقدار SMP در ۴۰ HRT= روز اتفاق افتاد که به مقدار آزمون وعده‌ای

### آزمون پیوسته

(۳۸۵/۲) نزدیک است، اگر چه باید به TS راکتور که در محدوده ۱۰ تا ۱۲٪ بود توجه کرد. بنابراین مقدار SMP با میانگین مقدار BMP در دو غلظت ۸٪ و ۱۵٪ مطابقت دارد. از طرفی باید توجه داشت آزمون وعده‌ای عملکرد متان بالاتری نسبت به آزمایش‌های پیوسته و نیمه پیوسته دارد، چرا که با مقادیر بالاتری از مایه تلقیح اجرا شده و موجب رقیق شدن ترکیبات بازدارنده و سمی می‌گردد (Ortner et al., 2014). مقدار SMP در تحقیق حاضر به نتایج تحقیقات هضم پیوسته زباله اکستروژن شده با مقدار L/kg VS ۳۳۴-۴۳۰ (Mu et al., 2018)، زباله تفکیک شده در مبداء در پایلوت همزن دار L/kg VS ۳۱۴ - ۳۲۷ (Ghanimeh et al., 2012) و زباله تفکیک شده در مبداء در ۱۷ شهر سوئد در مقیاس پایلوت L/kg VS ۲۷۵ - ۴۱۰ (Hansen et al., 2007) نزدیک بود.



شکل ۵- نتایج تولید بیومتان در هضم پیوسته بخش آلی زباله سنتز شده در هضم پیوسته در هاضم CSTR

جدول ۶- نتایج آزمایش هضم پیوسته شامل تولید بیومتان و شاخص‌های پایداری. Error! Not a valid link. تغییرات شاخص‌های پایداری فرآیند شامل pH، اسیدهای چرب فرار کل، قلیائیت کل و نسبت قلیائیت در جدول (۶) آورده شده است. در مرحله اول برای HRT برابر ۵۰ به دلیل فعالیت باردهی اولیه و سرعت بیشتر فعالیت باکتری‌های اسیدزا نسبت به متان‌زا، مقداری نسبت قلیائیت و مقدار کل اسیدهای چرب فرار بالا رفت، اما تدریجاً با اقلیم پذیر شدن میکروارگانیسم‌ها با خوراک جدید این دو شاخص در محدوده پایداری هاضم قرار گرفت. محدوده پایداری برای VFA کل در ۵۱ کارخانه بیوگاز در دامنه ۱۱۰۰ تا ۴۳۰۰ mg/L و نسبت قلیائیت (FOS/TAC) در محدوده ۰/۳ - ۰/۸ گزارش شده است (Drosg, 2013) و در تحقیقات هضم بی‌هوازی تا ۰/۴ تعریف شده است (Scano et al., 2014). به طور کلی مقدار قلیائیت کل باید بیشتر از محدوده ۲۰۰۰-۳۰۰۰ mg/L CaCO<sub>3</sub> باشد تا ظرفیت بافری و تحمل میکرو ارگانیسم‌ها در برابر تغییرات pH و بازدارندگی‌های متعاقب آن وجود داشته باشد (Brambilla et al., 2012).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر اهمیت توجه به ترکیب زباله در تحقیقات هضم بی‌هوازی و تغییرات بخش آلی آن در طی فصول زمستان و تابستان پرداخته شد و اجزاء بخش آلی زباله در کلان‌شهر کرج تعیین شد. اگر چه تعیین اجزاء بخش آلی زباله به طور دقیق نیازمند جامعه آماری وسیع‌تر و رکوردگیری در تمام ماه‌های سال است، اما این تحقیق مقدمه‌ای برای تحقیقات آتی تبدیل زباله شهری به بیوگاز توسط شهرداری‌ها است. نتایج نشان داد ترکیب OFMSW تفاوت زیادی در اجزاء خصوصاً برای بخش ضایعات میوه و سبزی با تغییرات فصلی نشان می‌دهد. نتایج آزمون وعده-ای نشان داد درصد TS آزمون وعده‌ای اثر معناداری بر تولید بیومتان و محتوای متان بیوگاز دارد و در ۸٪ TS نتایج بهتری نسبت به ۱۵٪ TS حاصل شد. مدلسازی سینتیک تولید متان نشان داد مدل گمپرتز اصلاح شده با R<sup>2</sup> بیشتر و RMSE کمتر نسبت به مدل مرتبه اول خصوصاً در TS بالاتر برتری دارد. در آزمون پیوسته، اگرچه در زمان ماند هیدرولیک ۴۰ روز مقدار تولید ویژه متان به مقدار آزمون وعده‌ای نزدیک شد، اما تولید حجمی در HRT=۳۰ دارای بیشترین مقدار بود و علائمی از ناپایداری مشاهده نگردید، بنابراین برای زباله تفکیک شده در مبداء برای ایران زمان ماند ۳۰ روز توصیه می‌گردد.

اگرچه بهترین نتایج بر حسب عملکرد ویژه متان در HRT=۴۰ به دست آمد، اما تولید حجمی در HRT=۳۰ دارای بیشترین مقدار بود (جدول ۶) که بیانگر قابلیت بیشتر تبدیل مواد به بیوگاز است. داشتن OLR بیشتر از اهداف مهم تحقیقات هضم بی‌هوازی است. اگر چه زمان‌های ماند کمتر از ۳۰ روز در این تحقیق بررسی نشد، اما معمولاً زمان ماند هیدرولیک بهینه برای بخش آلی زباله شهری ۳۰ روز در نظر گرفته می‌شود (Mu et al., 2018) تا پایداری فرآیند بدون مخاطرات بازدارندگی انجام

### REFERENCES

Alibardi, L. and Cossu, R. (2015). Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production

potentials. *Waste management*, 36, pp.147-155.

APHA, (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF.

- Washington, D.C.
- Behrooznia, L., Sharifi, M., Alimardani, R., & Mousavi-Avval, S.H. (2018). Sustainability analysis of landfilling and composting-landfilling for municipal solid waste management in the north of Iran. *Journal of cleaner production*, 203, 1028-1038.
- Boni, M.R., Scaffoni, S., Tuccinardi, L. (2013). The influence of slaughterhouse waste on fermentative H<sub>2</sub> production from food waste: preliminary results. *Waste Manage.* 33, 1362–1371.
- Brambilla, M., Araldi, F., Marchesi, M., Bertazzoni, B., Zagni, M., & Navarotto, P. (2012). Monitoring of the startup phase of one continuous anaerobic digester at pilot scale level. *Biomass and bioenergy*, 36, 439-446.
- Campuzano, R. and González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 54, pp.3-12.
- Capson-Tojo, G., Trably, E., Rouez, M., Crest, M., Steyer, J.P., Delgenès, J.P. and Escudíe, R. (2017). Dry anaerobic digestion of food waste and cardboard at different substrate loads, solid contents and co-digestion proportions. *Bioresource technology*, 233, pp.166-175.
- Cecchi, F., Mata-Alvarez, J., Marcomini, A. and Pavan, P. (1991). First order and step-diffusional kinetic models in simulating the mesophilic anaerobic digestion of complex substrates. *Bioresource technology*, 36(3), pp.261-269.
- Das, S. and Bhattacharyya, B.K. (2013). Municipal solid waste characteristics and management in Kolkata, India. In *The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 1399-1409). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Davidsson, Å., Gruberger, C., Christensen, T.H., Hansen, T.L. and la Cour Jansen, J. (2007). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 27(3), pp.406-414.
- Di Maria, F., Sordi, A., & Micale, C. (2012). Energy production from mechanical biological treatment and composting plants exploiting solid anaerobic digestion batch: an Italian case study. *Energy Conversion and Management*, 56, 112-120.
- Dong, L., Zhenhong, Y. and Yongming, S. (2010). Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW). *Bioresource Technology*, 101(8), pp.2722-2728.
- Drosg, B., (2013). Process monitoring in biogas plants. In *IEA Bioenergy Task* (Vol. 37).
- El-Mashad, H.M. and Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource technology*, 101(11), pp.4021-4028.
- Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M. and Romero, L.I. (2016). Semicontinuous temperature-phased anaerobic digestion (TPAD) of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Comparison with single-stage processes. *Chemical Engineering Journal*, 285, pp.409-416.
- Fonoll, X., Astals, S., Dosta, J. and Mata-Alvarez, J. (2016). Impact of paper and cardboard suppression on OFMSW anaerobic digestion. *Waste Management*, 56, pp.100-105.
- Forster-Carneiro, T., Pérez, M., Romero, L.I. and Sales, D. (2007). Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on the inoculum sources. *Bioresource technology*, 98(17), pp.3195-3203.
- Ghanimeh, S., El Fadel, M., & Saikaly, P. (2012). Mixing effect on thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource technology*, 117, 63-71.
- Güelfo, L. F., Álvarez-Gallego, C., Márquez, D. S., & García, L. R. (2011). The effect of different pretreatments on biomethanation kinetics of industrial Organic Fraction of Municipal Solid Wastes (OFMSW). *Chemical engineering journal*, 171(2), 411-417.
- Hanc, A., Novak, P., Dvorak, M., Habart, J., Svehla, P. (2011). Composition and parameters of household bio-waste in four seasons. *Waste Manage.* 31, 1450–1460.
- Hansen, T.L., la Cour Jansen, J., Spliid, H., Davidsson, Å. and Christensen, T.H. (2007). Composition of source-sorted municipal organic waste collected in Danish cities. *Waste Management*, 27(4), pp.510-518.
- Hartmann, H. and Ahring, B.K. (2006). Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. *Water science and technology*, 53(8), pp.7-22.
- Jiang, Y., Heaven, S. and Banks, C.J. (2012). Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. *Renewable energy*, 44, pp.206-214.
- Kafle, G.K. and Kim, S.H. (2013). Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: batch and continuous operation. *Applied Energy*, 103, pp.61-72.
- Kayhanian, M. and Tchobanoglous, G. (1993). Innovative two-stage process for the recovery of energy and compost from the organic fraction of municipal solid waste (MSW). *Water Science and Technology*, 27(2), pp.133-143.
- Kim, S. H., & Kafle, G. K. (2010). Effective treatment of swine manure with Chinese cabbage silage through two serial anaerobic digestion. *Journal of Biosystems Engineering*, 35(1), 53-63.
- Kothari, R., Pandey, A.K., Kumar, S., Tyagi, V.V. and Tyagi, S.K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp.174-195.
- Lin, J., Zuo, J., Gan, L., Li, P., Liu, F., Wang, K., ... & Gan, H. (2011). Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environmental Sciences*, 23(8), 1403-1408.
- Liu, X., Wang, W., Shi, Y., Zheng, L., Gao, X., Qiao, W., Zhou, Y. (2012). Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: effect of organic loading rate. *Waste Manage.* 32, 2056–2060.

- Matheri, A.N., Ndiweni, S.N., Belaid, M., Muzenda, E. and Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, pp.756-764.
- Morris, J., Matthews, H. S., & Morawski, C. (2013). Review and meta-analysis of 82 studies on end-of-life management methods for source separated organics. *Waste management*, 33(3), 545-551.
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J. and Li, A. (2018). Semi-continuous anaerobic digestion of extruded OFMSW: Process performance and energetics evaluation. *Bioresource technology*, 247, pp.103-115.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Berrada, A. (2017). Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 154, 602-613.
- Nielfa, A., Cano, R., Vinot, M., Fernández, E. and Fdz-Polanco, M.,(2015). Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, pp.180-187.
- Novarino, D. and Zanetti, M.C. (2012). Anaerobic digestion of extruded OFMSW. *Bioresource technology*, 104, pp.44-50.
- Ortner, M., Leitzinger, K., Skupien, S., Bochmann, G., & Fuchs, W. (2014). Efficient anaerobic mono-digestion of N-rich slaughterhouse waste: Influence of ammonia, temperature and trace elements. *Bioresource technology*, 174, 222-232.
- Pavi, S., Kramer, L.E., Gomes, L.P. and Miranda, L.A.S. (2017). Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource technology*, 228, pp.362-367.
- Riber, C., Petersen, C., Christensen, T.H. (2009). Chemical composition of material fractions in Danish household waste. *Waste Manage.* 29, 1251–1257.
- Salehiyoun, A.R., Di Maria, F., Sharifi, M., Norouzi, O., Zilouei, H., & Aghbashlo, M. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and slaughterhouse waste in existing wastewater digesters. *Renewable Energy*, 145, 2503-2509.
- Salehiyoun, A.R., Sharifi, M., Di Maria, F., Zilouei, H., & Aghbashlo, M. (2019). Effect of substituting organic fraction of municipal solid waste with fruit and vegetable wastes on anaerobic digestion. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(6), 1321-1331.
- Scano, E.A., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V. and Cocco, D. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*, 77, pp.22-30.
- VDI, V.D.I. (2006). 4630: Fermentation of organic materials, characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. *Verein Deutscher Ingenieure (VDI), editor. VDI Handbuch Energietechnik. Berlin: Beuth Verlag GmbH*, pp.44-59.
- Ware, A. and Power, N. (2017). Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, 104, pp.50-59.
- Wellinger, A., Murphy, J.D. and Baxter, D. eds. (2013). *The biogas handbook: science, production and applications*. Elsevier.
- Xu, F., Wang, Z.W., Tang, L. and Li, Y. (2014). A mass diffusion-based interpretation of the effect of total solids content on solid-state anaerobic digestion of cellulosic biomass. *Bioresource technology*, 167, pp.178-185.
- Zhao, C., Yan, H., Liu, Y., Huang, Y., Zhang, R., Chen, C. and Liu, G. (2016). Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. *Waste Management*, 52, pp.295-301.