

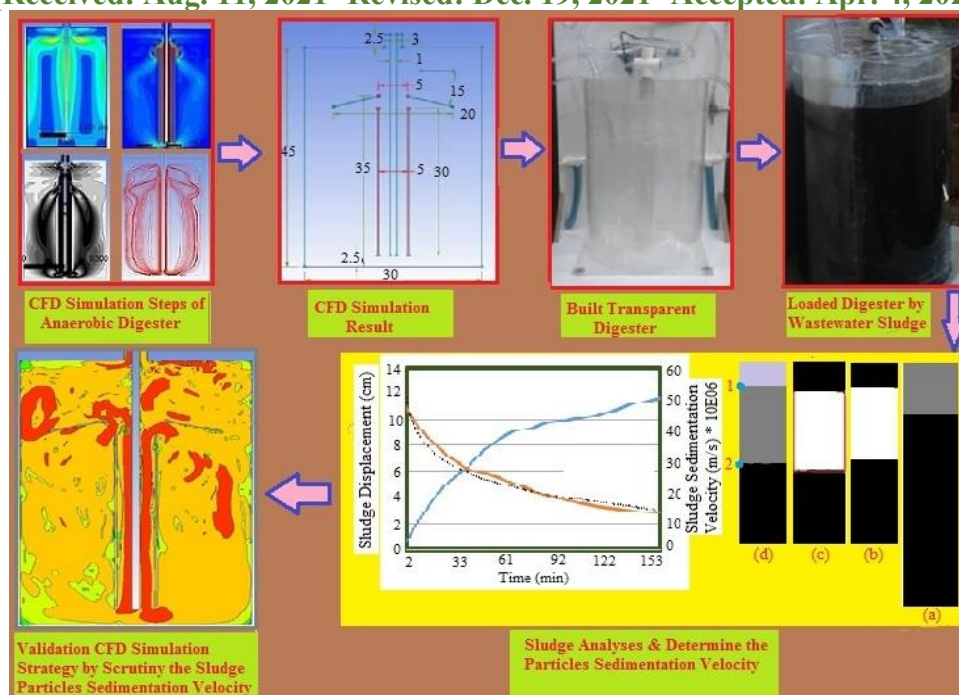
## Step-by-step Simulation of Gas-lift Anaerobic Digester of Municipal Wastewater Sludge

Davood Baveli Bahmaei<sup>۱</sup>, Yahya Ajabshirchi<sup>۱</sup>, Shamsollah Abdollah poor<sup>\*۱</sup>, Saman Abdanan Mehdizadeh<sup>۲</sup>

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Department, University of Tabriz, Tabriz, East Azarbaijan, Iran.

2. Department of Mechanics of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran.

(Received: Aug. 11, 2021- Revised: Dec. 19, 2021- Accepted: Apr. 4, 2022)



**Abstract:** The purpose of this study was to present a strategy for designing and simulating an anaerobic digester for the digestion of raw municipal sewage sludge, based on the flow patterns within the digester, and to investigate the sediment deposition conditions in this anaerobic digester. For this purpose, the simulations were performed based on a step-by-step strategy. First, the inlet gas velocity to the digester was determined, then in the next steps, the draft tube and the conical hanging baffle were added to the digester design, respectively, and simulations were performed with them and determined their characteristics. Simulations were performed for a pilot-scale cylindrical digester. A transparent cylindrical digester was built based on the computational fluid dynamics (CFD) simulations results. Sludge analysis was performed, and determine the sludge sedimentation velocity using the image processing process, so the sludge particle size and each percentage of them based on the total solids (TS) of sludge was performed. According to the results, only in a small area of the floor attached to the digester wall, the velocity of the fluid is less than the sedimentation velocity of the largest particles in the sludge ( $4.71 \times 10^{-5} \text{ m / s}$ ) so there was a sedimentation possibility of a small amount of these particles in this area, which confirmed the success of digester design based on step-by-step simulation and flow patterns for mixing in a gas-lift anaerobic digester and showed a step-by-step simulation strategy is suitable and can be used to simulate gas-lift anaerobic digesters successfully.

**Keywords:** Raw Sludge Analysis, Hanging Baffle, Image Processing, Computational Fluid Dynamics (CFD), Draft Tube

## شبیه‌سازی گام به گام هاضم بی‌هوازی لجن فاضلاب شهری با هم‌زنی نوماتیکی

داود باولی بهمنی<sup>۱</sup>، یحیی عجب شیرچی<sup>۱</sup>، شمس اله عبدالله پور<sup>۲\*</sup>، سامان آبدانان مهدی زاده<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان

شرقی، ایران.

۲. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستائی،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۹/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱/۱۵)

چکیده: هدف از این پژوهش ارائه‌ی یک استراتژی برای طراحی و شبیه‌سازی یک هاضم بی‌هوازی برای هضم لجن خام فاضلاب شهری بر اساس الگوهای جریان درون هاضم و بررسی شرایط رسوب لجن در این هاضم بی‌هوازی بود. به این منظور، شبیه‌سازی‌ها بر اساس یک استراتژی گام به گام انجام شد. ابتدا سرعت گاز ورودی به هاضم بیوگاز تعیین شد و در مراحل بعد، به ترتیب لوله‌ی گاز بالابر و بافل آویزان مخروط ناقص شکل به طراحی هاضم اضافه شده و شبیه‌سازی‌ها انجام و مشخصات آنها تعیین شد. شبیه‌سازی برای یک هاضم استوانه‌ای در مقیاس پایلوت انجام شد. یک هاضم استوانه‌ای شفاف بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ساخته شد. آنالیز لجن و تعیین سرعت رسوب لجن با استفاده از فرآیند پردازش تصویر و تعیین اندازه ذرات لجن و درصد هر یک از آنها بر اساس جامدات کل (TS) لجن انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده تنها در ناحیه‌ی کوچکی از کف چسبیده به دیواره‌ی هاضم سرعت سیال کمتر از سرعت رسوب بزرگترین ذرات موجود در لجن ( $10^{-5} \times 4/71$  متر بر ثانیه) است و امکان رسوب بخش بسیار کمی از این دسته از ذرات در این ناحیه وجود داشته، که موفق بودن طراحی هاضم بر اساس شبیه‌سازی گام به گام و الگوهای جریان برای هم‌زنی در هاضم‌های بی‌هوازی گاز بالابر را تأیید کرده و نشان داد روند شبیه‌سازی گام به گام روشی مناسب بوده و می‌تواند برای شبیه‌سازی هاضم‌های بی‌هوازی بیوگاز با هم‌زنی نوماتیکی با موفقیت استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز لجن خام، بافل آویزان، پردازش تصویر، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، لوله‌ی گاز بالابر

## مقدمه

روش متداول برای فرآوری فاضلاب شهری، استفاده از حوضچه‌های هوادهی بوده که با رسوب لجن خام همراه است. لجن خام دارای پتانسیل بازیابی به صورت کود سالم‌سازی شده و بازیافت انرژی (بیوگاز) به کمک فرآیند هضم بی‌هوازی است. فرآیند هضم بی‌هوازی می‌تواند به منظور کنترل بوی نامطلوب (از طریق پایدار کردن پسماندها) و کاهش بخشی از هزینه‌های فرآوری (از طریق تولید گرما یا توان الکتریکی) استفاده شود (Zhang *et al.*, 1997). عملکرد هاضم‌های بی‌هوازی تحت تاثیر سطح تماس بین بستر و باکتری‌های بی‌هوازی بوده و میزان این تماس به شدت تحت تاثیر هم‌زنی در هاضم‌ها است (Karim *et al.*, 2005).

هم‌زنی کامل مواد درون هاضم به توزیع یکنواخت ارگانیسم‌ها و یکنواختی انتقال حرارت درون هاضم کمک می‌کند. بنابراین هم‌زنی کامل در هاضم‌های بی‌هوازی با نرخ تغذیه بالا ضروری است (Sawyer & Grumbling, 1960; Meynell, 1976). هم‌زنی به روش‌های مکانیکی، هیدرولیکی و نوماتیکی انجام می‌شود. هم‌زنی نوماتیکی نسبت به هم‌زنی هیدرولیکی کارا تر است در حالی که در مقابل هم‌زنی مکانیکی کارایی کمتری دارد (Wu, 2010). هم‌زن‌های مکانیکی از نظر توان الکتریکی مصرفی به ازای هر گالن مواد هم‌زده شده دارای کارایی بیشتری هستند (Brade & Noone, 1981). اگر چه، Bergamo *et al.* (2020) و Temnikov (2021) هم‌زنی نوماتیکی را از نظر عملکرد هم‌زنی بر هم‌زنی مکانیکی ترجیح دادند. سیستم‌های با هم‌زنی نوماتیکی یا هیدرولیکی که فاقد قطعات متحرک در قسمت داخلی هاضم هستند، نسبت به سیستم‌های با هم‌زنی مکانیکی از قابلیت اطمینان کاری بالاتری برخوردار هستند (Casey, 1986). هم‌زنی نوماتیکی برای زمانی که چرخش سیال در حد متوسط نیاز است مناسب است. فیزیک هم‌زنی نوماتیکی یکی از پیچیده‌ترین مسائل در دینامیک سیالات است، از این

جهت که شامل تلاطم و رئولوژی غیرنیوتنی و نیز اثر متقابل فازی است، با این وجود به نظر می‌رسد شکل طراحی نسبتاً ساده‌تری نسبت به هم‌زنی مکانیکی دارد که قطعات متحرک بیشتر و اجزاء پیچیده دیگری دارد (Wu, 2010).

سیستم‌های هم‌زنی نوماتیکی در هاضم‌ها ممکن است محدود شده (confined) یا محدود نشده (unconfined) باشد. در سیستم‌های محدود نشده بیوگاز در بالای هاضم جمع شده، فشرده شده و سپس از طریق پخش کننده‌های کف هاضم یا لانس‌های نصب شده در سقف تخلیه می‌شود و در سیستم‌های محدود شده از طریق لوله‌ها منتشر می‌شود (Mc Farland, 2001). هاضم‌های با هم‌زنی نوماتیکی یا همان هاضم‌های گاز-بالابر (gas-lift) بسیار متداول بوده و مطالعات بسیاری در خصوص موفقیت آنها در مقالات مختلف گزارش شده است (Morgan & Neuspiel, 1958; Kontandt & Roediger, 1977; Lee *et al.*, 1995; Reinhold & Markl, 1997; Karim *et al.*, 2005; Borole *et al.*, 2006; Wu, 2010; Wu, 2014). الگوی جریان در هاضم‌های با هم‌زنی نوماتیکی، تحت تاثیر پارامترهای زیادی از جمله نرخ بازچرخش بیوگاز، فاصله‌ی لوله‌ی گاز بالابر (draft tube) تا کف هاضم، نسبت قطر لوله‌ی گاز بالابر به قطر هاضم، شیب کف هاضم، موقعیت تزریق کننده بیوگاز و طرح آن، نرخ جامدات بارگذاری شده و بسیاری فاکتورهای دیگر است (Karim *et al.*, 2005).

مطالعات تجربی این پارامترها نیازمند امکانات فنی پرهزینه بوده و اغلب با روش‌های عددی بر پایه مدل‌سازی تکمیل می‌شوند. مدل‌های عمومی در حال حاضر جای خود را به شبیه‌سازی شرایط محیطی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) داده‌اند (Teitel *et al.*, 2002). با پیشرفت کامپیوترها در دهه‌های اخیر، بسیاری از محققان برای پیش‌بینی میدان‌های جریان و بهبود عملکرد هم‌زنی در هاضم‌های بی‌هوازی به CFD روی

محدود CFD اوپلر-لاگرانژ (EL) برای شبیه‌سازی هم‌زنی نوماتیکی لجن برای هضم بی‌هوازی را توسعه داده و توصیف کردند. آنها هم‌زنی نوماتیکی نامحدود در هضم بی‌هوازی (هاضم ۴ لیتری مقیاس آزمایشگاهی به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) را بوسیله مدل اوپلر-لاگرانژ با حل معادلات ناوراستوکس مدل‌سازی کردند. از شش شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت اما ساختار مشابه برای این شبیه‌سازی‌ها استفاده شد (کمترین تعداد سلول ۷۷۹۹۲ و بیشترین تعداد سلول ۲۳۴۷۸۷).  
Chen *et al.* (2019) جریان دو فازی در یک هاضم

بی‌هوازی را شبیه‌سازی کرده و رفتار هیدرودینامیکی سیال از جمله میدان سرعت، ویسکوزیته دینامیکی و نوع هم‌زنی بهینه را درون هاضم‌های با هم‌زنی مکانیکی و هم‌زنی نوماتیکی مورد بررسی قرار دادند. افزایش بیش از حد سرعت گاز ورودی باعث پیچیدگی ساختارهای گردابه‌ای و افزایش نقاط با سرعت بالا در هاضم شد و برای رفع این معایب و یکنواخت کردن هم‌زنی، پیشنهاد بهینه‌سازی ساختار هاضم داده شد.

در برخی مقالات مطالعات هیدرودینامیکی در هاضم‌های گاز-بالابر با نسبت‌های قطر لوله‌ی گاز بالابر به قطر هاضم (۰/۲ تا ۰/۸۳) انجام شده است (Pironti *et al.*, 1999; Kojima *et al.*, 1995). در یک ستون حبابی کود آبکی با قطر ۱۴/۴ سانتی‌متر گزارش شده است که در نسبت قطر لوله‌ی گاز بالابر به قطر هاضم ۰/۲ بالاروی گاز به میزان قابل ملاحظه‌ای از نسبت‌های ۰/۴ و ۰/۵ بیشتر است (Kojima *et al.*, 1999). اگر چه نتایج Vesikar & Al-Dahhan (2016) نشان داد نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۵ باعث چرخش بهتر سیال درون هاضم و زمان کمتر چرخش سیال خواهد شد و افزایش سرعت گاز ورودی منجر به افزایش سرعت سیال می‌شود ولی در کاهش فضای راکد درون هاضم تأثیری نداشته و افزایش نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم باعث کاهش سرعت سیال

آورده‌اند (Hoffmann *et al.*, 2008; Terashima *et al.*, 2009).

Wu (2010) جریان چند فازی اوپلری (دو فازی گاز و سیال غیرنیوتنی) برای بررسی دوازده مدل تلاطم و تأثیر درصد جامدات کل (TS) سیال و سه روش هم‌زنی در هاضم‌های بی‌هوازی را با استفاده از مدل CFD سه بعدی، ضمنی، ناپایدار شبیه‌سازی کرد. برای بررسی تأثیر مدل‌ها و جامدات کل مختلف، نتایج با داده‌های Karim *et al.* (2004) مقایسه شد و برای مقایسه‌ی سیستم‌های هم‌زنی از یک هاضم با حجم کاری ۷۹۱/۲۸ (قطر ۱۲ و ارتفاع ۶/۷ متر) استفاده شد. برای شبکه‌بندی از مش hexahedral با سه تعداد مختلف سلول (۵۲۸۳۶، ۱۰۶۶۰۰ و ۱۶۲۲۰۰) استفاده شد. یک مدل جریان چند فازی اوپلری با مدل انتقال تنش برشی (SST k-w) (Shear Stress Transport) با تصحیح رینولدز-پائین (Low-Reynolds corrections) به عنوان مدل تلاطم مناسب برای حل هم‌زنی نوماتیکی و جریان دو فازی غیرنیوتنی در هاضم‌ها پیشنهاد شد.

Wu (2014) برای تعیین مشخصه‌های هم‌زنی نوماتیکی در هاضم‌های بی‌هوازی یک مدل CFD سه بعدی، ضمنی، ناپایدار بر پایه‌ی فشار را مورد بررسی قرار داد. میدان‌های جریان برای هر طرح با حل یک مدل چند فازی اوپلری (دو فازی گاز-مایع) با حل معادلات پیوستگی برای جرم و ممنتوم برای یک شبکه‌بندی با تعداد سلول مش ۲۸۹۷۲۲ بدست آمد. فرض شد که فاز مایع یک سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (power-law) است. مدل تلاطم مخلوط SST k-w و مدل Schiller-Naumann drag برای اثر متقابل فازی استفاده شد. یک توصیف کیفی از حرکت سیال در اثر تولید حباب‌های گاز و تعیین کمی میدان‌های جریان فاز مایع برای مقایسه هم‌زنی در هاضم مقیاس کامل (قطر ۱۲ و ارتفاع ۶/۷ متر) ساخته شد.

Dapelo *et al.* (2015) یک مدل دو فازی حجم

درون لوله‌ی گاز بالا بر می‌شود.

Karim *et al.* (2007) اثر شکل هاضم گاز-بالا بر (gas-lift) روی اثربخشی هم‌زنی را بررسی کردند. برای مطالعه شکل کف و یک بافل (baffle) آویزان روی هم‌زنی در یک هاضم گاز-بالا بر (قطر ۲۰/۳ و ارتفاع ۲۹/۵ سانتی‌متر) که با لجن غیرنیوتنی پر شده بود از شبیه‌سازی دو بعدی یک جریان تک فازی (میدان جریان خارج از لوله گاز بالا بر) به کمک CFD استفاده شد. معادلات ناویراستوکس و پیوستگی (انتقال جرم و ممنتوم) به صورت عددی با استفاده از حل کننده تجاری معمول بر اساس روش المان محدود حل شدند. سه اندازه مش ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ میلی‌متر برای شبکه‌بندی استفاده شد که کوچکترین سایز مش (۰/۵ میلی‌متر) در درجه آزادی ۱۴۵۴۱۳۳ نتیجه داد. برای بررسی میدان جریان خارج از لوله گاز بالا بر از مش با حداکثر اندازه المان ۱ میلی‌متر استفاده شد. نتایج بدست آمده از این شبیه‌سازی تطابق خوبی با یافته‌های تجربی Karim *et al.* (2004) داشت. معرفی یک بافل آویزان در ترکیب با یک کف قیفی ۴۵ درجه موجب کاهش مناطق با هم‌زنی ضعیف با یک ضریب ۳ در مقایسه با یک کف بدون بافل شده است. Jegede *et al.* (2020) یک هاضم بیوگاز چینی از نوع دام (dome) را در دو حالت معمولی و بهینه شده (نصب بافل) شبیه‌سازی کردند. هاضم بهینه‌سازی شده با بافل‌ها داری ویژگی‌های هیدرولیکی و هم‌زنی بهتر و پایدارتر بود.

بازچرخش بیوگاز در داخل هاضم باعث اسیدی شدن محیط هاضم می‌شود و اثرات زیادی بر روی باکتری‌ها می‌گذارد، که در حین هم‌زنی نوماتیکی باید کنترل شود. این امر می‌تواند ناشی از افزایش غلظت منوکسید کربن (CO) در هاضم‌های با هم‌زنی نوماتیکی باشد. Mahmoodi-Eshkaftaki & Ebrahimi (2019) در ارزیابی یک استراتژی جدید و توسعه یک هم‌زن جدید برای بهبود فعالیت‌های میکروبی هضم بی‌هوازی و تولید بیوگاز تمیزتر، افزایش CO در هم‌زنی نوماتیکی

را گزارش کرده‌اند. Lin & Chein (2008) علت مقدار بالای CO در هاضم‌های با هم‌زنی نوماتیکی را چرخش به عقب (recirculation back) تولید بیوگاز در هاضم دانسته‌اند. Mahmoodi-Eshkaftaki & Ebrahimi (2019) افزایش مقدار CO در بیوگاز در هم‌زنی نوماتیکی در مقایسه با هم‌زنی مکانیکی را با استفاده‌ی ترکیبی از هم‌زنی نوماتیکی و ترکیب بهینه‌ی مواد جبران کردند.

پژوهش اخیر یک استراتژی گام به گام برای شبیه‌سازی و طراحی هاضم بی‌هوازی گاز-بالا بر برای هضم لجن فاضلاب شهری ارائه کرده و تاثیر برخی پارامترهای موثر روی کیفیت هم‌زنی در هاضم بی‌هوازی گاز-بالا بر را مورد بررسی قرار داده است. این پارامترها شامل سرعت بیوگاز ورودی به هاضم، قطر و ارتفاع لوله گاز بالا بر، قطر خارجی مانع آویزان (hanging baffle) مخروط ناقص شکل، فاصله از کف هاضم و زاویه افقی آن است. شبیه‌سازی‌ها در فضای نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۹ با هدف حداقل‌سازی فضاهای راکد درون هاضم برای یک هاضم استوانه‌ای در مقیاس پایلوت انجام شده و یک هاضم استوانه‌ای شفاف بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های CFD به منظور پردازش تصویر ساخته شد. آنالیز لجن انجام شد و سرعت رسوب لجن با استفاده از فرآیند پردازش تصویر و اندازه ذرات لجن و درصد هر یک از آنها بر اساس جامدات کل (TS) لجن تعیین شد.

## مواد و روش‌ها

### شبیه‌سازی CFD

نرم افزار انسیس فلونت ۱۹ برای انجام شبیه‌سازی‌ها و ایجاد یک هندسه‌ی دو بعدی در محیط دیزاین مدلر (design modeler)، تولید شبکه و حل جریان دو فازی مدل اوپلری استفاده شد. مدل دو بعدی می‌تواند برای مدل‌سازی هاضم‌هایی که دارای ساختار با تقارن محوری هستند استفاده شود (Yang *et al.*, 2015). شبیه‌سازی‌ها به صورت دو بعدی، تحت شرایط ناپایدار

که  $p$  فشار استاتیکی به اشتراک گذاشته شده توسط همه‌ی فازها،  $\bar{\tau}_q$  تنش-فشار (stress-strain tensor) فاز  $q$ ،  $\vec{g}$  نیروی گرانش،  $\vec{R}_{pq}$  نیروی اثر متقابل بین فازها،  $\vec{v}_{pq}$  و  $\vec{v}_{qp}$  سرعت‌های بین فازی،  $\vec{F}_q$  نیروی جسم خارجی،  $\vec{F}_{lift.q}$  نیروی بالابرنده،  $\vec{F}_{wl.q}$  نیروی لغزشی دیواره،  $\vec{F}_{vm.q}$  نیروی مجازی (virtual mass force) و  $\vec{F}_{td.q}$  نیروی انتشار تلاطم است.

#### استراتژی شبیه‌سازی

یک استراتژی گام به گام برای انجام شبیه‌سازی‌ها دنبال شد. گام اول: انتخاب سرعت گاز ورودی به هاضم از بین سرعت‌های اولیه مختلف. گام دوم: انتخاب قطر لوله‌ی گاز بالابر از بین قطرهای اولیه مختلف، طول لوله‌ی گاز بالابر در این مرحله ثابت است. گام سوم: انتخاب طول لوله‌ی گاز بالابر از بین طول‌های اولیه مختلف، قطر لوله‌ی گاز بالابر در این گام معادل قطر به دست آمده در گام دوم است. گام چهارم: انتخاب قطر بیرونی مانع آویزان مخروط ناقص شکل، فاصله‌ی مانع آویزان از کف هاضم و زاویه افقی آن در این گام ثابت است. گام پنجم: انتخاب فاصله از کف هاضم و زاویه افقی برای مانع آویزان مخروط ناقص شکل، قطر داخلی مانع آویزان معادل قطر لوله‌ی گاز بالابر است. قطر بیرونی مانع آویزان در این گام ثابت بوده و معادل مقدار بدست آمده برای آن در گام چهارم است.

#### خصوصیات بیوگاز

با توجه به قانون دالتون (Dalton's law) (Dutton, 1961) برای ترکیب گازها، و اینکه بیوگاز ترکیبی از ۷۰ درصد گاز متان و ۳۰ درصد دی اکسید کربن است، بنابراین خصوصیات بیوگاز با توجه به خصوصیات گازهای متان و دی اکسید کربن به ترتیب به نسبت‌های ۰/۷ و ۰/۳ از آنها و در دمای ۳۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

(unsteady-state)، Serial، Double Precision، بر پایه‌ی فشار (Pressure-Based) و ضمنی (Implicit) انجام شد. مدل دو فازی اوپلری مایع-گاز (Viscous-SST k-omega) (لجن به عنوان فاز اولیه و بیوگاز به عنوان فاز ثانویه) با تصحیح رینولدز-پائین (low-Re Correction) استفاده شد. در هر گام زمانی تکرار محاسبات تا همگرایی حل وقتی مقدار همه‌ی باقیمانده‌ها کمتر از  $1 \times 10^{-6}$  شوند در نظر گرفته شد. همگرایی نهایی زمانی حاصل شد که متوسط سرعت برای فاز مایع بدون تغییر باقی ماند (Wu, 2014). از Max Face Size: و Size Function: Curative و 0.0007 و تعداد گره‌ها (Nodes) ۲۶۷۰۸۳ و تعداد المان‌های (Elements) ۲۶۴۲۸۱ برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. برای تخمین خطای گسسته‌سازی و عدم وابستگی حل به اندازه‌ی شبکه از روش پیشنهادی Celik et al. (2008) استفاده شد.

#### مدل چند فازی

مدل جریان چند فازی اوپلری، مدل انتقال تنش برشی (SST)  $k-\omega$  با تصحیح رینولدز-پائین برای حل هم‌زمانی نوماتیکی در هاضم بی‌هوازی استفاده شد. مدل به صورت تئوری شامل معادلات بقاء جرم و ممنتوم به شرح زیر است (ANSYS- Fluent Inc, 2008):

(رابطه ۱)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q$$

که پانویس  $q$  مشخص کننده فاز  $q$ ،  $t$  زمان،  $\alpha_q$  بخش حجمی فاز  $q$ ،  $\rho_q$  دانسیته فاز  $q$ ،  $\vec{v}_q$  سرعت فاز  $q$ ،  $n$  تعداد فازها،  $\dot{m}_{pq}$  انتقال جرم از فاز  $p$  به فاز  $q$ ،  $\dot{m}_{qp}$  انتقال جرم از فاز  $q$  به فاز  $p$  و  $S_q$  ترم چشمه (source term) است.

(رابطه ۲)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp})) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift.q} + \vec{F}_{wl.q} + \vec{F}_{vm.q} + \vec{F}_{td.q})$$

## آنالیز لجن

### سرعت رسوب ذرات لجن

نمونه‌گیری از لجن به گونه‌ای انجام شد که نمونه‌ی تهیه‌ی شده نماینده‌ی مناسبی از کل لجن خام ارسالی به هاضم‌های بی‌هوازی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب باشد. جامدات کل (TS) و دانسیته لجن بر اساس روش‌های متداول آزمایشگاهی تعیین شد. اندازه ذرات لجن خام با استفاده از سری الک‌ها تعیین شد و درصد هر یک از اندازه ذرات لجن بر اساس درصد جامدات کل لجن تعیین شد. سرعت رسوب هر یک از اندازه ذرات لجن با استفاده از قانون استوک (stock's law) به صورت رابطه (۳) تعیین شد:

$$v_s = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_w)d_p}{3C_D\rho_w}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که  $v_s$  سرعت رسوب ذرات لجن (m/s)،  $g$  شتاب گرانش ( $m/s^2$ )،  $\rho_w$  دانسیته آب ( $kg/m^3$ )،  $\rho_p$  دانسیته ذرات ( $kg/m^3$ )،  $d_p$  قطر ذرات (m) و  $C_D$  ضریب کشش هست که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$C_D = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34 \quad (\text{رابطه ۴})$$

که  $N_R$  عدد رینولدز است و به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$N_R = \frac{v_s d_p \rho_w}{\mu} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که  $\mu$  ویسکوزیته مایع ( $kg/m.s$ ) است.

لجن قبل از ورود به هاضم آزمایشی برای یکنواختی بیشتر از یک الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سرعت رسوب لجن با استفاده از روش پردازش تصویر تعیین شد.

### خصوصیات رئولوژیکی لجن

در مطالعات انجام گرفته که درصد جامدات کل لجن فاضلاب بالاتر از ۵ درصد بوده است این ماده به عنوان یک سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (power-law) در نظر گرفته شده است (Dapelo et al., 2015; Wu, 2010; Karim et al., 2007; Karim et al., 2004; Wu, 2014). وارد کردن خصوصیات سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (power-law) در انسیس فلونت با استفاده

از دستور متنی "define/ models/ viscous/ turb-non-newtonian" امکان‌پذیر شد. خصوصیات غیرنیوتنی مانند نازک بودن برش (shear thinning)، تنش تسلیم و نواری بودن برش (shear banding)، منجر به پیچیدگی رئولوژیکی لجن می‌شود (Baudez et al., 2011). علاوه بر این، لجن اغلب حاوی شن و ماسه، الیاف سلولزی و بقایای دیگر است و بنابراین می‌تواند در معرض رسوب قرار گیرد. با این حال، ثابت شده است که فرض اولیه‌ی در نظر گرفتن لجن به عنوان یک سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (power-law) رسوب‌ناپذیر در مجموعه‌ی گسترده‌ای از مقالات به خوبی جواب داده است (به عنوان مثال؛ Terashima et al., 2009; Bridgeman, 2012; Wu, 2014). برخلاف سیال نیوتنی، در سیالات غیرنیوتنی با رفتار توانی (power-law) ویسکوزیته ثابت نیست و متناسب با بزرگی نرخ برش ( $|\dot{\gamma}|$ ) است (Dapelo et al., 2015):

$$\mu = k|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که  $k$  ضریب استحکام (consistency) و  $n$  شاخص رفتار توانی (power-law coefficient) ( $Pa \cdot s^n$ ) است. در مورد لجن که یک سیال شبه پلاستیک است،  $n$  کمتر از یک است. بنابراین بزرگی نرخ برش ( $|\dot{\gamma}|$ ) به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$|\dot{\gamma}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

رابطه‌ی (۶) تنها برای یک بازه‌ی ( $|\dot{\gamma}|_{min} \cdot |\dot{\gamma}|_{max}$ ) کاربرد دارد (Wu & Chen, 2008). خارج از این بازه، ویسکوزیته حداکثر یا حداقل مقدار ثابت را می‌گیرد. مقادیر حداقل و حداکثر ویسکوزیته برای اجتناب از مقادیر منفرد برای ویسکوزیته در طول اجرای نرم‌افزار و همچنین اجتناب از تکرارهای غیرضروری لازم هستند و معنی فیزیکی ندارند. مقادیر ویسکوزیته حداکثر و حداقل به نحوی تعیین شدند که به محض رسیدن به شرایط ثابت در بازه‌ی ( $|\dot{\gamma}|_{min} \cdot |\dot{\gamma}|_{max}$ ) قرار داشته باشند.

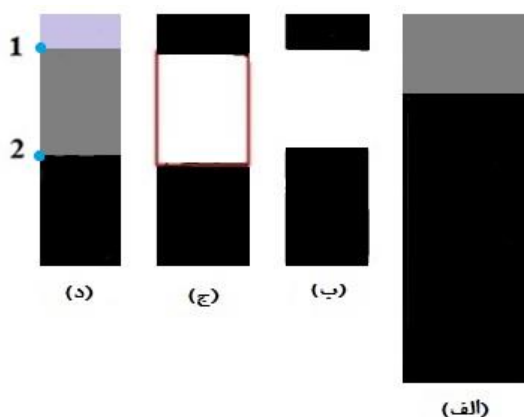
عکس برداری از یک دوربین سونی ۱۴/۱ مگاپیکسل استفاده شد. فاصله بین عکس‌ها ۲ دقیقه بوده و در کل ۸۲ عکس گرفته شد.

#### آنالیز تصویر

برای بهبود کنتراست (contrast) تصویر و حذف نویزها، عملیات‌های فیلتر میانه و حذف لبه‌ها انجام شد. پس از آن عکس‌ها از فضای رنگی RGB به فضای رنگی Lab منتقل شدند و با استفاده از رابطه‌ی (۹) به عکس‌های دو دویی (binary) تبدیل شدند (شکل ۱ (ب)).

$$I = \begin{cases} 10 \cdot 069 < L < 66 \cdot 228 \\ -4 \cdot 460 < a < 3 \cdot 502 \\ -2 \cdot 127 < b < 15 \cdot 230 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۹})$$

برای تعیین مقدار رسوب لجن، نویز در تصاویر ایجاد مشکل کرد. بنابراین با استفاده از عملگر منطقه-باز (area-opening operator -)، نواحی کمتر از ۵۰۰ پیکسل مربع حذف شدند (شکل ۱ (ج)). بعد از این، الگوریتم جستجو از نقطه بالا سمت چپ (نقطه ۱ در شکل ۱ (د)) انجام شد و تا رسیدن به اولین مورد در تصویر باینری ادامه یافت. سپس از نقطه پائین سمت چپ شروع به جستجو کرد تا یک نقطه دیگر پیدا کند. در نهایت فاصله بین این دو نقطه (نقطه‌ی آبی در شکل ۱ (د)) به عنوان مقدار رسوب لجن تعیین شد.



شکل ۱- مراحل پردازش تصویر برای تعیین سرعت رسوب لجن؛ (الف): تصویر اولیه از استوانه محتوی لجن، (ب) و (ج): تصاویر باینری؛ (د): تصویر برای الگوریتم جستجو

Figure 1- Image processing steps to determine the sludge sedimentation velocity; (a): the initial image of the cylinder containing the sludge, (b) and (c): binary images; (d): image for the search algorithm

نرخ برش  $\dot{\gamma}$  در قالب مشتقات میدان سرعت اوپلری  $u$  تعریف می‌شود:

$$\dot{\gamma}_{ij} = \partial_i u_j + \partial_j u_i. \quad (\text{رابطه ۸})$$

هنگام اجرای شبیه‌سازی، مقدار  $\mu$  از رابطه‌ی (۸)، رابطه‌ی (۷) با در نظر گرفتن محدودیت‌های توضیح داده شده برای  $|\dot{\gamma}|$  در بالا، و رابطه‌ی (۶) برای هر نقطه‌ی  $r$  و زمان  $t$  ارزیابی می‌شود. میدان  $\mu(r, t)$  بدست آمده به عنوان یک ورودی برای محاسبه‌ی میدان سرعت استفاده می‌شود (Dapelo et al., 2015).

Achkari-Begdouri & Goodrich (1992) خصوصیات رئولوژیکی برای لجن در دمای ۳۵ درجه سلسیوس را ارائه داده‌اند و برخی از محققان (Wu & Chen, 2008; Wu, 2010; Wu, 2014; Dapelo et al., 2015) از این خصوصیات رئولوژیکی ارائه شده، جهت استفاده در مقالات خود برای خصوصیات رئولوژیکی لجن با جامدات کل مختلف استفاده کرده‌اند.

#### آنالیز لجن

##### نمونه برداری لجن و عکس برداری

نمونه لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب غرب اهواز (چنیبه) تهیه شد. در این تصفیه‌خانه لجن به صورت روزانه از کف حوضچه‌های رسوب، ساعت ۸ صبح به مدت نیم ساعت، به سمت هاضم‌های بی‌هوازی بیوگاز پمپاژ می‌شود. نمونه‌ی لجن تهیه شده بعد از ۱۵ دقیقه پمپاژ لجن گرفته شده است. در آزمایش سرعت رسوب لجن، پدیده‌ی بالا آمدن لجن بعد از ۳ ساعت مشاهده شد. توده‌ی رسوب کرده‌ی لجن در کف استوانه‌ی شیشه‌ای، به یک‌باره شناور شده و تا سطح مایع بالا آمد. در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب علت این پدیده را دنیتریفیکاسیون (کاهش یون‌های نیتريت یا نترات و تولید گاز نیتروژن) یا فاسد شدن و نیز طولانی شدن زمان ماند در کف مخزن می‌دانند. عکس برداری از رسوب لجن تا قبل از پدیده‌ی بالا آمدن آن صورت گرفت. نمونه لجن در استوانه شفاف ریخته شد. سپس هم‌زنی انجام گرفت تا لجن کاملاً یکنواخت و همگن شد. برای



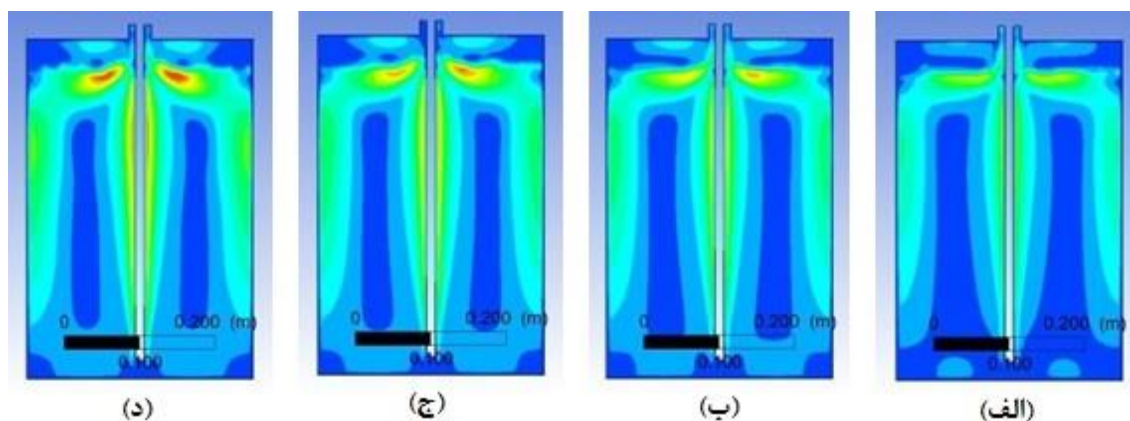
## نتایج و بحث

### سرعت بیوگاز ورودی به هاضم

شبیه سازی با استفاده از یک هاضم استوانه ای شفاف با قطر ۳۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی متر انجام شد. شبیه سازی الگوی همزنی درون هاضم با چهار سرعت گاز ورودی به هاضم (۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۱۰ متر بر ثانیه) انجام شد. لوله ی ورود گاز به هاضم (به قطر ۱ سانتی متر) از بالا به هاضم وارد شده و تا فاصله ی ۲/۵ سانتی متری از کف هاضم امتداد داشت. کانتورهای سرعت برای سرعت های مختلف گاز ورودی در شکل (۲) نشان داده شده اند. بررسی کانتورهای سرعت نشان داد افزایش سرعت گاز ورودی از ۰/۰۳ به ۰/۰۵ منجر به بهتر شدن الگوی همزنی و کاهش فضاهای راکد در گوشه های پائین هاضم شد. بررسی کانتورهای سرعت نشان داد که افزایش سرعت گاز ورودی به هاضم از ۰/۰۵ به ۰/۰۷ و ۰/۱۰ منجر به افزایش شدت همزنی در هاضم شده ولی

الگوی همزنی را بهبود نمی دهد بلکه منجر به آشفستگی سیال می شود. (Vesikar & Al-Dahhan (2016) نیز در بررسی الگوی جریان و پروفایل سرعت سیال در یک هاضم بی هوازی گاز بالابر در مقیاس آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که افزایش سرعت گاز ورودی منجر به افزایش سرعت سیال می شود ولی در کاهش فضاهای راکد درون هاضم تاثیری ندارد. (Chen *et al.* (2019) نیز در بررسی رفتار میدان سرعت سیال درون هاضم های با همزنی نوماتیکی به این نتیجه رسیدند که افزایش بیش از حد سرعت گاز ورودی باعث پیچیدگی ساختارهای گردابه ای و افزایش نقاط با سرعت بالا در هاضم شده و پیشنهاد کردند برای برطرف کردن این معایب و یکنواخت کردن همزنی، اقدام به بهینه سازی ساختار هاضم شود.

بنابراین سرعت گاز ورودی به هاضم برای ادامه ی روند شبیه سازی و تعیین خصوصیات لوله ی گاز بالابر در مراحل بعد ۰/۰۵ متر بر ثانیه انتخاب شد.



شکل ۲- کانتورهای سرعت برای سرعت های مختلف گاز ورودی به هاضم؛ (الف): سرعت ۰/۰۳، (ب): سرعت ۰/۰۵، (ج): سرعت ۰/۰۷، (د): سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه  
Figure 2- Velocity contours for different inlet gas velocities into digester; (a): velocity of 0.03 m/s, (b): velocity of 0.05 m/s, (c): velocity of 0.07 m/s, (d): velocity of 0.1 m/s

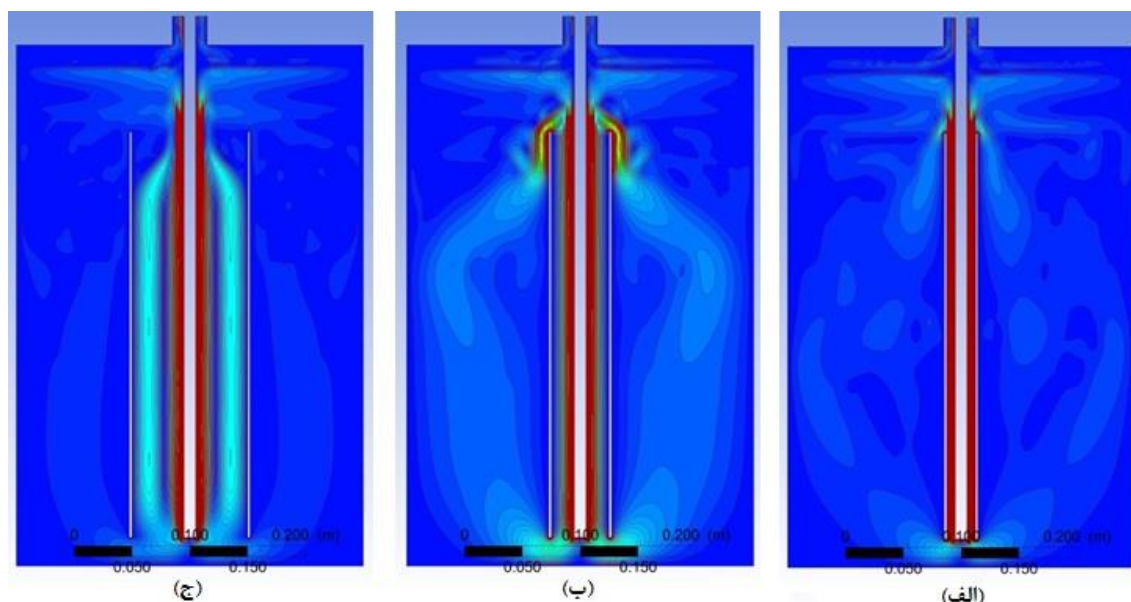
### خصوصیات لوله ی گاز بالابر

در این بخش از شبیه سازی ها، تاثیر لوله ی گاز بالابر، که لوله ی گاز ورودی در محور مرکزی آن قرار گرفته، روی الگوی همزنی و کاهش فضاهای راکد درون هاضم مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی الگوی همزنی درون هاضم برای سه قطر مختلف لوله ی گاز بالابر (۲/۵، ۵/۰

و ۱۰/۰ سانتی متر) انجام شد. فاصله ی لبه ی پائین لوله ی گاز بالابر از کف هاضم در همه ی شبیه سازی ها ۲/۵ سانتی متر است. کانتورهای سرعت بدست آمده از شبیه سازی الگوی همزنی درون هاضم با لوله ی گاز بالابر با قطرهای مختلف در شکل (۳) نشان داده شد. بررسی کانتورهای سرعت نشان داد که استفاده از لوله ی گاز

ورودی، سطح مقطع لوله‌ی گاز بالابر به عنوان سطح مقطع جریان افزایش می‌یابد که منجر به کاهش سرعت سیال می‌شود (Lenstinsky et al., 2012; Kojima et al., 1999; Merchuk & Gluz, 1999). نتایج بررسی‌های انجام شده توسط Vesikar & Al-Dahhan (2016) بر روی الگوی جریان و پروفایل سرعت سیال در یک هاضم بی‌هوازی گاز بالابر در مقیاس آزمایشگاهی نیز نشان داد که افزایش نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم باعث کاهش سرعت سیال درون لوله‌ی گاز بالابر می‌شود. بنابراین مناسب‌ترین قطر برای لوله‌ی گاز بالابر برای ایجاد هم‌زنی بهینه در هاضم و ورود به مرحله‌ی بعد شبیه‌سازی، انتخاب لوله‌ی گاز بالابر با قطر ۵ سانتی‌متر (نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۲) بود. (Kojima et al. و Karim et al. (2004). (1999) نیز در نتایج خود نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۲ را به عنوان نسبت بهینه عنوان کردند.

بالابر با قطر ۲/۵ سانتی‌متر (نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۱) منجر به شکل‌گیری الگوی جریان نامنظم درون هاضم می‌شود. افزایش قطر لوله‌ی گاز بالابر به ۵ سانتی‌متر (نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۲) منجر به شکل‌گیری جریان منظم‌تر و نیز شکل‌گیری جریان محوری رو به بالای قوی سیال در لوله‌ی گاز بالابر می‌شود. افزایش قطر لوله‌ی گاز بالابر به ۱۰ سانتی‌متر (نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۳) منجر به کاهش سرعت محوری رو به بالای سیال درون لوله‌ی گاز بالابر و ایجاد جریان کوتاه چرخشی (circulation short-circuiting) در لوله‌ی گاز بالابر شده که حرکت پائین به بالای سیال در لوله‌ی گاز بالابر و در نهایت هم‌زنی مناسب در هاضم را مختل کرده و فضاهای راکد در هاضم را بیشتر می‌کند. بر اساس اصل برنولی، کاهش سرعت محوری سیال درون لوله‌ی گاز بالابر با افزایش قطر آن قابل انتظار است چون با ثابت بودن میزان جریان گاز



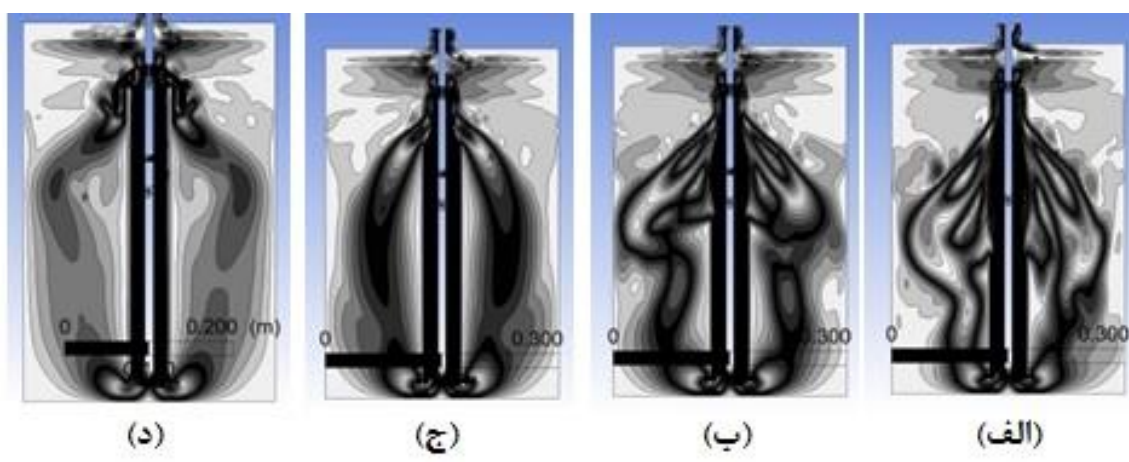
شکل ۳- کانتورهای سرعت برای قطرهای مختلف لوله‌ی گاز بالابر با طول ۳۵ سانتی‌متر؛ (الف): قطر ۲/۵، (ب): قطر ۵، (ج): قطر ۱۰ سانتی‌متر  
Figure 3- Velocity contours for draft tube with a length of 35 cm and different diameters; (a): diameter of 2.5 cm, (b): diameter of 5 cm, (c): diameter of 10 cm

گاز بالابر تاثیری در کاهش فضاهای راکد نزدیک به دیواره‌ی هاضم ندارد. از سوی دیگر، بررسی کانتورهای

بررسی الگوی‌های جریان ناشی از افزودن لوله‌ی گاز بالابر به ساختمان هاضم نشان داد که افزودن لوله‌ی

لوله گاز بالابر به قطر هاضم به ترتیب معادل ۰/۵ و ۰/۷) در شکل (۴) نشان دهنده بی‌قاعدگی و آشفتگی جریان وسط هاضم بی‌هوازی است. علاوه بر این، تغییرات در کانتورهای سرعت در این بخش نشان دهنده شکل‌گیری جریان‌های گردابه‌ای در این فضا از هاضم است. نتایج بررسی کانتورهای سرعت نشان داد که لوله‌های گاز بالابر با طول‌های ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر (نسبت طول لوله گاز بالابر به قطر هاضم به ترتیب معادل ۱/۰ و ۱/۲) الگوهای جریان یکنواخت‌تر و منظم‌تری نسبت به لوله‌های گاز بالابر با قطرهای ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ایجاد کردند.

سرعت مربوط به لوله‌ی گاز بالابر با قطر ۵ سانتی‌متر نشان داد که جریان سیال بلافاصله در لبه‌ی بالائی لوله‌ی گاز بالابر به سمت پائین می‌شکند و منجر به ایجاد جریان شدید در نزدیک لبه‌ی بالائی لوله‌ی گاز بالابر و عدم حرکت جریان به سمت دیواره‌ی هاضم می‌شود. بنابراین در ادامه‌ی روند شبیه‌سازی‌ها، تاثیر طول لوله‌ی گاز بالابر (۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر) روی الگوهای جریان درون هاضم بررسی شد. کانتورهای سرعت ناشی از تاثیر طول‌های مختلف لوله‌ی گاز بالابر روی الگوی جریان درون هاضم در شکل (۴) نشان داده شد. بررسی الگوهای جریان ناشی از افزودن لوله‌ی گاز بالابر با طول‌های ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر (نسبت طول



شکل ۴- کانتورهای سرعت برای طول‌های مختلف لوله‌ی گاز بالابر با قطر ۵ سانتی‌متر؛ (الف): طول ۱۵، (ب): طول ۲۰، (ج): طول ۳۰، (د): طول ۳۵ سانتی‌متر  
 Figure 4- Velocity contours for draft tube with a diameter of 5 cm and different lengths; (a): length of 15 cm, (b): length of 20 cm, (c): length of 30 cm, (d): length of 35 cm

در ادامه‌ی روند شبیه‌سازی برای کاهش فضاهای راکد نزدیک دیواره، مانع آویزان مخروط ناقص شکل به طراحی هاضم اضافه شد. علاوه بر یکنواختی بهتر الگوی هم‌زنی در لوله‌ی گاز بالابر با طول ۳۰ سانتی‌متر، برابری این طول با قطر هاضم این فرضیه را ایجاد می‌کند که در هاضم‌های بی‌هوازی با هم‌زنی نوماتیکی و دارای لوله‌ی گاز بالابر، طول مناسب لوله‌ی گاز بالابر برای هم‌زنی بهینه در هاضم معادل قطر هاضم است.

مانع آویزان مخروط ناقص شکل

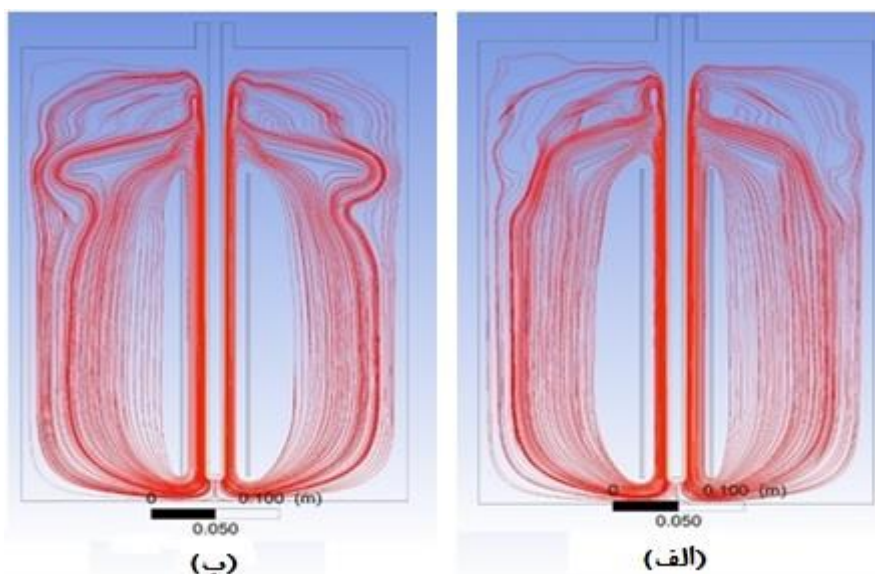
در این بخش، یک مانع آویزان به طراحی هاضم اضافه

مقایسه‌ی الگوهای جریان ناشی از لوله‌های گاز بالابر با طول‌های ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر نشان داد که لوله‌ی گاز بالابر با طول ۳۰ سانتی‌متر (نسبت طول لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۱) الگوی جریان منظم‌تر و یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند و فضاهای راکد کمتری داشته و جریان رو به پائین قوی‌تری در قسمت میانی هاضم ایجاد می‌کند، اگر چه برای هر دو الگو فضاهای راکد در بالا و پائین هاضم در نزدیکی دیواره همچنان وجود دارد. بنابراین، لوله‌ی گاز بالابر با طول ۳۰ سانتی‌متر برای ادامه‌ی روند شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد.

معادل ۰/۲۵ و ۰/۲۰ قطر هاضم) در نظر گرفته شد. مبنای انتخاب زاویه‌ی افقی هدایت جریان سیال تحت شیب‌های مختلف به سمت دیواره است. فاصله‌ی عمودی لبه‌های بافل آویزان به ترتیب ۹/۳ و ۵/۴ سانتی‌متر برای زوایای ۲۵ و ۱۵ درجه بوده که معادل ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵۰ عمق سیال درون هاضم است.

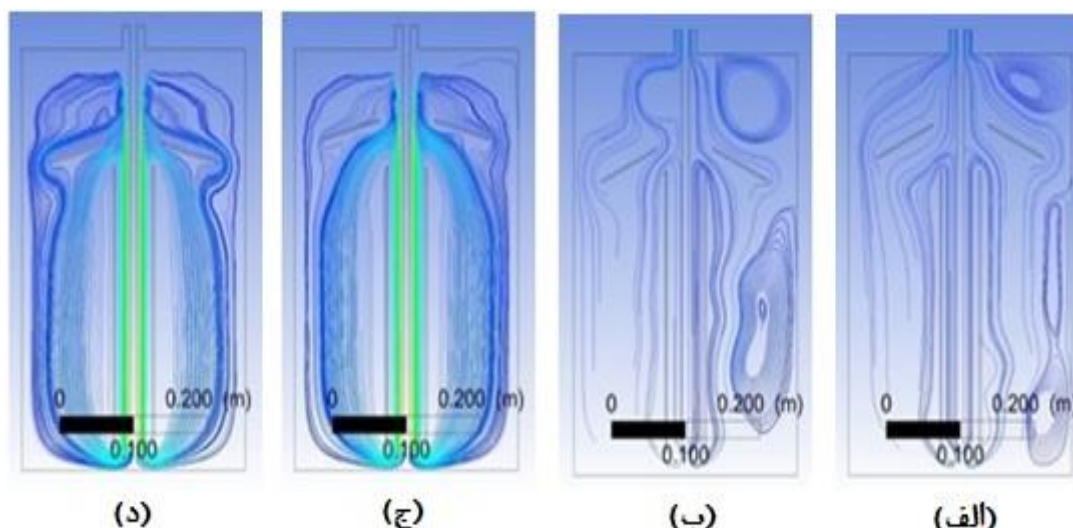
در ابتدا، اثر قطرهای بیرونی مانع آویزان بر الگوی جریان درون هاضم مورد بررسی قرار گرفت. قطر درونی مانع آویزان معادل قطر لوله‌ی گاز بالا بر (۵ سانتی‌متر) است. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵) نشان داده شد. بررسی خطوط جریان ناشی از قطرهای بیرونی نشان داد که قطر بزرگتر (۲۰ سانتی‌متر) در مقایسه با قطر کوچکتر (۱۵ سانتی‌متر) قابلیت بهتری برای هدایت جریان پرسرعت به سمت دیواره‌ها و ایجاد جریان و یکنواخت و کاهش فضاهای راکد در بالای هاضم و نزدیک به دیواره را دارد.

شد تا انتقال بخشی از جریان پر سرعت سیال به سمت دیواره‌های هاضم محقق شود. الگوی هم‌زنی درون هاضم برای دو موقعیت مختلف مانع آویزان در هاضم (فاصله‌های لبه‌ی بالائی مانع آویزان ۳۵/۰ و ۳۷/۵ سانتی‌متر از کف هاضم)، و هم‌مرکز با لوله‌ی گاز بالا بر شبیه‌سازی شد. مبنای انتخاب از یک سو، بر اساس کانتورهای سرعت سیال و جریان رو به پائین سیال از بالای لوله‌ی گاز بالا بر و ادامه‌ی جریان رو به بالای سیال به سوی سطح بوده و از سوی دیگر بر این اساس بوده که مشخص شود شکست بخشی از جریان رو به پائین به سمت دیواره‌های هاضم الگوی جریان بهتری ایجاد می‌کند یا اینکه هدایت جریان رو به بالا و تلاطم ایجاد شده در سطح سیال به سمت دیواره باعث ایجاد الگوی بهتر جریان خواهد شد. دو زاویه‌ی افقی مختلف برای مانع آویزان مخروط ناقص شکل (۱۵ و ۲۵ درجه) و دو قطر خارجی مختلف ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر (فاصله لبه‌ی بافل تا دیواره‌ی هاضم به ترتیب ۷/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر و



شکل ۵- خطوط جریان برای مانع آویزان مخروط ناقص شکل با قطرهای بیرونی مختلف و فاصله ۳۵ سانتی‌متر از کف هاضم و زاویه افقی ۱۵ درجه؛ (الف): قطر بیرونی ۱۵ سانتی‌متر، (ب): قطر بیرونی ۲۰ سانتی‌متر

Figure 5- streamlines of fluid for conical hanging baffle with different outer diameter, distance from digester bottom of 35 cm and horizontal degree of 15; (a) outer diameter of 15 cm, (b) outer diameter of 20 cm  
زاویه‌های افقی مختلف آن شبیه‌سازی شده و تاثیر هر یک از آنها بر الگوی جریان و فضاهای راکد درون هاضم بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در شکل (۶) نشان داده شد. نتایج نشان داد بهترین هم‌زنی درون هاضم، با مانع آویزان با فاصله‌ی ۳۵ سانتی‌متر از کف و زاویه افقی ۱۵ درجه حاصل شد که در شکل (۶) نشان داده شد.



شکل ۶- خطوط جریان سیال برای مانع آویزان مخروط ناقص شکل با قطر بیرونی ۲۰ سانتی متر و فاصله از کف هاضم و زاویه افقی مختلف: (الف): فاصله از کف هاضم ۳۷/۵ سانتی متر و زاویه افقی ۲۵ درجه، (ب): فاصله از کف هاضم ۳۵ سانتی متر و زاویه افقی ۲۵ درجه، (ج): فاصله از کف هاضم ۳۷/۵ سانتی متر و زاویه افقی ۱۵ درجه، (د): فاصله از کف هاضم ۳۵ سانتی متر و زاویه افقی ۱۵ درجه

Figure 6- Streamlines of fluid for conical hanging baffle with outer diameter of 20 cm and different distance from digester bottom and different horizontal degrees; (a): distance from digester bottom of 37.5 cm and horizontal degree of 25, (b): distance from digester bottom of 35 cm and horizontal degree of 25, (c): distance from digester bottom of 37.5 cm and horizontal degree of 15, (d): distance from digester bottom of 35 cm and horizontal degree of 15

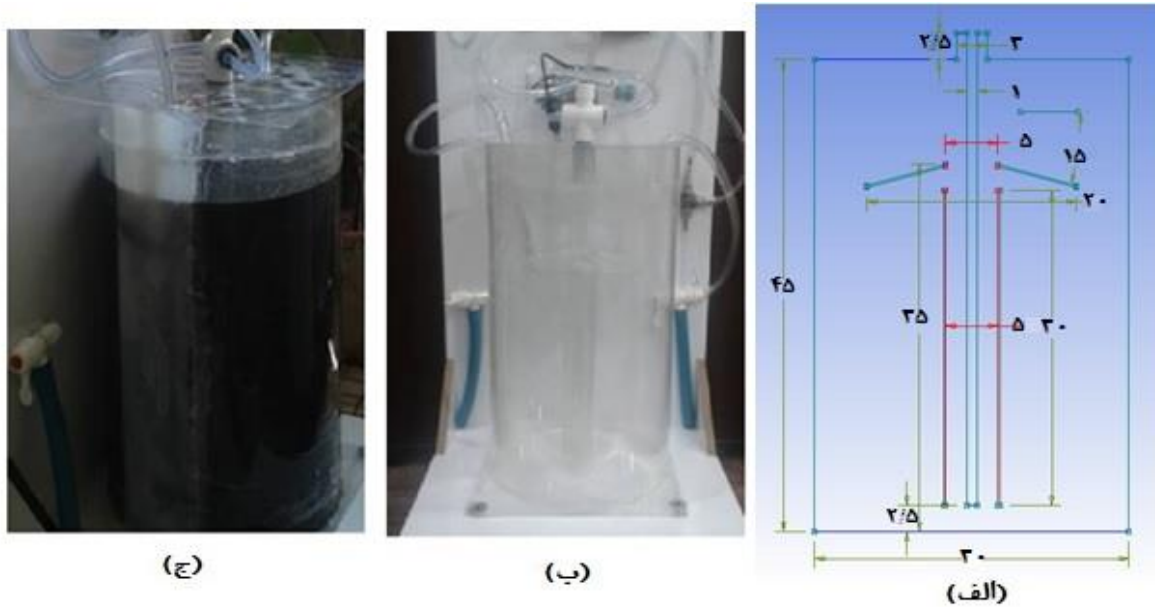
#### هندسه ی هاضم بی هوازی

یک هاضم استوانه ای شفاف در مقیاس پایلوت از جنس پلی متیل متاکریلات (Poly methyl methacrylate) با ضخامت ۱/۵ میلی متر بر اساس طراحی به دست آمده از نتایج شبیه سازی های CFD ساخته شد. قطر هاضم ۳۰ سانتی متر و ارتفاع آن ۴۵ سانتی متر (نسبت ارتفاع به قطر معادل ۱/۵) است. ورود گاز به هاضم برای هم زنی از طریق یک لوله شیشه ای به قطر ۱ سانتی متر است که از مرکز سقف به هاضم وارد شده و تا فاصله ی ۲/۵ سانتی متری از کف امتداد دارد. قطر لوله ی گاز بالابر معادل ۰/۲ قطر هاضم (۵ سانتی متر) است و لوله ی ورود گاز در محور مرکزی آن قرار دارد. لبه ی پائین لوله ی گاز بالابر تا کف هاضم ۲/۵ سانتی متر فاصله دارد. ارتفاع لوله ی گاز بالابر معادل قطر هاضم (۳۰ سانتی متر) است. مانع آویزان مخروط ناقص شکل در بالای لوله ی گاز بالابر و هم مرکز با آن می باشد و قطر کوچک (داخلی) آن معادل قطر لوله ی گاز بالابر است. فاصله ی مانع آویزان از کف هاضم ۳۵ سانتی متر (فاصله از سطح سیال

۵ سانتی متر و معادل ۰/۱۲۵ ارتفاع سیال درون هاضم) و قطر بزرگ (خارجی) آن ۲۰ سانتی متر (فاصله ی لبه ی بافل تا دیواره ی هاضم ۵ سانتی متر و معادل ۰/۲ قطر هاضم) و زاویه افقی آن ۱۵ درجه است (شکل ۷ (الف)). هاضم شفاف ساخته شد تا صحت سنجی نتایج شبیه سازی CFD با مقایسه ی آنها با نتایج بدست آمده از پردازش تصویر، که لازمه ی آن شفاف بودن هاضم و عکس برداری از بیرون هاضم است، امکان پذیر باشد. هاضم شفاف ساخته شده در شکل ۷ (ب) نشان داده شد.

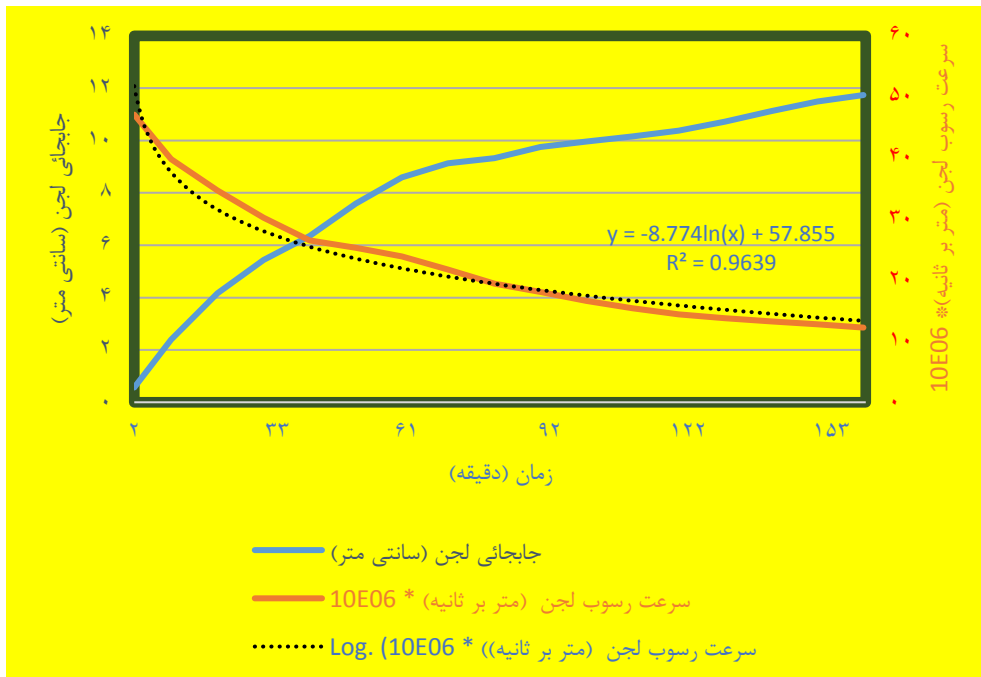
#### آنالیز لجن

نتایج جابجائی لجن و سرعت رسوب لجن متناسب با زمان و نیز خط روند لگاریتمی (logarithmic trend line) و مقدار  $R^2$  در شکل (۸) نشان داده شده اند. با توجه به شکل (۸) حداکثر، متوسط و حداقل سرعت رسوب لجن به ترتیب  $۱۰^{-۶} \times ۴۷/۱$ ،  $۱۰^{-۶} \times ۲۱/۷$  و  $۱۰^{-۶} \times ۱۲/۰$  متر بر ثانیه بود.



شکل ۷- هاضم شبیه‌سازی شده، ساخته شده و بارگیری شده؛ (الف): طرح و مشخصات هاضم شبیه‌سازی شده، (ب): هاضم شفاف ساخته شده، (ج): هاضم بارگیری شده با لجن فاضلاب شهری

Figure 7- Simulated, built, and loaded digester; (a): design and characteristics of the simulated digester, (b): built transparent digester, (c): loaded digester by municipal wastewater sludge



شکل ۸- روند جابجایی (رسوب) ذرات لجن (سانتی‌متر) در گذر زمان (دقیقه) (منحنی با رنگ آبی) و سرعت رسوب ذرات لجن  $\times 10^6$  (متر بر ثانیه) (منحنی با رنگ قرمز)

Figure 8- Sludge particles displacement (sedimentation) process (cm) over time (min) (blue curve) and sludge particles sedimentation velocity  $\times 10^6$  (m/s) (red curve)

موجود در لجن مورد استفاده قرار گرفتند که اندازه سلول هر یک از آنها به ترتیب ۰/۰۷۵، ۰/۱۵، ۰/۲۱۲، ۰/۳، ۰/۸۵ و ۲ میلی‌متر بود. درصد جامدات کل لجن

اندازه ذرات لجن الک‌های با شماره مش‌های (mesh numbers) ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ برای تعیین اندازه ذرات جامد

رابطه (۱۰)  $340 \cdot 34v_s^2 + \frac{30 \cdot 03v_s^{1.5}}{d_p^{0.5}} + \frac{2 \cdot 4024v_s}{d_p} = 26 \cdot 16d_p$  که  $v_s$  سرعت رسوب ذره‌ی لجن (متر بر ثانیه) و  $d_p$  قطر ذره (متر) است. سرعت رسوب برای هر قطر ذره محاسبه شده و نتایج در جدول (۱) نشان داده شد. سرعت رسوب حداکثر  $43 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه بود که مربوط به ذرات بزرگتر (ذرات با قطر نزدیک به ۲ میلی‌متر) است و با سرعت رسوب حداکثر بدست آمده از فرآیند پردازش تصویر ( $47/1 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه) مطابقت خوبی دارد.

(TS) و دانسیته لجن به ترتیب ۷/۵ درصد و  $kg/m^3$  بود. اندازه ذرات جامد در لجن در جدول (۱) نشان داده شد. نتایج نشان داد که ۶۹ درصد از ذرات بزرگتر از ۰/۱۵ میلی‌متر و کوچکتر از ۰/۸۵ میلی‌متر بوده و ۱۷ درصد ذرات بزرگتر از ۰/۸۵ میلی‌متر و ۱۴ درصد ذرات کوچکتر از ۰/۱۵ میلی‌متر هستند. بر اساس قانون استوک (Stock's law) برای رسوب ذرات در سیال رابطه‌ی خلاصه شده بین اندازه ذرات و سرعت رسوب به صورت رابطه‌ی (۱۰) تعریف می‌شود:

جدول ۱- اندازه ذرات لجن، درصد هر دسته از ذرات بر اساس جامدات کل لجن و سرعت رسوب ذرات بر اساس قانون استوک

Table 1- Sludge particles sizes, each size percentage based on sludge TS and sludge particles sedimentation velocity based on stock's law

حداکثر سرعت رسوب ذرات لجن $\times 10^{-6}$ (متر بر ثانیه)	حداقل سرعت رسوب ذرات لجن $\times 10^{-6}$ (متر بر ثانیه)	درصد ذرات بر اساس جامدات کل (TS)	قطر ذرات ( $d_p$ ) در لجن خام (میلی‌متر)
-	۴۳	۱۰	$d_p > 2$
۴۳	۸	۷	$2 \geq d_p > 0.85$
۸	۱	۲۴	$0.85 \geq d_p > 0.3$
۱	۰/۵	۲۸	$0.3 \geq d_p > 0.212$
۰/۵	۰/۲۵	۱۷	$0.212 \geq d_p > 0.15$
۰/۲۵	۰/۰۶۵	۷	$0.15 \geq d_p > 0.075$
۰/۰۶۵	-	۷	$0.075 \geq d_p$

کمترین سرعت در گوشه‌های پائین هاضم است. توجه به جدول (۱) نشان می‌دهد که ۷ درصد از ذرات لجن خام (ذرات با قطر کمتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) دارای سرعت رسوب کمتر از  $43 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه هستند که این سرعت رسوب از حداقل سرعت سیال (۱۰- $10^{-6}$  متر بر ثانیه) کمتر است، به عبارت دیگر، این دسته از ذرات در هیچ منطقه‌ای از هاضم رسوب نمی‌کنند. حدود ۵۲ درصد از ذرات لجن دارای قطر بین ۰/۰۷۵ و ۰/۳ میلی‌متر بوده که سرعت رسوب آنها از  $43 \times 10^{-6}$  تا  $1 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه است که با توجه به کانتور سرعت (شکل ۹)، تنها در ناحیه‌ی بسیار جزئی از کف، چسبیده به دیواره‌ی هاضم سرعت سیال کمتر از  $10^{-6}$  متر بر ثانیه است. بقیه‌ی ذرات لجن (۴۱ درصد) دارای قطر بزرگتر از ۰/۳ میلی‌متر بوده که سرعت رسوب آنها از  $47/1 \times 10^{-6}$  تا  $10^{-6}$  متر بر ثانیه است که

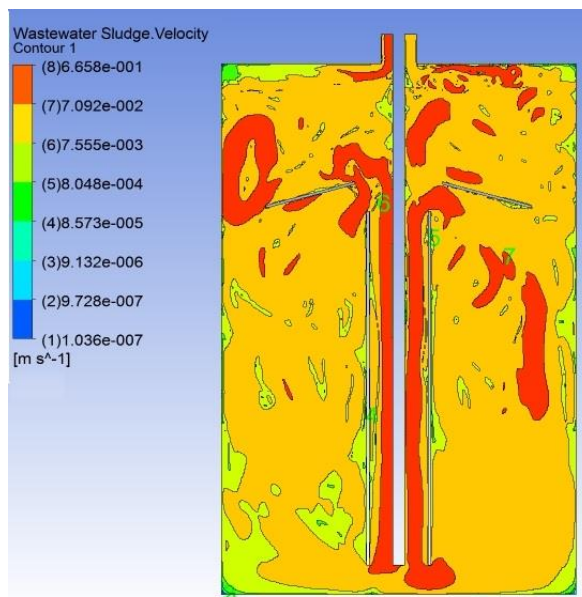
#### بررسی نتایج کانتورهای سرعت

پس از انتخاب سرعت ۰/۰۵ متر بر ثانیه به عنوان مناسب‌ترین سرعت گاز ورودی به هاضم برای شبیه‌سازی و طراحی هاضم بی‌هوازی و ساخت و بارگیری هاضم توسط لجن فاضلاب شهری، پردازش تصویر انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی CFD برای هاضم بی‌هوازی بیوگاز با مشخصات فوق‌الذکر و سرعت گاز ورودی به هاضم معادل ۰/۰۵ متر بر ثانیه برای هم‌زنی سیال درون هاضم (لجن خام فاضلاب شهری)، حداقل، متوسط و حداکثر سرعت لجن درون هاضم به ترتیب  $43 \times 10^{-6}$ ،  $10^{-6}$  و  $43 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه است (شکل ۹). بررسی شکل کانتور لگاریتمی سرعت (شکل ۹) نشان می‌دهد که درون لوله‌ی گاز بالا بر سرعت سیال حداکثر بوده و به سمت دیواره‌ی هاضم از سرعت آن کاسته شده و

دارد. بنابراین باید یک مصالحه‌ای بین افزایش میزان هم‌زنی و رسوب مقداری از ذرات، به منظور تامین شرایط برای اجتناب از مختل شدن فرآیند بیولوژیکی هضم بی‌هوازی برقرار کرد. بر اساس نتایج بدست آمده تنها در ناحیه کوچکی از کف چسبیده به دیواره‌ی هاضم سرعت سیال کمتر از سرعت رسوب بزرگترین ذرات موجود در لجن ( $4/71 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه) است که احتمال رسوب بخش جزئی از این دسته از ذرات در این ناحیه وجود داشته، که موفق بودن طراحی هاضم بر اساس شبیه‌سازی گام به گام و الگوهای جریان برای هم‌زنی در هاضم‌های بی‌هوازی گاز بالابر را تأیید کرده و نشان می‌دهد روند شبیه‌سازی گام به گام روشی مناسب بوده و می‌تواند برای شبیه‌سازی هاضم‌های بی‌هوازی بیوگاز با هم‌زنی نوماتیکی با موفقیت استفاده شود.

توجه به کانتور سرعت (شکل ۹) نشان می‌دهد که ناحیه کوچکی از کف هاضم چسبیده به دیواره‌ی هاضم سرعت سیال کمتر از  $8/6 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه است که احتمال رسوب بخش جزئی از این دسته از ذرات در این ناحیه وجود دارد.

با توجه به اینکه حداکثر سرعت رسوب ذرات لجن درون هاضم  $47/1 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه است بنابراین حداقل سرعت سیال (لجن) درون هاضم باید از این مقدار بیشتر باشد تا رسوب ذرات لجن در هاضم اتفاق نیفتد. با توجه به حداقل سرعت سیال به ازای سرعت گاز ورودی به هاضم، این هدف به طور کامل محقق نخواهد شد. از سوی دیگر، در هاضم‌های بی‌هوازی بیوگاز به علت ماهیت بیولوژیکی فرآیند تولید بیوگاز، برای افزایش سرعت سیال درون هاضم و در نتیجه افزایش سرعت گاز ورودی به هاضم محدودیت وجود



شکل ۹- کانتور سرعت لجن فاضلاب (رنگ لگاریتمی) برای سرعت گاز ورودی به هاضم ۰/۰۵ متر بر ثانیه  
Figure 9- Wastewater sludge velocity contour (logarithmic color) for inlet gas velocity of 0.05 m/s

پارامترها شامل سرعت گاز ورودی به هاضم برای هم‌زنی، قطر و ارتفاع لوله‌ی گاز بالابر و قطر، فاصله از کف و زاویه افقی مانع آویزان مخروط ناقص شکل بود. شبیه‌سازی در فضای دو بعدی نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۹ انجام

## نتیجه‌گیری کلی

تأثیر برخی پارامترهای موثر بر کیفیت هم‌زنی درون هاضم بی‌هوازی بیوگاز به منظور بهینه‌سازی فرآیند هم‌زنی درون هاضم مورد بررسی قرار گرفت. این



و تعیین سرعت رسوب ذرات لجن و درصد هر یک از این دسته از ذرات از جامدات کل لجن، و توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی های CFD و کانتور سرعت نشان داد که تنها در ناحیه ی کوچکی از کف چسبیده به دیواره ی هاضم سرعت سیال کمتر از سرعت رسوب بزرگترین ذرات موجود در لجن ( $10^{-6} \times 4/71$  متر بر ثانیه) است که احتمال رسوب بخش جزئی از این دسته از ذرات در این ناحیه وجود دارد، که موفق بودن طراحی هاضم بر اساس شبیه سازی گام به گام و الگوهای جریان برای همزنی در هاضم های بی هوازی گاز بالابر را تایید می کند.

شد. نتایج بدست آمده از شبیه سازی CFD هاضم استوانه ای گاز بالابر با قطر ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۴۵ سانتی متر (نسبت ارتفاع به قطر هاضم معادل ۱/۵) نشان داد که مناسب ترین همزنی درون هاضم در سرعت گاز ورودی به هاضم معادل ۰/۰۵ متر بر ثانیه انجام می شود. همچنین مشخص شد که برای همزنی بهینه در هاضم نسبت قطر لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۰/۲، نسبت طول لوله گاز بالابر به قطر هاضم معادل ۱، نسبت قطر بیرونی مانع آویزان مخروط ناقص شکل به قطر هاضم معادل ۰/۷ و با فاصله ی ۳۵ سانتی متر از کف هاضم و زاویه افقی ۱۵ درجه انجام می شود. آنالیز لجن

## REFERENCES

- Achkari- Begdouri, A. & Goodrich, P. R. (1992). Rheological properties of dairy cattle manure. *Journal of Bioresource Technology*, 40, 149-156.
- ANSYS-Fluent Inc. (2008). *Fluent 12.0*. ANSYS-Fluent Inc, Lebanon, N.H.
- Baudez, J. C., Markis, F., Eshtiaghi, N. & Slatter, P. (2011). The rheological behavior of anaerobic digested sludge. *Journal of Water Researches*, 45 (17), 5675-5680.
- Bergamo, U., Viccione, G., Coppola, S., Landi, A., Meda, A. & Gualtieri, C. (2020). Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing. *Water Science & Technology*, 81 (7), 1406-1419.
- Borole, A. P., Klasson, K. T., Ridenour, W., Holland, J., Karim, K. & Al-Dahhan, M. H. (2006). Methane production in a 100-L upflow bioreactor by anaerobic digestion of farm waste. *Journal of Applied Biochemistry and Biotechnology*, 131 (1-3), 887-896.
- Brade, C. E. & Noone, G. P. (1981). Anaerobic digestion- need it be expensive. *Journal of Water Pollution Control*, 80, 70-76.
- Bridgeman, J. (2012). Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester. *Journal of Advances in Engineering Software*, 44, 54-62.
- Casey, T. J. (1986) Requirements and methods for mixing in anaerobic digesters. *Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Organic Agricultural Wastes. Elsevier Applied Science Publishers*. 90-103.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130, 078001.
- Chen, J., Chen, A., Shaw, J., Yeh, Ch. & Chen, Sh. (2019). CFD Simulation of Two-Phase Flows in Anaerobic Digester. In: *3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications. Journal of Physics: Conference Series* 1300 012048.
- Dapelo, D., Alberini, F. & Bridgeman, J. (2015). Euler-Lagrange CFD modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion. *Journal of Water Researches*, 85, 497-511.
- Dutton, F. B. (1961). Dalton's law of partial pressures. *Journal of Chemical Education*, 38, A545.
- Jegade, A. O., Gualtieri, C., Zeeman, G. & Bruning, H. (2020). Three phase simulation of the hydraulic characteristics of an optimized Chinese dome digester using COMSOL multiphysics. *Renewable Energy*.
- Hoffmann, R. A., Garcia, ML., Veskivar, M., Karim, K., Al-Dahhan, MH. & Angenent, LT. (2008). Effect of shear on performance and microbial ecology of continuously stirred anaerobic digesters treating animal manure. *Biotechnology Bioengineering*, 100, 38-48.
- Karim, Kh., Varma, R., Veskivar, M. & Al-Dahhan, M. H. (2004). Flow pattern visualization of a simulated digester. *Journal of Water Researches*, 38, 3659-3670.
- Karim, Kh., Klasson, k. T., Hoffmann, R., Drescher, S. R., DePaoli, D. W. & Al-Dahhan, M. H. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. *Journal of Bioresource Technology*, 96, 1607-1612.
- Karim, K., Thoma, G. J. & Al-Dahhan, M. H. (2007). Gas-lift digester configuration effects on mixing effectiveness. *Water Researches*, 41, 3051-3060.
- Kojima, H., Saawai, J., Uchino, H. & Ichige, T. (1999). Liquid circulation and critical gas velocity in slurry bubble column with short size draft tube. *Journal of Chemical Engineering Science*, 54, 5181-5187.
- Kontandt, H. G. & Roediger, A. G. (1977). Engineering operation and economics of methane gas production. In: Schlegel, H.G., Barnea, J. (Eds.), *Microbial Energy Conversion*. Pergamon Press, Oxford. 379-392.
- Lee, S. R., Cho, N. K. & Maeng, W. J. (1995). Using the pressure of biogas created during anaerobic digestion as the

- source of mixing power. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 80 (4), 415–417.
- Lestinsky, P., Vayrynen, P., Vecer, M. & Wichterle, K. (2012). Hydrodynamics of airlift reactor with internal circulation loop: experiment vs. CFD simulation. *Procedia Engineering*, 42, 892-907.
- Lin, C.C. & Chien, K.S. (2008). Mass-transfer performance of rotating packed beds equipped with blade packings in VOCs absorption into water. *Journal of Separation and Purification Technology*, 63, 138–144.
- 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.
- McFarland, M. J. (2001) *Biosolids Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Merchuk, J. C. & Gluz, M. (1999) Bioreactors, Gas-lift Reactors. *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis, and Bioseparation*. New York: John Wiley. pp. 320-353.
- Meynell, P. J. (1976) *Methane: Planning a Digester*. London: Prism Press. 55–57.
- Morgan, P. F. & Neuspiel, P. J. (1958) Environmental control of anaerobic digestion with gas diffusion. In: J. McCabe & W. W. Eckenfelder (Eds.), *Biological Treatment for Sewage and Industrial Wastes* (vol. 2). New York: Reinhold.
- Pironti, F. F., Medina, V. R., Calvo, R. & Saeza, A. E. (1995). Effect of draft tube position on the hydrodynamics of a draft tube slurry bubble column. *Chemical Engineering Journal*, 60 (1–3), 155–160.
- Reinhold, G. & Markl, H. (1997). Model-based scale-up and performance of the Biogas Tower Reactor for anaerobic waste-water treatment. *Journal of Water Research*, 31 (8), 2057–2065.
- Sawyer, C. N. & Grumbling, A. M. (1960) *Fundamental consideration in high-rate digestion*. Inc. Sewage Engineering Division. ASCE, 86–92.
- Suslov, D. Y. & Temnikov, D.O. (2021). Define of effective process working combine mixing system. In: *Innovations and Technologies in Construction (BUILDINTECH BIT 2021)*. *Journal of Physics: Conference Series* 1926 012003.
- Teitel, M., Ziskind, G., Liran, O., Dubovsky, V. & Letan, R. (2008). Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosystems Engineering*, 101, 351–369.
- Terashima, M., Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Takahashi, H. & Li, Y. Y. (2009). CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 100, 2228–2233.
- Vesvikar, M. S. & Al-Dahhan, M. (2016). Hydrodynamics investigation of laboratory-scale Internal Gas-lift loop anaerobic digester using non-invasive CAPRT technique. *Biomass and Bioenergy*, 84, 98-106.
- Wu, B. & Chen, S. (2008). CFD simulation of non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Journal of Biotechnology Bioengineering*, 99, 700-711.
- Wu, B. (2010). CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters. *Journal of Water Researches*, 44, 3861-3874.
- Wu, B. (2014). CFD simulation of gas mixing in anaerobic digesters. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 278–286.
- Yang, J., Yang, Y., Ji, X., Chen, Y., Guo, J., & Fang, F. (2015). Three-Dimensional Modeling of Hydrodynamics and Biokinetics in EGSB Reactor. *Journal of Chemistry*.
- Zhang, R. H., Yin, Y., Sung, S. & Dague, R. R. (1997). Anaerobic treatment of swine waste by the anaerobic sequencing batch reactor. *Transactions of the ASAE*, 40, 761–767.