

# شبیه‌سازی CFD جریان دوفازی جفت شده با واکنش‌های شیمیایی در یک راکتور جریان پلاگ

مجید رسولی\*<sup>+</sup>

گروه مهندسی بیوسستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

سید محمد موسوی

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

یحیی عجب شیرچی

گروه مهندسی بیوسستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

**چکیده:** درک این که یک فرایند چگونه کار می‌کند، لازمه‌ی طراحی و بهره‌برداری موفق از آن فرآیند می‌باشد. هضم بی‌هوازی یک فرایند بیوشیمیایی پیچیده‌ی چند مرحله‌ای است که شامل تعدادی واکنش‌های میانی است که توسط گروه‌های گوناگونی از میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی صورت می‌گیرد. در این پژوهش شبیه‌سازی بر پایه‌ی دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) سه بعدی جفت شده با واکنش‌ها در یک راکتور نیمه پیوسته‌ی پلاگ انجام شد. از نرم‌افزار تجاری FLUENT 6.3 برای حل معادله‌های حاکم استفاده شد. شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز - مایع با استفاده از مدل چند فاز اولر و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  (RNG) انجام شد. هیدرودینامیک و واکنش‌های هضم بی‌هوازی درون راکتور از روش قاب مرجع چندگانه (MRF) مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان داد الگوی جریان درون راکتور به شدت تحت تاثیر لزجت و چگالی سوپسترا و شدت همزدن است. مقایسه سه سرعت همزدن نشان داد همزدن با شدت زیاد، فاز گاز بالای راکتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کانتور غلظت‌های مولی  $CH_4$  و  $CO_2$  در سامانه بی‌هوازی یک الگوی جریان پلاگ را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** فرایند هضم بی‌هوازی؛ راکتور جریان پلاگ (PFR)؛ دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD)؛ شبیه‌سازی؛ مدل چند فاز اولر.

**KEYWORDS** Anaerobic digestion process; Plug-flow reactor (PFR); Computational fluid dynamics (CFD); Simulation; Eulerian multiphase model.

## مقدمه

به تقریب ناچیز است. آلودگی زیست محیطی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشر در قرن ۲۱ است. همچنین ما با پی‌آمد تغییر آب و هوا،

امروزه بیش‌تر انرژی مورد نیاز کشور ایران از سوختن مواد فسیلی به دست می‌آید. سهم انرژی از منابع تجدیدپذیر

+E-mail: m.rasouli@basu.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

## بخش نظری

## مدل سازی و شبیه سازی راکتور

## هندسه‌ی سامانه و شبکه بندی مدل

در این پژوهش یک مدل CFD سه بعدی دوفازی به منظور بررسی هیدرودینامیک و همچنین فرایند تولید متان در راکتور نوع پلاگ همزن دار به حجم ۱/۳۵ مترمکعب مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های راکتور مورد نظر در گزارش پیشین [۴۴] آورده شده است.

برای طراحی راکتور از نرم افزار کتیا (V5R19) استفاده شد. برای ترسیم هندسه و شبکه بندی سامانه از نرم افزار GAMBIT 2.3.16 (Fluent Inc., USA) و برای شبیه سازی سامانه از نرم افزار FLUENT 6.3.26 (Fluent Inc., USA) استفاده شد. برای انجام محاسبه‌ها، شبکه بندی ساختار نیافته از نوع Tetra-Hybrid/Tgrid انتخاب شد. شبکه بندی سامانه در شکل ۱ آورده شده‌اند. برای بازه‌ی قاب مرجع چندگانه یا (MRF) از شبکه بندی ریزتری استفاده شد که چگونگی شبکه بندی در جدول ۲ شرایط شبکه بندی راکتور نمایش داده شده است.

## بررسی استقلال نتیجه‌ها از شبکه بندی با استفاده از GCI

برای دست یافتن به تعداد شبکه‌های بهینه، استقلال نتیجه‌ها از تعداد شبکه‌ها بررسی شد. برای این منظور چهار شبکه بندی با اندازه‌ی گوناگون ایجاد شد (جدول ۲). روش شاخص همگرایی شبکه (GCI) برای تعیین استقلال نتیجه‌ها از شبکه به کار گرفته شد [۴۶، ۴۵، ۳۳]. با استفاده از این روش تعدادی شبکه با اندازه‌های گوناگون ایجاد شد. نرخ پالایش  $r = 1.32$  برای کوچک تر کردن شبکه‌ها در نظر گرفته شد. دو پارامتر فشار دینامیکی و اندازه‌ی سرعت مستخرج شده از حل CFD به منظور بررسی دقت شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. مرتبه‌ی همگرایی از معادله‌ی زیر محاسبه شد:

$$p = \ln\left(\frac{f_r - f_v}{f_v - f_1}\right) / \ln(r) \quad (1)$$

که در آن  $P$  مرتبه‌ی همگرایی،  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  پارامترهای به دست آمده از حل CFD ( $f_1$  مربوط به ریزترین مش) و  $r$  نرخ پالایش می‌باشد. با استفاده از برون‌یابی ریچاردسون می‌توان پارامتر عملکردی را برای شبکه با فاصله صفر تخمین زد [۳۳]:

افزایش جهانی تقاضای سوخت‌های فسیلی، تأمین نشدن انرژی و استخراج مداوم از منابع محدود طبیعی روبه رو هستیم [۱]. هیئت بین‌المللی تغییرهای آب و هوایی (IPCC) مصرف انرژی در سال ۲۱۰۰ میلادی را سه برابر نسبت به سال ۱۹۹۰ میلادی پیش‌بینی کرده است [۲].

هضم بی‌هوازی، فرایندی زیستی است که مواد تجزیه پذیر را در نبود اکسیژن به بیوگاز تبدیل می‌کند. بیوگاز ارزش گرمایی بالایی دارد و می‌تواند الکتریسیته و گرما تولید کند [۳]. بیوگاز به طور معمول دارای ۵۰ تا ۸۰ درصد متان و ۲۰ تا ۴۰ درصد کربن دی‌اکسید و نیز مقدرهای اندکی نیتروژن، هیدروژن، هیدروژن سولفید می‌باشد [۴]. فرایند هضم بی‌هوازی برای تبدیل ترکیب‌های آلی به بیوگاز از تعدادی متابولیسم میکروبی پیچیده تشکیل شده است که به چهار مرحله اصلی هیدرولیز، اسید زایی، استانتزایی و متان‌زایی تقسیم می‌شود. هر یک از این چهار مرحله دارای واکنش‌های بیوشیمیایی گوناگون با سوبستراها و میکروارگانیسم‌های گوناگون می‌باشند [۵، ۴، ۱۵]. میکروارگانیسم‌های مؤثر در این مرحله‌های به ترتیب، هیدرولیزکننده‌ها، اسیدزها (اسیدوزن‌ها)، استانت‌زها (استوزن‌ها) و متان‌زها (متانوزن‌ها) می‌باشند که ترکیب‌های آلی پیچیده را به ترکیب‌های ساده‌تر تجزیه می‌کنند که سرانجام به تثبیت دور ریزهای آلی و تولید بیوگاز می‌انجامد [۶، ۴].

استفاده از مدل‌های دینامیک سیال‌های محاسباتی در راکتورهای هضم بی‌هوازی هنوز در مرحله‌های اولیه است. این در حالی است که کاربرد عملی و بهینه فرایند به خصوص به منظور تولید انرژی و حذف آلاینده‌ها، مستلزم درک کامل‌تر قاعده‌های حاکم بر فرایند و اثرهای آن است. تاکنون پژوهش‌های اندکی در زمینه شبیه سازی فرایند هضم بی‌هوازی صورت گرفته است. بیش تر این مطالعه‌ها در زمینه رژیم جریان و عمل همزدن در راکتور است [۴۱-۳۷، ۲۴]. همچنین گزارش‌های اندکی مبنی بر شبیه سازی واکنش‌های بیوشیمیایی منتشر شده است [۴۳، ۴۲، ۳۱].

از جنبه‌های نوآوری پژوهش حاضر می‌توان به توسعه مهندسی بیوراکتورهای هضم بی‌هوازی با مطالعه هیدرودینامیک جریان و واکنش‌های هضم بی‌هوازی درون راکتور به کمک مدل‌های دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) به منظور شناخت و درک بهتر فرایند اشاره کرد.

جدول ۱- مروری بر مقاله‌های منتشر شده در زمینه‌ی هضم بی‌هوازی.

| موضوع                             | ملاحظات                                                                                                                                 | مرجع             |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| طراحی راکتور                      | طراحی راکتور نوع پلاگ و دیدن رژیم جریان درون راکتور                                                                                     | [۷]              |
| کاربرد هضم بی‌هوازی               | مقایسه‌ی کاربردهای هضم بی‌هوازی با سایر فرآیندهای تصفیه                                                                                 | [۸]              |
| هضم بی‌هوازی گرمادوست             | مطالعه‌ی هضم بی‌هوازی پسماند جامد خانوارها، تأثیر افزودن آنزیم روی فرآیند هضم                                                           | [۹]              |
| افزایش تولید متان                 | بررسی عامل‌های مؤثر در بهبود تولید متان در فرآیند هضم بی‌هوازی                                                                          | [۱۰]             |
| مدل‌سازی ریاضی                    | توسعه‌ی مدل دینامیکی برای فرآیند هضم بی‌هوازی ارزیابی مدل دینامیکی توسعه یافته به منظور ایجاد تعادل دلخواه میان دقت و پیچیدگی مدل       | [۱۱، ۱۲]<br>[۱۳] |
| بازیافت پسماند جامد               | بررسی بازیافت مواد و تولید انرژی از هضم بی‌هوازی پساب کشتارگاه تولید گاز متان از قسمت آلی ضایعات جامد شهری (OFMSW)                      | [۱۴]<br>[۱۵]     |
| تولید بیوگاز                      | بررسی روش‌های مختلف برای افزایش تولید بیوگاز از سوبستراهای جامد                                                                         | [۱۶]             |
| تصفیه بی‌هوازی پساب لبنی          | بررسی مشخصات کلی پساب‌های صنایع لبنی و سازوکارهای اصلی تجزیه‌ی اجزای $k, kh'$ ، آن‌ها                                                   | [۱۷]             |
| تصفیه بی‌هوازی پساب خانگی         | مطالعه‌ی هضم بی‌هوازی پساب خانگی در شرایط آب و هوای گرم با استفاده از راکتور UASB                                                       | [۱۸]             |
| سامانه‌های تصفیه‌ی بی‌هوازی پساب  | بررسی انواع تغییرهای عملیاتی و محیطی روی عملکرد سامانه‌های تصفیه پساب                                                                   | [۱۹]             |
| اختلاط و هم‌زدن                   | مدل‌سازی دینامیک تأثیر اختلاط غیر ایده‌آل بر روی عملکرد فرآیند هضم بی‌هوازی در راکتورهای ناپیوسته دوره‌ای، تأثیر رژیم هم‌زدن روی فرآیند | [۲۰-۲۳]<br>[۲۴]  |
| بازدارندگی هضم بی‌هوازی           | بررسی مطالعه‌های انجام شده در زمینه‌ی بازدارندگی در فرآیند هضم بی‌هوازی                                                                 | [۲۵]             |
| تجزیه‌پذیری بی‌هوازی              | ارائه‌ی راهبردهای گوناگون برای پیش‌بینی تولید متان                                                                                      | [۲۶]             |
| جنبه‌های میکروبیولوژیکی و عملکردی | مروری بر جنبه‌های میکروبیولوژیکی، شیمیایی و عملکردی هضم بی‌هوازی                                                                        | [۲۷]             |
| پیش تیمار سوبسترا                 | بررسی اثر پیش تیمار روی دور ریزها برای افزایش تولید بیوگاز                                                                              | [۲۸]             |
| بهینه‌سازی                        | بهینه‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی                                                                                                          | [۲۹]             |
| شبیه‌سازی CFD                     | بررسی هیدرودینامیک جریان، رژیم هم‌زدن، انتقال گرما و انتقال جرم درون راکتور، کاربرد CFD در طراحی راکتورها                               | [۳۰-۳۴]          |
| هضم بی‌هوازی هم‌زمان              | تأثیر هضم بی‌هوازی هم‌زمان، پارامترهای عملکردی و طراحی راکتور روی افزایش متانوزن‌ها                                                     | [۳۵]             |
| محیط زیست و هضم بی‌هوازی          | دیدگاه‌های نوظهور در محیط زیست با توجه به فناوری هضم بی‌هوازی                                                                           | [۳۶]             |

جدول ۲- شرایط شبکه بندی راکتور.

| اندازه‌ی بازه‌ها |          | نوع   | عنصر       | تعداد شبکه‌ها      | شماره شبیه‌سازی |
|------------------|----------|-------|------------|--------------------|-----------------|
| ۲٫۶              | درشت     | TGrid | Tet/Hybrid | $5,71 \times 10^5$ | ۱               |
| ۲٫۳              | متوسط    | TGrid | Tet/Hybrid | $7,84 \times 10^5$ | ۲               |
| ۲                | ریز      | TGrid | Tet/Hybrid | $1,03 \times 10^6$ | ۳               |
| ۱٫۸              | خیلی ریز | TGrid | Tet/Hybrid | $1,43 \times 10^6$ | ۴               |

آنگاه عدم وابستگی نتیجه‌ها به شبکه به دست می‌آید [۳۳].

### شرایط مرزی و دامنه حل

پس از مش‌بندی حوزه‌ی محاسباتی، شرایط مرزی مسئله تعیین شد. ورودی راکتور به‌عنوان ورودی سرعت، خروجی راکتور (مایع و گاز) به‌عنوان خروجی فشار، دیواره‌ی راکتور و تیغه‌ها به‌عنوان دیواره‌ی ثابت بدون لغزش، حجم مجازی به‌عنوان ناحیه‌ی داخلی و همزن به‌عنوان دیواره‌ی متحرک در نظر گرفته شد. دو روش برای شبیه‌سازی همزن در راکتورهای همزن‌دار وجود دارد؛ یکی روش قاب مرجع چندگانه یا (MRF) و دیگری روش شبکه‌ی لغزان یا (SM). روش SM دقت بیشتری دارد ولی پیش‌تر از روش MRF به زمان نیاز دارد [۴۷]. برای شبیه‌سازی راکتور این پژوهش روش MRF انتخاب شد. روش MRF یکی از روش‌های معمول مدل کردن راکتورهای همزن‌دار است، این روش، جریان را با فرض مکان ثابت همزن نسبت به راکتور شبیه‌سازی می‌کند [۴۸، ۴۹]. در این روش دامنه‌ی جواب به دو منطقه تقسیم می‌شود. در منطقه‌ی درونی معادله‌های پیوستگی و مومنتم در چهارچوب دوار و در منطقه‌ی بیرونی این معادله‌ها در چهارچوب ثابت حل می‌شود. مرز منطقه‌ی دوار شامل همزن و میله‌ی همزن به شعاع به تقریب ۲۱ سانتی‌متر می‌شود. این مناطق در شکل ۱ (الف) نشان داده شده‌اند.

### حل معادله‌ها و همگرایی نتیجه‌ها

برای محاسبه‌های مدل چند فازی اولر از روش فاز جفت شده‌ی ساده (PC-SIMPLE) با حل گر مبتنی بر فشار استفاده شد. از روش PC-SIMPLE برای جفت کردن فشار - سرعت استفاده شد.

$$f_{h=0} = f_1 + \frac{f_1 - f_r}{r^p - 1} = \frac{r^p f_1 - f_r}{r^p - 1} \quad (2)$$

شاخص همگرایی شبکه (GCI) برای ریزترین شبکه به صورت زیر تعیین شد:

$$GCI_{fune} = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (3)$$

که در آن  $F_s$  فاکتور اطمینان ( $F_s = 1.25$ ) برای وقتی که حداقل ۳ پارامتر ( $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$ ) از ۳ حل CFD داشته باشیم [۴۵] و  $\varepsilon$  خطای نسبی می‌باشد که از معادله‌ی زیر به دست آمد:

$$\varepsilon = \frac{f_r - f_1}{f_1} \quad (4)$$

وقتی که سه حل از CFD در دسترس باشد می‌توانیم شاخص‌های بی‌بعد  $GCI_{12}$  و  $GCI_{23}$  را محاسبه کنیم:

$$GCI_{1r} = \frac{F_s \left| \frac{f_r - f_1}{f_1} \right|}{r^p - 1} \quad (5)$$

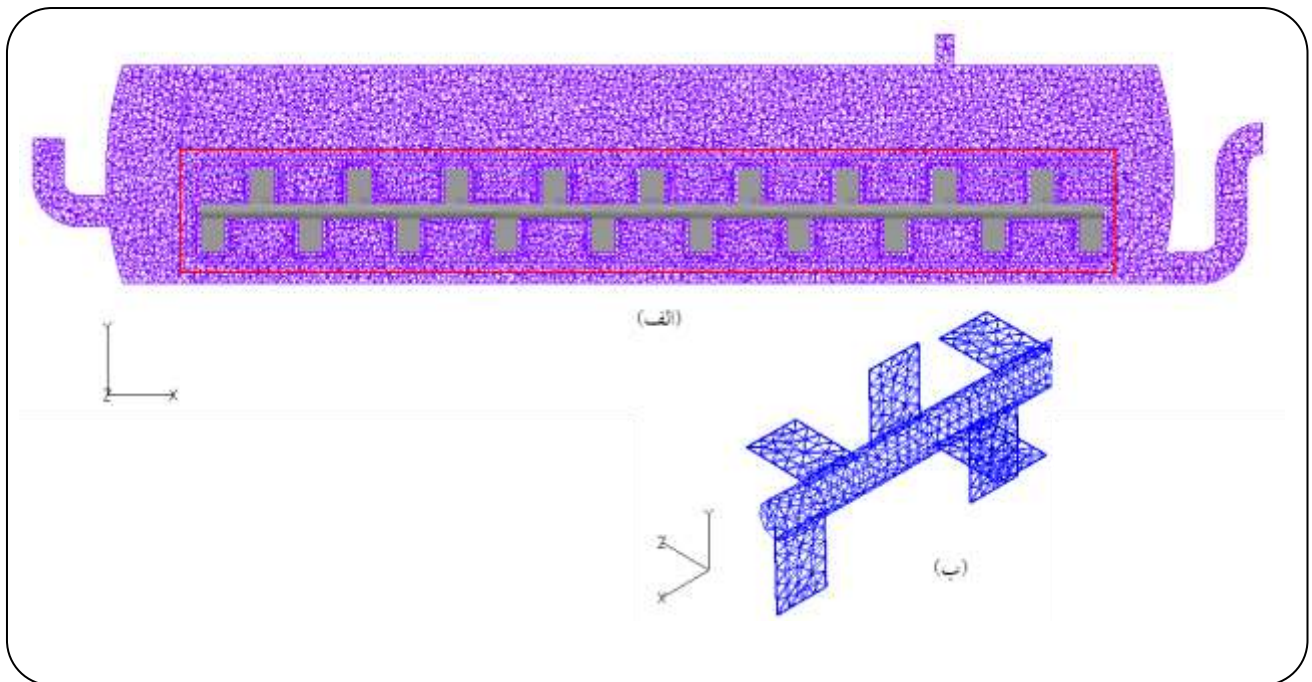
$$GCI_{rr} = \frac{F_s \left| \frac{f_r - f_r}{f_r} \right|}{r^p - 1} \quad (6)$$

و اگر ما در دامنه‌ی مجاور همگرایی باشیم آن‌گاه داریم:

$$GCI_{rr} \approx r^p GCI_{1r} \quad (7)$$

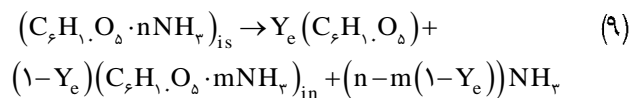
بنابراین اگر:

$$\frac{GCI_{rr}}{r^p GCI_{1r}} \approx 1 \quad (8)$$

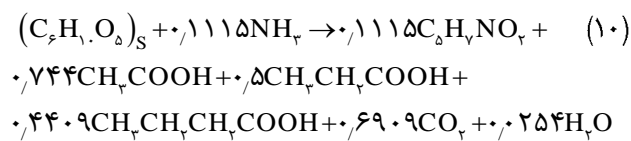


شکل ۱- نمایی از شبکه‌بندی (الف) راکتور روی صفحه‌ی  $z=0$  (ب) هم‌زن پارویی

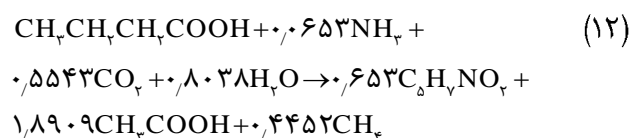
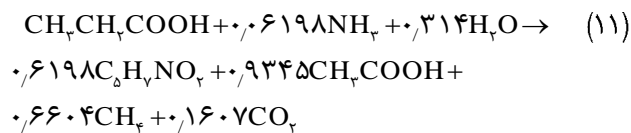
استات توسط باکتری‌های استوژن پروپیونات خوار و بوتیرات خوار و سرانجام تولید متان توسط باکتری‌های متانوژن [۵۲ ۵۳]:  
 هیدرولیز آنزیمی:



که در آن  $Y_e$  بازده آنزیمی می‌باشد.  
 اسیدزایی



استات‌زایی (تجزیه‌ی پروپیونات (۱۱) و بوتیرات (۱۲))



سرعت‌ها به‌صورت جفت شده با فازها در روش گسسته‌سازی حل شدند. در این روش معادله‌های مومنتم و پیوستگی بر مبنای فشار با یکدیگر حل می‌شوند [۵۰، ۵۱]، بنابراین شدت همگرایی جواب در مقایسه با روش مجزا که این معادله‌ها را پی‌درپی حل می‌کند، بهبود می‌یابد. معیار همگرایی برابر  $10^{-4}$  قرار داده شد که برای بیشتر مسئله‌های متداول کفایت می‌کند. شبیه‌سازی ناپایا با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه به‌کار گرفته شد. بیشینه‌ی تکرار بر واحد زمان برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شد تا از همگرایی در هر گام زمانی اطمینان به دست آید. ضریب زیر تخفیف که تأثیر هر معادله را بر روی جواب پایانی نشان می‌دهد در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. برای انجام دادن فرایند شبیه‌سازی، یک رایانه‌ی SuperMicro® با ۲۴ پردازنده و ۱۶ GB RAM به‌کار برده شد.

#### مدل سینتیک میکروبی

مدل سینتیک استفاده شده در این پژوهش براساس مدل پیشنهادی [۵۲] که برای تخمیر بی‌هوازی پسماندهای گاوی ارایه شده است می‌باشد. در این مدل تخمیر پسماندهای گاوی و تولید بیوگاز توسط پنج واکنش زیر انجام می‌شود که شامل یک مرحله هیدرولیز و چهار مرحله‌ی میکروبی است. این چهار مرحله عبارتند از تولید اسیدهای چرب فرار توسط باکتری‌های اسیدوژن، تولید

که در آن گونه‌ی  $i$  به‌وسیله‌ی استیک اسید، بوتیریک اسید و پروپیونیک اسید جایگزین می‌شود. پارامترهای  $n$  و  $k$  در جدول ۴ آورده شده است.

### معادله‌ی انتقال گونه‌ها

به‌منظور حل معادله‌ی بقا برای گونه‌های شیمیایی، نرم‌افزار معادله‌ی انتشار همرفتی برای  $i$  امین گونه و جزء جرمی هرکدام از گونه‌ها را محاسبه می‌کند. معادله‌ی بقا از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot j + R_i \quad (15)$$

که در آن  $J_i$  شار انتشار گونه‌ی  $i$  و  $R_i$  نرخ خالص تولید گونه‌ی  $i$  به‌وسیله‌ی واکنش‌های بیوشیمیایی می‌باشد. شار انتشار برای جریان آشفته از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\bar{J}_i = -\left( \rho D_{i,m} \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (16)$$

که در آن  $D_{i,m}$  ضریب انتشار برای گونه‌ی  $i$  و  $Sc_t$  عدد اشمیت (به‌صورت پیش‌فرض ۰/۷) می‌باشد [۳۱، ۵۴].  
برای تعیین ویژگی‌های مواد در نرم‌افزار، از داده‌های جدول ۵ استفاده شد.

### اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل از آزمایش ردیاب پله‌ای استفاده شد. برای رسم تابع توزیع زمان مانند  $F$  برای ورودی، پله تعریف شد. یعنی در لحظه‌ی  $t=0$  غلظت ردیاب در جریان ورودی به صورت ناگهانی از صفر به  $C_{max}$  تغییر کرد. راکتور از آب خالص پر شده و ورودی سامانه با آب دارای کلرید سدیم جایگزین شد و غلظت خروجی تعیین شد. تغییرهای غلظت ( $C_{step}$ ) در خروجی راکتور بر حسب زمان ( $t$ ) نمودار توزیع زمان مانند  $F$  را تشکیل می‌دهد.

### نتیجه‌ها و بحث

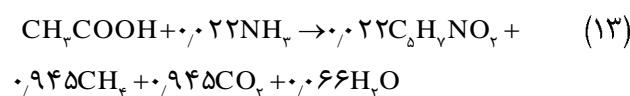
#### بررسی استقلال نتیجه‌ها از شبکه بندی با استفاده از GCI

نتیجه‌های شبیه‌سازی ۴ شبکه‌بندی با اندازه‌ی گوناگون در جدول ۲ آورده شده است. پارامترهای شاخص همگرایی شبکه (GCI) با توجه به معادله‌های (۱) تا (۸) به‌دست آمد و در جدول ۶ آورده شده است

جدول ۳- ضریب‌های زیر تخفیف.

| نام متغیر            | فاکتورهای زیر تخفیف |
|----------------------|---------------------|
| فشار                 | ۰/۶                 |
| چگالی                | ۱                   |
| نیروهای بدنه         | ۱                   |
| مومنتم               | ۰/۷                 |
| کسر جرمی             | ۰/۶                 |
| انرژی جنبشی آشفته‌گی | ۰/۶                 |
| شدت اتلاف آشفته‌گی   | ۰/۶                 |
| گرانروی آشفته‌گی     | ۱                   |
| انرژی                | ۱                   |
| گونه‌های واکنش       | ۱                   |

### متان‌زایی



در این مدل سرعت مرحله‌ی هیدرولیز و سرعت مرگ و میر باکتری‌ها به‌وسیله‌ی واکنش‌های درجه‌ی اول و سرعت سایر مراحل به‌وسیله‌ی سینتیک رشد مونود بیان می‌شوند. همچنین اثرهای بازدارندگی pH روی باکتری‌های استوژن و متانوژن، بازدارندگی اسیدهای چرب فرار روی باکتری‌های اسیدوژن، بازدارندگی استات روی باکتری‌های استوژن و بازدارندگی آمونیاک روی باکتری‌های متانوژن به‌صورت تابع‌های غیررقابتی در معادله‌های سرعت رشد مونود در نظر گرفته شده است [۲۰، ۵۲].

ثابت‌های سینتیکی واکنش‌های (۱۱) تا (۱۳) توسط [۳۱] در دمای ۳۷ درجه‌ی سلسیوس اندازه‌گیری شده است. در پژوهش حاضر از این ثابت‌ها استفاده شد.

نرخ واکنش‌های استات‌زایی و متان‌زایی به‌وسیله‌ی معادله‌های زیر تعیین شد:

$$\frac{dc_i}{dt} = k' c_i^n \quad (14)$$

جدول ۴- ثابت‌های سینتیکی واکنش‌های هضم بی‌هوازی [۳۱].

| پارامتر    |                                                              |       | فاکتور                 |
|------------|--------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| E (j/kmol) | k' ((kmol m <sup>-3</sup> ) <sup>1-n</sup> d <sup>-1</sup> ) | n     |                        |
| ۴۳۲۳/۰     | ۰/۰۲۲۵                                                       | ۰/۲۴۶ | تجزیه‌ی پروپیونیک اسید |
| ۷۱۹۹/۹     | ۰/۰۱۸۰                                                       | ۰/۱۹۳ | تجزیه‌ی بوتیریک اسید   |
| ۵۶۹۶/۱     | ۰/۰۴۰۰                                                       | ۰/۲۳۷ | تجزیه‌ی استیک اسید     |

جدول ۵- ویژگی‌های مواد [۳۱].

| گونه‌ها        | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) | ظرفیت گرمایی (j/kg.k) | وزن مولکولی (g/mol) | آنتالپی استاندارد (kJ/kmol) | آنتروپی استاندارد (kJ/kmol.k) |
|----------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| استیک اسید     | ۱۰۴۹/۰۰                    | ۲۰۱۶                  | ۶۰/۰۵               | -۴۸۳۸۸۰                     | ۱۵۸/۰۰                        |
| بوتیریک اسید   | ۹۵۹/۵۰                     | ۲۰۲۰                  | ۸۸/۱۱               | -۵۳۳۹۰۰                     | ۲۲۶/۳۰                        |
| کربن دی‌اکسید  | ۱/۹۸                       | ۴۸۰                   | ۴۴/۰۱               | -۳۹۳۵۳۲                     | ۲۱۳/۷۲                        |
| هیدروژن        | ۰/۰۹                       | ۱۴۲۸۳                 | ۲/۰۲                | ۰                           | ۱۳۰/۵۸                        |
| متان           | ۰/۶۶                       | ۲۲۲۲                  | ۱۶/۰۴               | -۷۴۸۹۵                      | ۱۸۶/۰۴                        |
| پروپیونیک اسید | ۹۹۰/۰۰                     | ۲۰۳۸                  | ۷۴/۰۸               | ۵۱۰۰۰۰                      | ۱۹۱/۰۰                        |
| آب             | ۹۹۸/۰۰                     | ۴۱۸۲                  | ۱۸/۰۱               | -۲۸۵۸۴۱                     | ۶۹/۹۰                         |

جدول ۶- پارامترهای شاخص همگرایی شبکه (GCI).

| کمیت (متوسط)       | f <sub>3</sub> | f <sub>2</sub> | f <sub>1</sub> | p    | f <sub>h=0</sub> | GCI <sub>12</sub> | GCI <sub>32</sub> | دامنه مجانب |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| فشار دینامیکی (Pa) | ۷۵/۸           | ۷۷/۴           | ۷۷             | ۴/۹۵ | ۷۶/۸۶۶           | ۰/۰۰۲۲            | ۰/۰۰۸۶            | ۰/۹۷۷       |
| اندازه سرعت (m/s)  | ۰/۳۴           | ۰/۳۱           | ۰/۳۲           | ۳/۹۲ | ۰/۳۲۵            | ۰/۰۱۹۶            | ۰/۰۶۰۶            | ۱/۰۳۲       |

شکل الف) مربوط به زمان ۱۵۸ ثانیه و سرعت ۱۰۰ rpm می‌باشد. در این شکل ملاحظه می‌شود که شدت اختلاط زیاد بوده و فضای بالای سطح مایع که مربوط به فاز گاز می‌باشد را تحت تأثیر قرار داده است. این شدت از همزدن باعث ایجاد محیطی آشفته با مخلوط همگنی از مایع و گاز خواهد شد که برای فرایند هضم بی‌هوازی مناسب نیست. این شدت از همزدن ممکن است یکی از هدف‌های اولیه عمل همزدن در راکتورهای هضم بی‌هوازی، که توزیع یکنواخت مواد جامد کل و تماس مستقیم حداکثری بین زیست‌توده فعال و لجن خام می‌باشد را ارضا کند، ولی از نظر تشکیل کف و جلوگیری از این پدیده کارآمد نیست. همزدن ناکافی و نامناسب ممکن است باعث اختلال در عمل هضم شود.

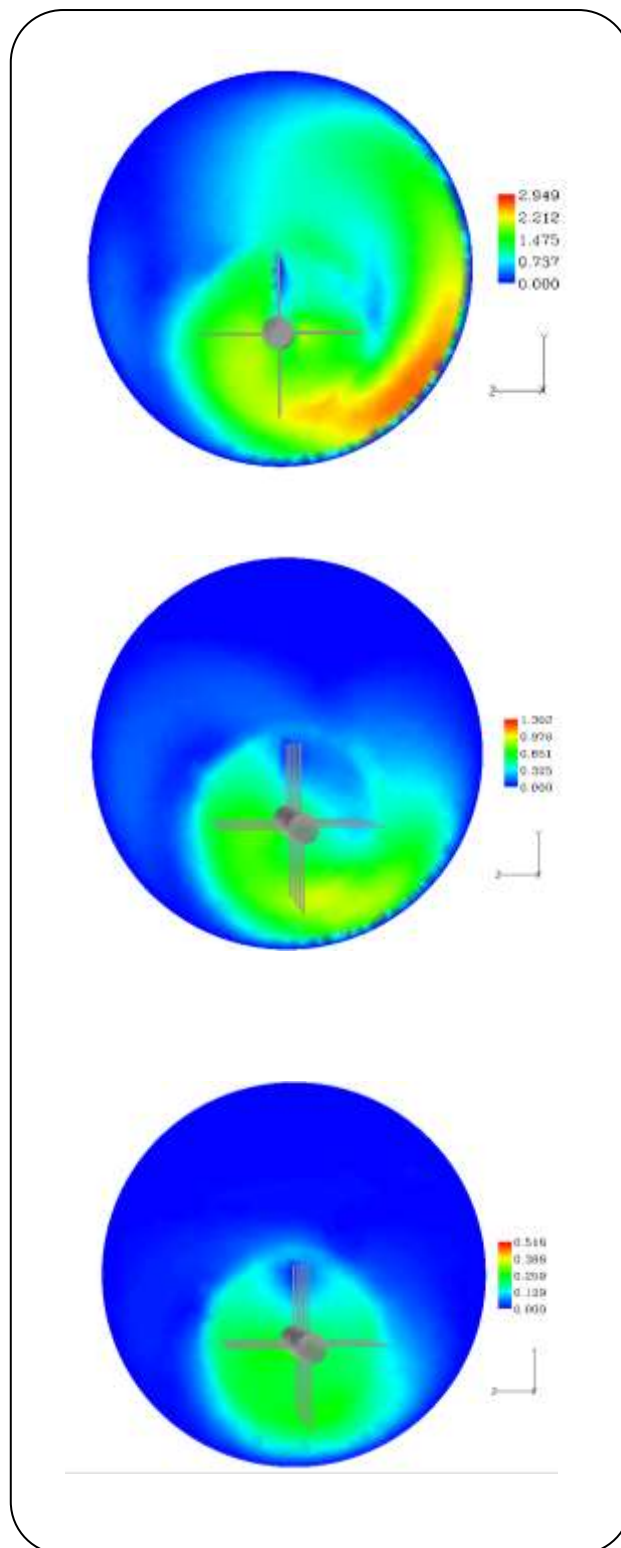
نتیجه‌های به دست آمده از شبکه‌بندی با اندازه درشت اختلاف چشمگیری با شبکه‌بندی با اندازه‌های متوسط، ریز و خیلی ریز داشت. بنابراین با کنار گذاشتن این حالت، و با توجه به معادله‌های (۱) تا (۸) از بین حالت‌های دیگر که مقدار پارامترهای (f<sub>1</sub> و f<sub>2</sub> و f<sub>3</sub>) نزدیک به هم دارند، شبکه‌بندی با اندازه‌ی متوسط به دلیل تعداد شبکه‌ی کمتر انتخاب شد.

#### هیدرودینامیک جریان

به منظور بررسی نقش همزدن در راکتور پلاگ، کانتور سرعت ایجاد شده به وسیله‌ی همزدن پارویی برای TS=۱۲/۱ در صفحه‌ی X=۰ در سه سرعت متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است.

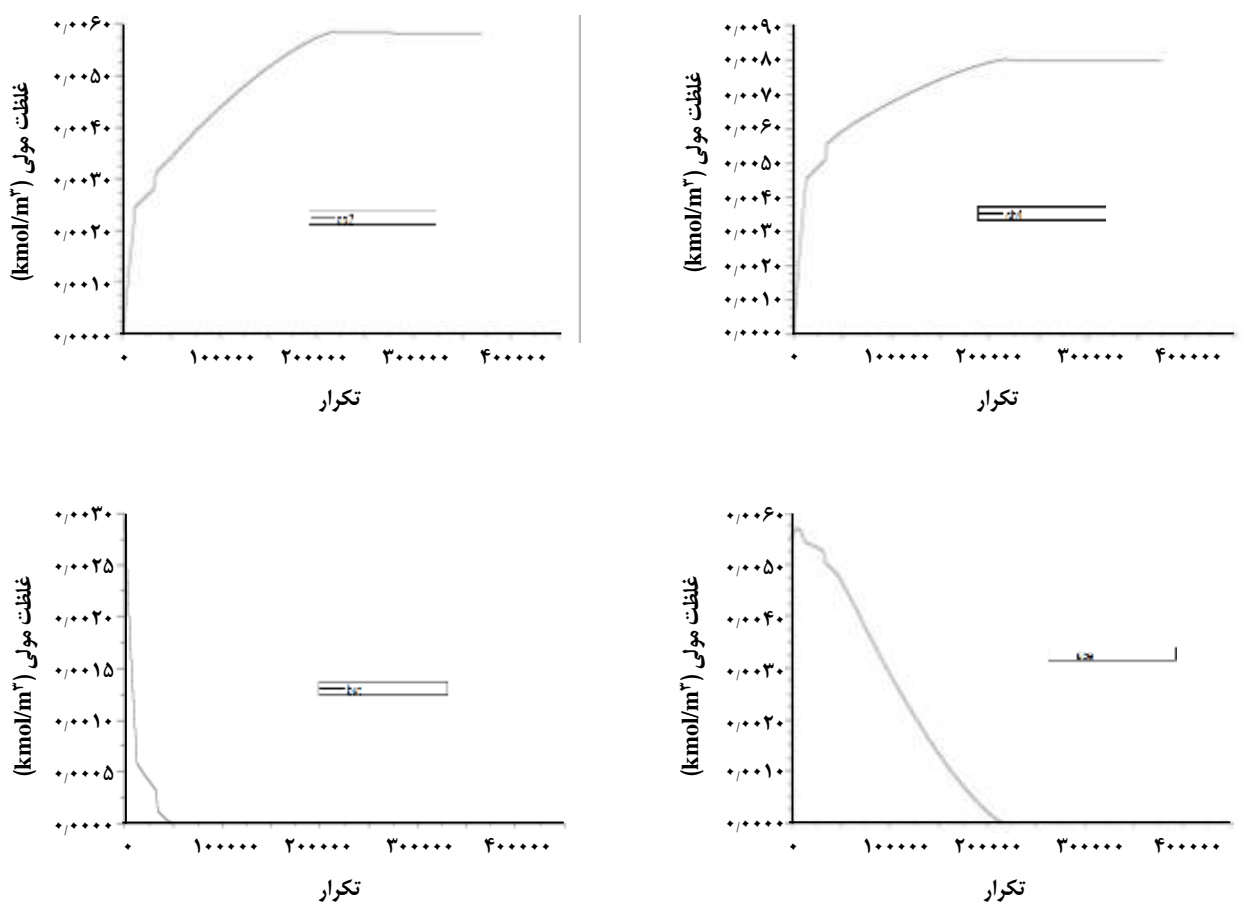
اما همزدن بیش از حد باعث از هم گسیختن میکروپها می‌شود [۵۵]. کاتور سرعت در شکل (ب) و (ج) به ترتیب برای زمان ۵۸۶ ثانیه و سرعت ۵۰rpm و زمان ۷۰۰ ثانیه و سرعت ۲۰rpm می‌باشد. این کاتورها نشان دهنده‌ی یک عمل همزدن خوب و قابل پذیرش می‌باشند که مقدار و شدت همزدن مورد نیاز برای توزیع یکنواخت محتویات راکتور و حصول شرایط مورد نیاز برای بهبود عملکرد راکتور را فراهم می‌کند. همزدن یکی از عملیات‌های مهم به منظور توزیع یکنواخت باکتری‌های بی‌هوازی، مواد مغذی و دما در راکتورها برای تولید حداکثری بیوگاز می‌باشد [۳۴]. تعدادی از مطالعه‌ها نشان داده‌اند که همزدن بیش از حد باعث اختلال در عملکرد باکتری‌ها می‌شود [۵۶].

با توجه به کاتورهای به‌دست آمده و نتیجه‌های یاد شده در بالا واضح است که گزینه‌ی سرعت ۱۰۰rpm مصرف انرژی بالا و کارآمدی کم‌تری نسبت به دو سرعت ۲۰ و ۵۰rpm دارد. انرژی مورد نیاز برای عمل همزدن حدود ۲۰٪ از انرژی کل ورودی راکتورها را تشکیل می‌دهد. طراحان و اپراتورهای صنعتی امروزه به دنبال کمینه کردن شدت همزدن به منظور کمینه کردن هزینه‌ها و اثرهای زیست محیطی بدون کاهش بیوگاز تولیدی می‌باشند. برخی از راکتورها تنها پنج دقیقه در ساعت نیاز به همزدن دارند بدون این‌که اثر سویی بر روی تولید بیوگاز داشته باشد در حالی که برخی دیگر برای تولید بیوگاز با همین بازدهی به همزدن پیوسته نیاز دارند. همچنین در برخی از پژوهش‌ها پیشنهاد داده شده است که همه‌ی قسمت‌های راکتور نیاز به همزدن مساوی ندارد، در بعضی موارد نشان داده شده است که لایه‌های به‌هم‌زده نشده راکتور، فعالیت تولید متان ۱/۵ برابر لایه‌های به‌هم‌زده شده می‌باشد. به منظور پیش‌بینی مطمئن مقدار و شدت همزدن بهینه برای یک راکتور ویژه، لازم است مقدار وابستگی بیوگاز خروجی به عمل همزدن و الگوی جریان درون راکتور مشخص شود. الگوهای جریان که به صورت چرخشی هستند به‌وسیله‌ی پارامترهای فیزیکی راکتور، الگوی جریان ورودی، سامانه به‌هم‌زن و رئولوژی خوراک (پسماند) مشخص می‌گردند. بنابراین رژیم همزدن در راکتورها می‌تواند برای ترغیب الگوهای جریان برای افزایش تولید بیوگاز و نیز کاهش انرژی ورودی عمل همزدن مناسب باشد؛ در هر دو مورد بازدهی انرژی راکتورها افزایش می‌یابد و از اثرهای زیست محیطی می‌کاهد [۴۰].



شکل ۲- کاتور سرعت ایجاد شده به‌وسیله‌ی هم‌زن پارویی برای TS=۱۲/۱ در صفحه‌ی x=۰ (الف) در زمان ۱۵۸ ثانیه و سرعت ۱۰۰ rpm (ب) در زمان ۵۸۶ ثانیه و سرعت ۵۰ rpm (ج) در زمان ۷۰۰ ثانیه و سرعت ۲۰ rpm.





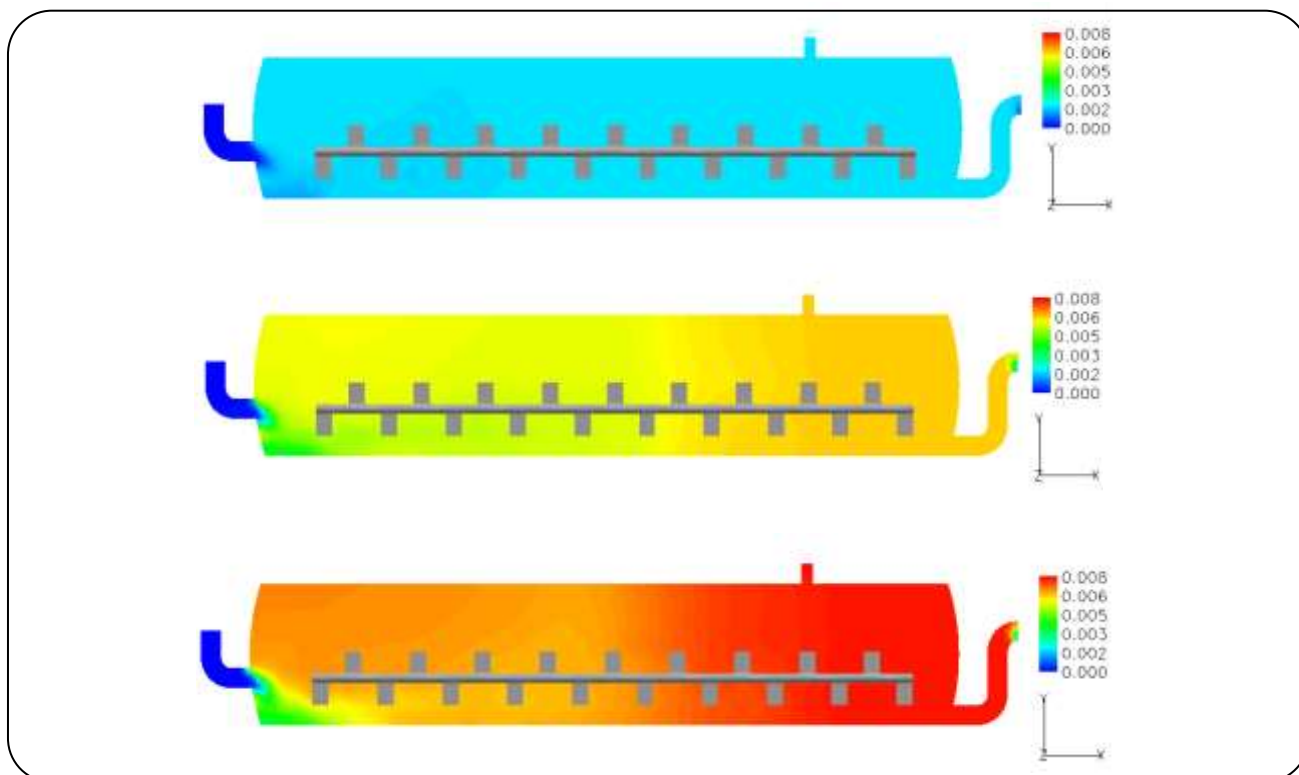
شکل ۳- نمودار پیشینه‌ی همگرایی غلظت مولی ( $\text{kmol/m}^3$ ): الف) متان، ب) کربن دی‌اکسید، ج) استیک اسید و د) بوتیریک اسید.

غلظت واکنش‌دهنده‌ها در نزدیک ورودی زیاد می‌باشد و با فاصله گرفتن از ورودی و نزدیک شدن به خروجی کم و کمتر می‌شود (شکل ۵ الف)). غلظت واکنش‌دهنده‌ها به طور معمول پس از ۱٫۶ (یک ششم) از طول راکتور ثابت باقی می‌ماند. در تنها پژوهشی که روی شبیه‌سازی فرایند هضم بی‌هوازی در راکتور پلاگ صورت گرفته بود نتیجه‌ی همانند گزارش شده است [۴۲]. این یکی از ویژگی‌های مثبت راکتور پلاگ است که باعث می‌شود سوپسترا در طی مسیر ورودی تا خروجی، با سرعت کم حرکت کند. این نوع خاص از رژیم هیدرولیکی، توده‌ی زیستی را برای مدت طولانی درون راکتور نگه داشته و موجب می‌شود لایه‌ای از باکتری‌های بی‌هوازی در کف راکتور ته‌نشین شود. همچنین می‌توان به قابلیت جداسازی فعالیت باکتری‌های اسیدزا و متان‌زا اشاره کرد. این عمل باعث می‌شود که راکتور در برابر شوک‌های هیدرولیکی و نیز تغییرهای ناگهانی بار آلی ورودی (OLR)، مقاومت بالایی از خود نشان دهد.

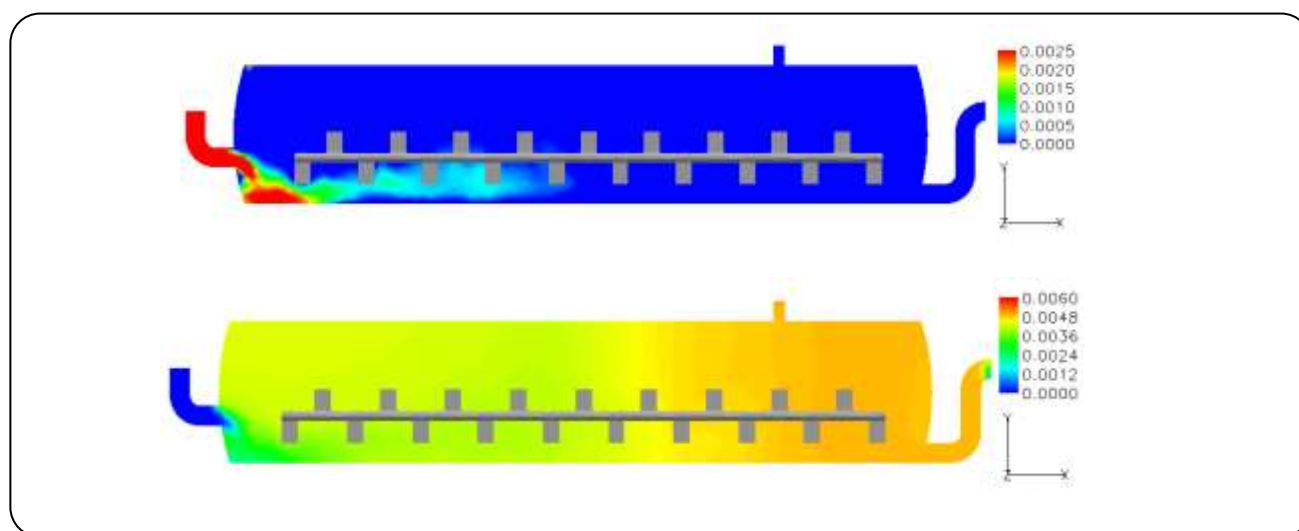
### شبیه‌سازی واکنش‌های بیوشیمیایی

در این شبیه‌سازی، همگرایی بعد از ۲۲۰۰۰۰ تکرار به دست آمد. نمودار پیشینه‌ی همگرایی برای غلظت مولی متان، کربن دی‌اکسید، استیک اسید و بوتیریک اسید در شکل ۳ آورده شده است. دو معیار برای همگرایی در نظر گرفته شد؛ ۱) برای گونه‌ها، باقی‌مانده کم‌تر از  $10^{-3}$  و برای انرژی، باقی‌مانده کم‌تر از  $10^{-6}$  باشد. مدل براساس اصل‌های بقای جرم، بقای انرژی، انتقال گونه‌ها و واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. همچنین ممتوم و آشفستگی نیز در مدل در نظر گرفته شد.

بازه‌ی تغییرهای غلظت مولی برای گونه‌ی متان بین  $4/42 \times 10^{-3}$  تا  $10^{-3} \times 1/03 \text{ (kmol/m}^3)$  و برای گونه‌ی کربن دی‌اکسید بین  $2/93 \times 10^{-3}$  تا  $5/86 \times 10^{-3} \text{ (kmol/m}^3)$  به‌دست آمد. کانتورهای شبیه‌سازی برای غلظت فرآورده‌های واکنش (متان و کربن دی‌اکسید) و یکی از واکنش‌دهنده‌ها (استیک اسید) در شکل ۴ و شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴- کانتور غلظت مولی ( $\text{kmol/m}^3$ ) متان طی هضم بی‌هوازی در صفحه‌ی  $z=0$  در زمان‌های گوناگون.

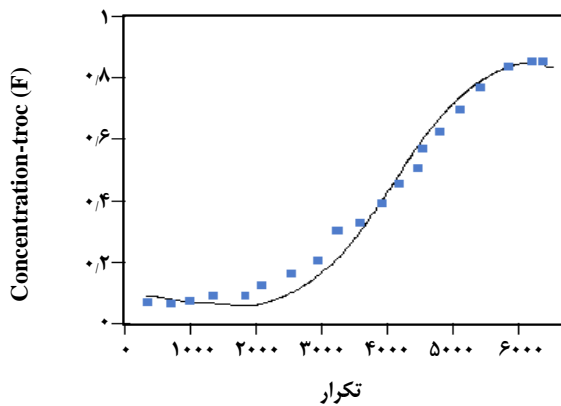


شکل ۵ - کانتور غلظت مولی ( $\text{kmol/m}^3$ ) استیک اسید و (ب) کربن دی‌اکسید، طی هضم بی‌هوازی در صفحه‌ی  $z=0$ .

#### اعتبارسنجی مدل

برای تعیین غلظت، در ابتدا نمونه‌هایی با غلظت‌های گوناگون آماده شد و با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، منحنی کالیبراسیون آن‌ها تهیه شد (شکل ۶). به‌منظور بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی

نتیجه‌ها نشان داد غلظت  $\text{CH}_4$  بیشتر از  $\text{CO}_2$  بود، زیرا  $\text{CH}_4$  فرآورده‌ی اصلی واکنش می‌باشد. غلظت  $\text{CH}_4$  و  $\text{CO}_2$  در طول راکتور با فاصله گرفتن از ورودی و نزدیک شدن به خروجی راکتور افزایش پیدا کردند.

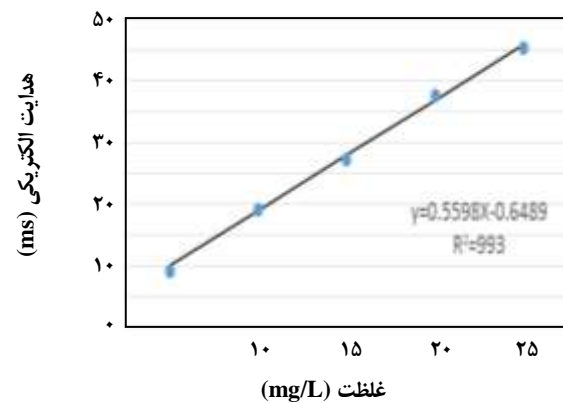


شکل ۷- منحنی F و مقادیرهای آزمایشگاهی غلظت ردیاب برای زمان ماند ۱۰۰ دقیقه.

شکل ۷- منحنی F و مقادیرهای آزمایشگاهی غلظت ردیاب برای زمان ماند ۱۰۰ دقیقه. مقادیرهای شبیه‌سازی با مقادیرهای آزمایشگاهی همبستگی قابل قبولی داشت.

دانشیه و ویسکوزیته‌ی سوپسترا و همچنین شدت هم‌زنی به شدت روی الگوی جریان درون راکتور تأثیر گذار بود. شکل خاص راکتور پلاگ باعث شد سوپسترا در طی مسیر ورودی تا خروجی، با سرعت کم حرکت کند. این نوع ویژه از رژیم هیدرولیکی، توده‌ی زیستی را برای مدت طولانی درون راکتور نگه داشته و موجب می‌شود لایه‌ای از باکتری‌های بی‌هوازی در کف راکتور ته‌نشین شود. از ویژگی‌های دیگر راکتور پلاگ، می‌توان به قابلیت جداسازی فعالیت باکتری‌های اسیدزا و متان‌زا اشاره کرد. این عمل باعث می‌شود که راکتور در برابر شوک‌های هیدرولیکی و نیز تغییرهای ناگهانی بار آلی ورودی (OLR)، مقاومت بالایی از خود نشان دهد.

براساس مطالعه‌ی انجام شده و یافته‌های این پژوهش، موردهای زیر برای ادامه‌ی کار پیشنهاد می‌شود: اندازه‌گیری پارامتر بی‌بعد (D/vL) و مدل کردن انتشار در راکتور پلاگ به‌وسیله‌ی آن، برای مطالعه‌های آینده پیشنهاد می‌شود. در مورد استفاده از راکتور پلاگ هم‌زده، ظرفیت ماند (نگه‌داشت) زیست‌توده از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا رشد میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی در زمان متابولیک تولید متان خیلی آهسته می‌باشد. خیلی اوقات لازم است راکتور به‌گونه‌ای پیکربندی شود تا زمان ماند هیدرولیکی (HRT) از زمان ماند مواد جامد (SRT) جدا شود. کنترل رژیم هم‌زدن، یک رویکرد برای



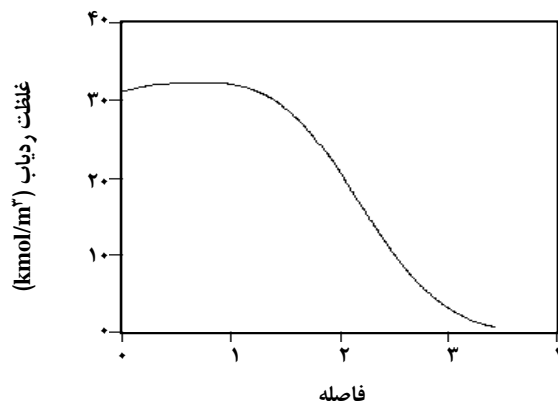
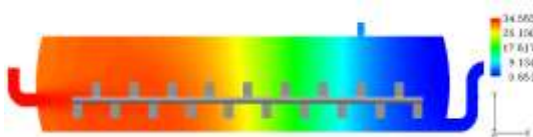
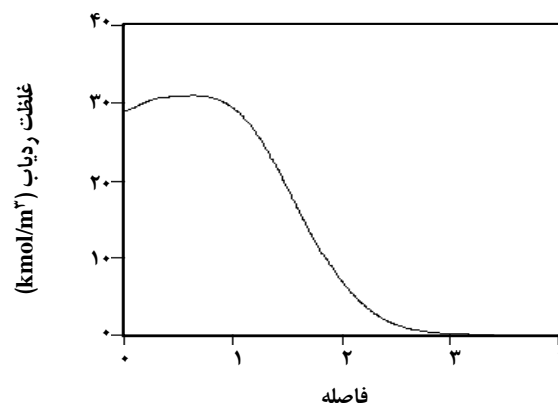
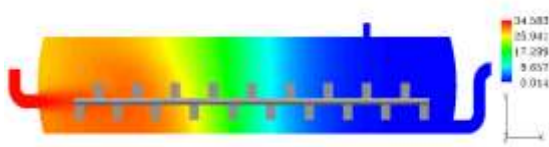
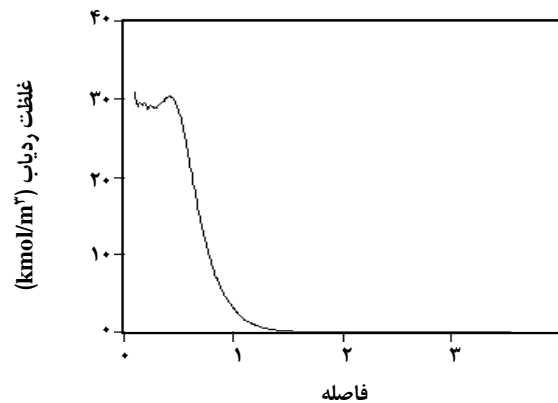
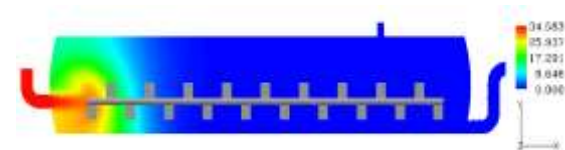
شکل ۶ - منحنی واسنجی غلظت کلرید سدیم بر حسب هدایت الکتریکی.

با استفاده از روش مخازن اختلاط کامل متوالی، آزمایش توزیع زمان ماند با ورود پله‌ای سدیم کلرید به راکتور انجام نمودار F غلظت خروجی ترسیم شد. در شکل ۷ نمودار غلظت بی‌بعد F، بر حسب زمان ماند رسم شده و همان‌گونه که دیده می‌شود با مقادیرهای آزمایشگاهی، همبستگی قابل قبولی دارد.

در شکل ۸ کانتور و منحنی غلظت ردیاب دیده می‌شود. همان‌گونه که از شکل پیداست با کارکرد سامانه و پیشروی ردیاب در طول راکتور، شکل منحنی غلظت از حالت پلاگ ایده‌آل دور می‌شود. دلیل این امر پخش‌شدگی یا انتشار محوری ماده‌ی ردیاب می‌باشد. ضریب پخش‌شدگی  $D$  ( $m^2/s$ ) بیان‌کننده‌ی این فرایند انتشار می‌باشد. بنابراین  $D$  بزرگ نشان‌دهنده‌ی انتشار سریع،  $D$  کوچک نشان‌دهنده‌ی انتشار آهسته و  $D=0$  نشان‌دهنده‌ی جریان بدون انتشار می‌باشد، مانند راکتور پلاگ ایده‌آل که در آن انتشار محوری صفر است.

## نتیجه‌گیری

مدل عددی سه‌بعدی (3D) دو فازی برای شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی و توزیع غلظت‌های مولی متان و کربن دی‌اکسید و واکنش‌دهنده‌ها برای فرایند هضم بی‌هوازی در راکتور پلاگ توسعه داده شد. مدل براساس اصل‌های بقای جرم، بقای انرژی، انتقال گونه‌ها و واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. همچنین ممنتوم و آشفتگی نیز در مدل در نظر گرفته شد. البته می‌توان در سرعت‌های پایین هم‌زن از ممنتوم و آشفتگی در مدل صرف نظر کرد زیرا سرعت سیال در این حالت کم می‌باشد. بازه‌ی تغییر غلظت مولی برای گونه‌ی متان بین  $4/42 \times 10^{-3}$  تا



شکل ۸- کانتور و منحنی غلظت ردیاب در صفحه‌ی  $Z=0$  و  $TS=12/1$  (الف) در زمان ۱۰۰۰ ثانیه، (ب) در زمان ۳۸۰۰ ثانیه و (ج) در زمان ۵۳۶۰ ثانیه

بررسی اثر رژیم همزدن بر جدایش HRT از SRT به منظور بهینه کردن بیوگاز تولیدی و بازده متان، ضمن این که کل انرژی ورودی کمینه شود، لازم است.

جدا کردن HRT از SRT می‌باشد. این جدا کردن باعث حفظ نسبت بالای SRT/HRT و جلوگیری از شسته شدن موجودهای بی‌هوای آهسته رشد جلوگیری می‌کند. کارهای پیش‌تری برای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۰

## مراجع

- [1] Khanal S.K., "Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications": John Wiley & Sons, Inc., USA, (2008).
- [2] Deublein D. and Steinhauser A., "Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction", 1st ed.: Wiley-VCH, (2008).
- [3] Cao Y. and Pawłowski A., Sewage Sludge-to-Energy Approaches Based on Anaerobic Digestion and Pyrolysis: Brief Overview and Energy Efficiency Assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**: 1657-1665 (2012).
- [4] Cheng J., "Biomass to Renewable Energy Processes", 1st ed.: CRC Press Inc., (2010).
- [5] Appels L., Baeyens J., Degrève J., Dewil R., Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **34**: 755-781 (2008).
- [6] Bouallagui H., Touhami Y., Ben Cheikh R., Hamdi M., Bioreactor Performance in Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Wastes, *Process Biochem*, **40**: 989-995 (2005).
- [7] Batten J. J., Design of a Plug Flow Reactor, *Combust. Sci. Technol.*, **1**: 365-367 (1970).
- [8] Chen C. R., The State of the Art Review on the Application of Anaerobic Digestion, *Conservation and Recycling*, **7**: 191-198 (1984).
- [9] Rintala J. A. Ahring B. K., Thermophilic Anaerobic Digestion of Source-Sorted Household Solid Waste: The Effects of Enzyme Additions, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **40**: 916-919 (1994).
- [10] Gunaseelan V. N., Anaerobic Digestion of Biomass for Methane Production: A Review, *Biomass Bioenergy*, **13**: 83-114 (1997).
- [11] Husain A., Mathematical Models of the Kinetics of Anaerobic Digestion - A Selected Review, *Biomass Bioenergy*, **14**: 561-571 (1998).
- [12] Weedermann M., Seo G., Wolkowicz G. S. K., Mathematical Model of Anaerobic Digestion in a Chemostat: Effects of Syntrophy and Inhibition, *J. Biol. Dyn.*, **7**: 59-85 // (2013).
- [13] Andrews J. F., Dynamic Model of Anaerobic Digestion Process, *Purdue Univ-Eng Extension Ser*, **132**: 285-310 (1969).
- [14] Salminen E. Rintala J., Anaerobic Digestion of Organic Solid Poultry Slaughterhouse Waste - A Review, *Bioresour Technol.*, **83**: 13-26 (2002).
- [15] Zakarya I. A., Abustan I., Ismail N., Yusoff M.S., Production of Methane Gas from Organic Fraction Municipal Solid Waste (OFMSW) via Anaerobic Process: Application Methodology for the Malaysian Condition, *International Journal of Environment and Waste Management*, **12**: 121-129 (2013).
- [16] Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T.R., Kohli S., Rana V., Enhancement of Biogas Production from Solid Substrates Using Different Techniques-a Review, *Bioresour. Technol.*, **95**: 1-10 (2004).

- [17] Demirel B., Yenigun O., Onay T. T., [Anaerobic Treatment of Dairy Wastewaters: A Review](#), *Process Biochem.*: **40**: 2583-2595 (2005).
- [18] Aiyuk S., Forrez I., van Haandel A., Verstraete W., [Anaerobic and Complementary Treatment of Domestic Sewage in Regions with Hot Climates-A Review](#), *Bioresour Technol.*, **97**: 2225-2241 (2006).
- [19] Leitão R. C., Van Haandel A. C., Zeeman G., Lettinga G., [The Effects of Operational and Environmental Variations on Anaerobic Wastewater Treatment Systems: A Review](#), *Bioresour Technol.*, **97**: 1105-1118 (2006).
- [20] Keshtkar A., Meyssami B., Abolhamd G., Ghaforian H., Khalagi Asadi M., [Mathematical Modeling of Non-Ideal Mixing Continuous Flow Reactors for Anaerobic Digestion of Cattle Manure](#), *Bioresour Technol.*, **87**: 113-124 (2003).
- [21] Lindmark J., Thorin E., Bel Fdhila R., Dahlquist E., [Effects of Mixing on the Result of Anaerobic Digestion: Review](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**: 1030-1047 (2014).
- [22] Wu B., [CFD Analysis of Mechanical Mixing in Anaerobic Digesters](#), *Transactions of the ASABE*, **52**: 1371-1382 (2009).
- [23] Kaparaju P., Buendia I., Ellegaard L., Angelidakia I., [Effects of Mixing on Methane Production During Thermophilic Anaerobic Digestion of Manure: Lab-Scale and Pilot-Scale Studies](#), *Bioresour Technol*, **99**: 4919-4928 (2008).
- [24] Karim K., Hoffmann R., Thomas Klasson K., Al-Dahhan M. H., [Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mode of Mixing](#), *Water Res.*, **39**: 3597-3606 (2005).
- [25] Chen Y., Cheng J. J., Creamer K.S., [Inhibition of Anaerobic Digestion Process: A Review](#), *Bioresour Technol.*, **99**: 4044-4064 (2008).
- [26] Lesteur M., Bellon-Maurel V., Gonzalez C., Latrille E., Roger J., Junqua G., Steyer J.P., [Alternative Methods for Determining Anaerobic Biodegradability: A Review](#), *Process Biochem.*, **45**: 431-440 (2010).
- [27] Amani T., Nosrati M., Sreekrishnan T., [Anaerobic Digestion from the Viewpoint of Microbiological, Chemical, and Operational Aspects-A Review](#), *Environ Rev.*, **18**: 255-278 (2010).
- [28] Zhang Z., Li W., Zhang G., and Xu G., [Impact of Pretreatment on Solid State Anaerobic Digestion of Yard Waste for Biogas Production](#), *World. J. Microbiol. Biotechnol.*, **30**: 547-554 (2014).
- [29] Markowski M., Białobrzewski I., Zieliński M., Dębowski M., Krzemieniewski M., [Optimizing Low-Temperature Biogas Production from Biomass by Anaerobic Digestion](#), *Renewable Energy*, **69**: 219-225 (2014).
- [30] Hurtado F. J., Kaiser A. S., Zamora B., [Fluid Dynamic Analysis of a Continuous Stirred Tank Reactor for Technical Optimization of Wastewater Digestion](#), *Water. Res.*: **71**: 282-293 (2015).

- [31] Azargoshasb H., Mousavi S., Amani T., Jafari A., Nosrati M., [Three-Phase CFD Simulation Coupled with Population Balance Equations of Anaerobic Syntrophic Acidogenesis and Methanogenesis Reactions in a Continuous Stirred Bioreactor](#), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **27**: 207-217 (2015).
- [32] Wu B., [Advances in the use of CFD to Characterize, Design and Optimize Bioenergy Systems](#), *Comput Electron Agric*, **93**: 195-208 (2013).
- [33] Craig K. J., Nieuwoudt M. N., Niemand L. J., [CFD Simulation of Anaerobic Digester with Variable Sewage Sludge Rheology](#), *Water Res.*, **47**: 4485-4497 (2013).
- [34] Wu B., [CFD Investigation of Turbulence Models for Mechanical Agitation of Non-Newtonian Fluids in Anaerobic Digesters](#), *Water Res.*, **45**: 2082-2094 (2011).
- [35] Shah F. A., Mahmood Q., Rashid N., Pervez A., Raja I. A., Shah M.M., [Co-Digestion, Pretreatment and Digester Design for Enhanced Methanogenesis](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **42**: 627-642 (2015).
- [36] Tiwary A., Williams I.D., Pant D.C., Kishore V.V.N., [Emerging Perspectives on Environmental Burden Minimisation Initiatives from Anaerobic Digestion Technologies for Community Scale Biomass Valorisation](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **42**: 883-901 (2015).
- [37] Yu L., Ma J., Chen S., [Numerical Simulation of Mechanical Mixing in High Solid Anaerobic Digester](#), *Bioresour Technol.*, **102**: 1012-1018 (2011).
- [38] Wu B., [Large Eddy Simulation of Mechanical Mixing in Anaerobic Digesters](#), *Biotechnol. Bioeng.*, **109**: 804-812 (2012).
- [39] Terashima M., Goel R., Komatsu K., Yasui H., Takahashi H., Li Y., et al., [CFD Simulation of Mixing in Anaerobic Digesters](#), *Bioresour Technol.*, **100**: 2228-2233 (2009).
- [40] Bridgeman J., [Computational Fluid Dynamics Modelling of Sewage Sludge Mixing in an Anaerobic Digester](#), *Adv. Eng. Software*, **44**: 54-62 (2012).
- [41] Alexandra M.M., [Modeling Flow Inside an Anaerobic Digester by CFD Techniques](#), *Energy and Environment*, **2**: 963-974 (2011).
- [42] Wu B., Bibeau E. L., Gebremedhin K.G., [Three-Dimensional Numerical Simulation Model of Biogas Production for Anaerobic Digesters](#), *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*, **51**: 8.1-8.7 (2009).
- [43] Wadhvani R. Mohanty B., [Computational Fluid Dynamics Study of a Complete Coal Direct Chemical Looping Sub-Pilot Unit](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCCE)*, **35**(3): 139-153 (2016).
- [44] Rasouli M., Ajabshirchi Y., Mousavi S. M., Nosrati M., Yaghmaei S., [Process Optimization and Modeling of Anaerobic Digestion of Cow Manure for Enhanced Biogas Yield in a Mixed Plug-Flow Reactor Using Response Surface Methodology](#), *Biosci Biotech R Asia*, **12**: 2333-2344 (2015).
- [45] Roache P. J., ["Verification and Validation in cComputational Science and Engineering"](#), Hermosa Publishers, Albuquerque, New Mexico., (1998).

- [46] Committee V., "Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer", American Society of Mechanical Engineers, New York, (2009).
- [47] Jahoda M., Tomášková L., Moštek M., CFD Prediction of Liquid Homogenisation in a Gas-Liquid Stirred Tank, *Chem. Eng. Res. Des.*, **87**: 460-467 (2009).
- [48] Ding J., Wang X., Zhou X.-F., Ren N.-Q., Guo W.-Q., CFD Optimization of Continuous Stirred-Tank (CSTR) Reactor for Biohydrogen Production, *Bioresour Technol.*, **101**: 7005-7013 (2010).
- [49] Bhole M., Joshi J., Ramkrishna D., CFD Simulation of Bubble Columns Incorporating Population Balance Modeling, *Chem. Eng. Sci.*, **63**: 2267-2282 (2008).
- [50] Versteeg H. K., Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", 2nd ed.: Pearson Education, (2007).
- [51] Patankar S., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill, New York, USA, (1980).
- [52] Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B. K., A Mathematical Model for Dynamic Simulation of Anaerobic Digestion of Complex Substrates: Focusing on Ammonia Inhibition, *Biotechnol. Bioeng.*, **42**: 159-166 (1993).
- [53] Gerardi M. H., "Wastewater Microbiology Series: The microbiology of Anaerobic Digesters", United States, America: John Wiley & Sons, Inc (2003).
- [54] Fluent I., "FLUENT 6.3 User's Guide," ed: Fluent, Inc. Lebanon, NH, Inc. Ed. (2006).
- [55] Wu B., CFD Simulation of Gas and non-Newtonian Fluid Two-Phase Flow in Anaerobic Digesters, *Water Res.*, **44**: 3861-3874 (2010).
- [56] Karim K., Varma R., Vesvikar M., Al-Dahhan M.H., Flow Pattern Visualization of a Simulated Digester, *Water Res.*, **38**: 3659-3670 (2004).