

تحليل هيدروديناميكي فرايند تصفيه پساب پالايشگاهي در يك راکتور UASB با استفاده از ديناميك سيالات محاسباتي

رضا حيدري، سيد محمد موسوي*، آرزو جعفري، سيد اميد رستگار

تهران، دانشگاه تربيت مدرس، دانشکده مهندسي شيمي

(تاريخ تحویل: ۹۳/۰۷/۰۸ - تاريخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۰۳)

چکیده

امروزه با گسترش صنعت، پساب‌های مخرب محیط زیست فراواني تولید می‌شود. در میان روش‌های تصفيه پساب، به روش‌های بی‌هوازی به دليل مزایای فراوان توجه بسیاری شده است. در بین سیستم‌های بی‌هوازی، راکتور بی‌هوازی جریان بالارو در این زمینه قابلیت‌های بسیاری دارد. در این تحقیق، با استفاده از تکنیک ديناميك سيالات محاسباتي، هيدروديناميك راکتور سه فازي مطالعه شده است. نتایج اولیه این تحقیق نشان داد که هندسه سه‌بعدی بیوراکتور نسبت به دوبعدی آن با دقت بیشتری رفتار هيدروديناميكي فازها در فرايند تصفيه پساب را پیش‌بینی می‌کند. بنابراین راکتور سه‌بعدی مبنای شبیه‌سازی‌ها قرار گرفت. برهم‌کنش فازها بر اساس مدل اولرین بررسی و برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شد، سپس نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. درصد کاهش COD و میزان تولید بیوگاز همخوانی خوبی با نتایج آزمایش دارد. بررسی نتایج عددی در ارتفاع‌های مختلف راکتور نشان می‌دهد که کانالیزه‌شدن جریان در ارتفاع ۲۰-۴۰ سانتی‌متری مشهود است و وجود گرانول در این راکتور سبب به‌وجود آمدن یک الگوی نامنظم جریان می‌شود. همچنین افزایش زمان ماند در راکتور به تولید بیشتر بیوگاز و در نتیجه کاهش بیشتر COD منجر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، تصفيه پساب، ديناميك سيالات محاسباتي (CFD)، راکتور بی‌هوازی جریان بالارو، مدل اولرین.

۱. مقدمه

راکتور UASB^۱ یکی از کارآمدترین تجهیزات برای تصفيه بی‌هوازی پساب‌هاست. شایان ذکر است که فرايند بی‌هوازی به‌کارگرفته‌شده در این راکتور برای تصفيه پساب بسیار مؤثر و کارآمد است. در مقایسه با واحدهای هوازی، بیوراکتور UASB به فضا و انرژی کمتری نیاز دارد. علاوه بر این به دليل اختلاطی که از صعود حباب‌های گاز و جریان بالارو پساب حاصل می‌شود، به بعضی از مراحل مانند تزریق مواد مغذی^۲ (نیترژن و فسفر) نیاز کمتری است. لجن تولیدشده در بیوراکتور UASB حجم بسیار کمی دارد. علاوه بر آن به هیچ وسیله مکانیکی- حرکتی و تصفيه ثانویه نیازی نیست. استفاده از راکتور UASB به جای روش‌های هوازی، هزینه عملیاتی و اولیه را کاهش می‌دهد [۳]. همچنین ثابت

سوخت‌های فسیلی منابع مناسبی برای تولید انرژی هستند که استفاده از آنها موجب مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. بخشی از این مشکلات ناشی از پساب‌های پالایش و احتراق سوخت‌های فسیلی است. حل این مشکلات نیازمند بررسی روش‌های مختلف تصفيه از جمله روش‌های بیولوژیکی است. روش‌های تصفيه بیولوژیکی به دليل اثربخشی و بازدهی زیاد در صنعت، به‌سرعت در حال رشدند. پساب‌های صنعتی به دليل سمی‌بودن و آثار زیانبارشان همواره از لحاظ زیست محیطی جزو نگرانی‌های بشر بوده‌اند، بنابراین پژوهش‌های بسیاری در زمینه تصفيه بیولوژیکی آنها انجام شده است [۱-۲].

UASB به کمک دینامیک سیالات محاسباتی است. شایان ذکر است که اعتبارسنجی نتایج عددی از مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده است [۸].

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. سیستم بیوراکتور آزمایشگاهی

ساختار بیوراکتور به‌کاررفته در این تحقیق در شکل ۱ الف داده شده است. این راکتور از نوع شیشه‌ای دوجداره است که دمای جداره درونی با استفاده از جریان آب گرم بین دو دیواره یا با استفاده از پوشش حرارتی در شرایط مزوفیل (۱ ± ۳۸) درجه سانتی‌گراد نگه داشته می‌شود. ارتفاع این راکتور ۱۰۵ سانتی‌متر، قطر آن ۱۰ سانتی‌متر و حجم کلی آن ۶/۲۸ لیتر است. در بالای راکتور یک خروجی مخروطی شکل وجود دارد که گاز تولیدشده پس از جداسدن توسط این مخروطی برعکس، در مخزن ذخیره می‌شود.

گرانول‌های موجود در بستر ۳۰ درصد حجم راکتور را اشغال کرده‌اند. اندازه گرانول‌ها بین ۱-۳ میلی‌متر و چگالی و گرانروی دینامیکی آن‌ها به ترتیب ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۵ مگاپاسکال ثانیه است. مخلوطی از لجن صنایع لبنی پگاه (تهران- ایران) به عنوان خوراک این راکتور استفاده شد. جزئیات بیشتر درباره راه‌اندازی و شرایط پایای راکتور در [۸] شرح داده شده است.

۲.۲. شبیه‌سازی فرایند

۱.۲.۲. معادلات حاکم بر سیستم

مدل اولرین-اولرین به عنوان پیچیده‌ترین مدل چندفازی در Fluent مطرح است. در این مدل، یک مجموعه n معادله‌ای از معادلات مومنتوم و پیوستگی برای هر فاز حل می‌شود. پارامترهای فشار و تبادلات فازی موجب ارتباط بین معادلات می‌شود و حل همزمان آن‌ها را ممکن می‌سازد. از مدل اولرین-اولرین در بررسی ستون‌های حباب‌دار، راکتورهای هوابالارو^۴، مخازن حاوی سوسپانسیون ذرات و بسترهای سیالی استفاده شده است [۹-۱۰]. بنابراین، در این شبیه‌سازی که رفتار کلی بیوراکتور مد نظر است، استفاده از مدل چندفازی اولرین مناسب است [۱۱].

شده است که این راکتور برای بارهای آلی متوسط تا زیاد در بازه‌های وسیعی از زمان ماند^۱، ۳-۴۸ ساعت، رفتار بهینه‌ای از خود نشان می‌دهد [۴].

تولید بیوگاز ممکن است نتیجه فرایندهای بی‌هوازی پساب باشد که علاوه بر تولید انرژی در کنترل بو نیز مؤثر است. یکی از روش‌هایی که در آن می‌توان گاز زیادی به دست آورد، تصفیه پساب به روش UASB است. از این رو در کنار تصفیه پساب‌ها می‌توان از جنبه تولید انرژی نیز به این راکتور نگاه کرد [۵].

تصفیه بیولوژیکی پساب‌ها یک فرایند چندفازی، فیزیکی-شیمیایی-بیولوژیکی است که در آن تعامل‌های سه‌گانه گاز، جامد و مایع رخ می‌دهد. بنابراین بیوراکتورها فرایند پیچیده‌ای دارند و بررسی پدیده‌های انتقال و هیدرودینامیک فازها در راکتورها، اطلاعات مفیدی را درباره عملکرد آن‌ها فراهم می‌کند. همچنین درک صحیح از اینکه یک بیوراکتور چگونه کار می‌کند، تأثیر مستقیمی در طراحی و بازده آن خواهد داشت. در بررسی جریان سیالات در یک بیوراکتور استفاده از روش آزمایشگاهی بسیار زمانبر است و به دلیل کمبود تجهیزات، محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری صحیح وجود دارد.

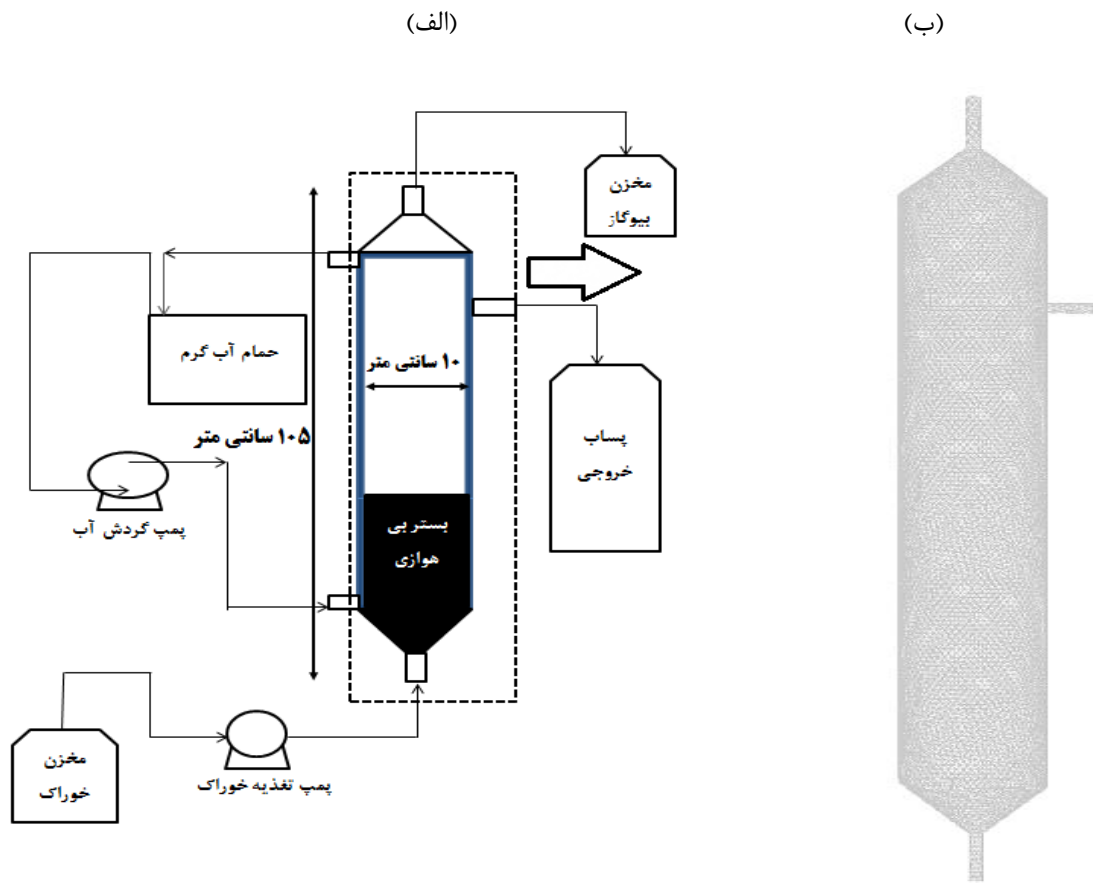
دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۲ با استفاده از حل عددی معادلات حاکم بر سیستم روشی برای پیش‌بینی جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش و سایر پدیده‌های مرتبط است. هنگامی که پارامترهایی از سیال مانند فشار، دما و سرعت قابل اندازه‌گیری مستقیم نیستند، استفاده از تکنیک CFD کمک شایانی خواهد کرد [۶]. شبیه‌سازی به کمک CFD و با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف تجاری، کاربردهای بسیاری در زمینه محیط زیست و تصفیه پساب پیدا کرده است که از آن جمله می‌توان به بررسی هیدرودینامیک بیوراکتورها اشاره کرد؛ برای مثال با استفاده از CFD الگوی جریان در هاضم^۳ بی‌هوازی بررسی شده است [۷]. تا به حال شبیه‌سازی‌هایی برای سایر انواع راکتورها مانند UASBR، ABR و CSTR انجام شده است، اما شبیه‌سازی سه‌فازی تصفیه بی‌هوازی با استفاده از راکتور UASB برای تصفیه پساب‌های نفتی انجام نشده است. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی انتقال جرم و بررسی رفتار هیدرودینامیکی فازهای مختلف در بیوراکتور بی‌هوازی

1. Hydraulic Retention Time (HRT)

3. Digester

2. Computational Fluid Dynamics (CFD)

4. Air-lift Reactors



شکل ۱. الف) شماتیک راکتور UASB آزمایشگاهی (ب) شبکه به کاررفته در این تحقیق

تنش در فاز گاز:

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g \left\{ [\nabla \bar{u}_g + (\nabla \bar{u}_g)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}_g) \bar{I} \right\} \quad (۳)$$

تنش فاز جامد:

$$\bar{\tau}_p = p_p \bar{I} + \varepsilon_p \mu_p \left\{ [\nabla \bar{u}_p + (\nabla \bar{u}_p)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}_p) \bar{I} \right\} \quad (۴)$$

که در اینجا چگالی فاز k و ε_k جزء حجمی فاز k و u_k سرعت برداری فاز k است.

فرض بر این است که فازهای جامد و گاز غیر قابل تراکم باشد که این موضوع به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \bar{u}_k) = 0 \quad (۵)$$

مدل تلاطم به کاررفته در این راکتور، مدل استاندارد $k - \varepsilon$ است. با توجه به اینکه شبیه‌سازی جریان‌های درهم چندفازی پیچیده است و نیز اثر برهم‌کنش بین فازها بار محاسباتی زیادی به دنبال خواهد داشت، در این تحقیق فرض شده است که تلاطم محدود به فاز اصلی است. معادلات

در مدل اولرین-اولرین فازها به صورت محیط‌های با قابلیت نفوذ در یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند و به دلیل اینکه حجم یک فاز نمی‌تواند توسط فازهای دیگر اشغال شود، جزء حجمی تعریف می‌شود. همچنین پساب، حجم پیوسته و فاز گاز و گرانول، فاز پراکنده در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. شایان ذکر است که در استفاده از مدل چندفازی اوپلری، مقدار حافظه برای پردازش و رفتار همگرایی، تعداد فازهای پراکنده در فاز اصلی را محدود می‌کند [۶].

معادلات بقای جرم و مومنتوم استفاده شده در این تحقیق در زیر ارائه شده است [۱۳]:

معادله بقای جرم برای فازهای گاز و جامد ($k=g,p$):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_k \rho_k) + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \bar{u}_k) = 0 \quad (۱)$$

معادله بقای مومنتوم برای فازهای گاز و جامد ($k=g,p$):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_k \rho_k \bar{u}_k) + \nabla \cdot (\varepsilon_k \rho_k \bar{u}_k \bar{u}_k) = -\varepsilon_k \nabla \rho_k + \nabla \cdot \bar{\tau}_k - \beta (\bar{u}_k - \bar{u}_k) + \varepsilon_k \rho_k \bar{g} \quad (۲)$$

تغییرات انرژی جنبشی تلاطم (k) و میزان اتلاف انرژی برای فاز اصلی در زیر نشان داده شده است:

$$\frac{D\lambda_L \rho_L k_L}{Dt} = \nabla \left(\lambda_L \left(\mu + \frac{\mu_{t,L}}{\sigma_{kL}} \right) \nabla k_L \right) + \lambda_L \rho_L (p_{kL} - \varepsilon_L) + \lambda_L \rho_L \prod_{kL} \quad (۶)$$

$$\frac{D\lambda_L \rho_L \varepsilon_L}{Dt} = \nabla \left(\lambda_L \left(\mu + \frac{\mu_{t,L}}{\sigma_{\varepsilon L}} \right) \nabla \varepsilon_L \right) + \lambda_L \rho_L (C_{\varepsilon 1} p_{kL} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon_L) + \lambda_L \rho_L \prod_{\varepsilon L} \quad (۷)$$

که در اینجا \prod_{kL} اثر فاز ثانویه بر فاز اصلی را بیان می کند و مقدار تلاطم فاز پراکنده را پیش بینی می کند و $\prod_{\varepsilon L}$ مقدار تلاطم فاز ثانویه را پیش بینی می کند [۱۳-۱۴]. ویسکوزیته تلاطم فاز پیوسته با استفاده از مدل تلاطم $k - \varepsilon$ از طریق رابطه ۸ به دست خواهد آمد. مقادیر ثابت مدل، $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ و $\mu_{t,L}$ در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$\mu_{t,L} = C_{\mu} \rho_L \left(\frac{k_L}{\varepsilon_L} \right) \quad (۸)$$

جدول ۱. ثوابت مدل

$\mu_{t,L}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 1}$
۰/۰۹	۱/۹۲	۱/۴۴

۲.۲.۲. ساخت هندسه و پارامترهای شبیه سازی

در این تحقیق، ابتدا ساختار هندسی بیوراکتور کامل در فضای دوبعدی و سه بعدی ایجاد و شبکه بندی هندسه در هر دو بعد با استفاده از پیش پردازنده Gambit انجام شد. استقلال نتایج عددی از اندازه شبکه برای هر دو هندسه مطالعه شد. برای این منظور سه شبکه مختلف در نظر گرفته شد و سرعت مایع خروجی و میزان بیوگاز تولیدی پس از ۲۰ ثانیه برای سرعت ورودی پساب ۰/۴ متر بر ساعت مبنای مقایسه نتایج قرار گرفت (جدول ۲). همان گونه که جدول ۲ نشان می دهد، شبکه ۲ برای هر دو هندسه دوبعدی و سه بعدی بهترین انتخاب است، زیرا نسبت به شبکه ۳، درصد خطای نسبی قابل قبولی دارد و نیز انجام محاسبات به دلیل تعداد المان کمتر، سریع تر است. همچنین مقایسه نتایج گزارش شده در جدول ۲ برای شبکه ۲ در دو حالت هندسه

دوبعدی و سه بعدی گویای این حقیقت است که خطای نسبی داده های عددی هندسه دوبعدی نسبت به سه بعدی بسیار زیاد است. بنابراین با اینکه هندسه دوبعدی نسبت به سه بعدی هزینه محاسباتی کمتری نیاز دارد، به دلیل نداشتن دقت کافی شبیه سازی سه بعدی مبنای کار قرار گرفت و در نهایت برای بیوراکتور مورد نظر در این تحقیق از $10^5 \times 3/6$ المان سه بعدی Tet/Hybrid از نوع Tgrid استفاده شد. شکل ۱. ب شبکه بندی به کاررفته در این پژوهش را نشان می دهد.

در این پژوهش، پساب به عنوان یک مخلوط شامل آب خالص و گلوکز (فاز مایع- فاز اصلی) در نظر گرفته شده است که به بیوراکتور وارد می شود. همچنین در شرایط اولیه مخلوطی از گازها که ۹۰ درصد آن متان و و بقیه شامل گازهای دی اکسید کربن، مونوکسید کربن و سولفید هیدروژن است، به عنوان فاز گاز (فاز ثانویه) تعریف شده است. مشابه با شرایط آزمایشگاهی فرض شده است که ۳۰ درصد از فضای راکتور با گرانول های کروی پر شده باشد.

برای ورودی راکتور از شرط مرزی سرعت ورودی، برای خروجی ها نیز از شرط مرزی فشار خروجی و برای دیواره ها از شرط مرزی دیواره بدون لغزش استفاده شد. معادلات حاکم بر سیستم در شرایط ناپایا و بر اساس فشار محور^۱ حل شدند. برای انجام شبیه سازی گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه و معیار همگرایی 10^{-3} انتخاب شد. فاکتورهای زیر تخفیف که تأثیر بسزایی بر همگرایی روش های عددی دارند، ۰/۳ برای فشار، ۰/۷ برای مومنتوم و ۰/۲ برای کسر حجمی در نظر گرفته شدند و میزان قابل قبولی از همگرایی حاصل شد.

برهم کنش بین فازها به وسیله تبادل مومنتوم یا درگ بیان می شود که این ضرایب بر اساس رابطه همبسته درگ شیلر و نومان^۲ (رابطه ۹) به دست آمده اند. در تمام تست ها، فرض شده است که قطر حباب ۲ میلی متر است [۱۵] و نیز گاز وقتی آزاد خواهد شد که موازنه نیرو بین فاز گاز و جامد شکسته شود و گاز تولید شده در لایه گرانول ها^۳ جمع شود.

(۹)

$$C_D = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15 Re^{0.75})}{Re} & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

1. Pressure Based Solver
2. Schiller and Numan
3. Sludge Blanket

جدول ۲. سرعت خروجی فاز مایع و میزان بیوگاز تولیدشده پس از ۲۰ ثانیه برای شبکه‌های مختلف در هندسه‌های دوبعدی و سه‌بعدی

شبکه	تعداد المان	سرعت مایع خروجی (m/s)	میزان بیوگاز تولید شده (m ³ /s)
هندسهٔ دوبعدی			
۱	۸۲۱۶	۰/۰۳۶	۰/۱۰
۲	۲۲۱۰۰	۰/۰۴۹	۰/۱۸
۳	۱۹۶۷۹۸	۰/۰۵	۰/۲۰
هندسهٔ سه‌بعدی			
۱	۱۱۴۵۱۴	۰/۰۲۴	۰/۱۵
۲	۳۵۶۴۵۵	۰/۰۰۷۶	۰/۲۷
۳	۱۵۳۱۱۷۱	۰/۰۰۸۵	۰/۲۹

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ارزیابی صحت مدل

یا زمان اقامت هیدرولیکی دارد [۱۶]. شایان ذکر است که بررسی توزیع فاز جامد در راکتور UASB اهمیت ویژه‌ای دارد. به عبارت دیگر، رفتار راکتور بستگی به توزیع گرانول‌ها به عنوان یک عامل کنترل‌کننده خواهد داشت [۱۷]. بنابراین در ادامه تحلیل هیدرودینامیکی گرانول‌ها و سپس سیالات در بیوراکتور توضیح داده شده است.

در جدول ۳، مقایسهٔ نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. همان‌گونه که از این جدول مشخص است، درصد کاهش COD پیش‌بینی‌شده توسط مدل شبیه‌سازی شده در مایع خروجی از بیوراکتور مشابه نتایج آزمایش [۸] است. این تشابه در مورد بیوگاز تولیدشده نیز مشهود است. حداکثر خطای نسبی داده‌های عددی حدود ۶ درصد است که ممکن است ناشی از استفادهٔ روش مرتبهٔ اول بالادست^۱ به جای به‌کارگیری مرتبهٔ دوم این روش باشد. لکن میزان خطا در محدودهٔ قابل قبول قرار دارد.

۳.۲. تحلیل فاز جامد (آنالیز توزیع گرانول‌ها)

با شروع تزریق پساب به داخل راکتور، ذرات گرانول با سرعت بسیار کمی به حرکت درمی‌آیند. با گذشت زمان و غلبهٔ پساب بر نیروی وزن و شناوری، ذرات گرانول سرعت بیشتری پیدا می‌کنند و به سمت بالا حرکت می‌کنند. بعد از عبور جریان مایع از گرانول‌ها سرعت گرانول‌ها کاهش می‌یابد. در برخی مسیرها نیز کانالیزه‌شدن جریان مایع به گرانول‌های کمتری که در مسیرش قرار دارد، سرعتی بیشتر از سرعت میانگین خواهد داد. در شکل ۲، توزیع جزء حجمی گرانول‌ها نشان داده می‌شود که از مهم‌ترین عامل‌های عملیاتی راکتور است. با ورود مایع، بستر گرانول‌ها در برابر حرکت مایع مقاومت می‌کنند، اما با گذشت زمان از این مقاومت کاسته شده و علاوه بر درگیرشدن گرانول‌ها با فاز مایع، با فاز گاز نیز تماس پیدا می‌کنند. براین‌دور نیروی درگ خوراک ورودی و نیروی بالابرندهٔ حباب‌های تولیدشده، به شناوری گرانول‌ها منجر می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پس از ۱۸ ثانیه مقداری از جریان آب کانالیزه شده و گرانول‌ها را به سمت مخالف هدایت می‌کند. لایه‌های ایجادشده در ارتفاع‌های مختلف، زمینهٔ واکنش (رابطهٔ ۱۰) را فراهم می‌کند. در ابتدا واکنش بین پساب و گرانول در بستر شکل می‌گیرد و با گذشت زمان این واکنش در راکتور پیش

جدول ۳. مقایسهٔ نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی [۸]

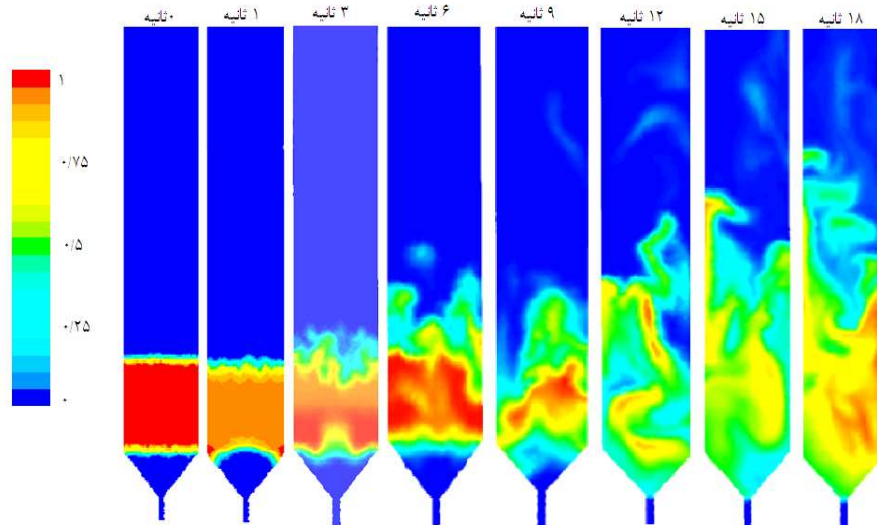
عددی	آزمایشگاهی
۸۰	۸۴
۵۰۰	۵۳۰

درصد کاهش COD
تولید بیوگاز (میلی لیتر)

۳.۲. تحلیل هیدرودینامیکی

در آغاز، شبیه‌سازی راکتور پر از آب بوده و داخل آن تا ارتفاع مشخص با گرانول پر شده است. خوراک (پساب) با سرعت ورودی ۰/۴ متر بر ساعت وارد راکتور می‌شود. ذرات جامد و گرانول‌ها پس از واردشدن پساب شروع به معلق‌شدن در داخل راکتور می‌کنند، اما با توجه به سرعت کم خوراک، این معلق‌شدن به صورت ناگهانی و با پراکندگی فراوان نخواهد بود.

غلظت گرانول‌ها در راکتور بستگی به تولید بیوگاز و یا میزان بار آلی COD در واحد سطح و سرعت بالاروی پساب و



شکل ۲. کانتور جزء حجمی گرانول‌ها در بیوراکتور در زمان‌های مختلف

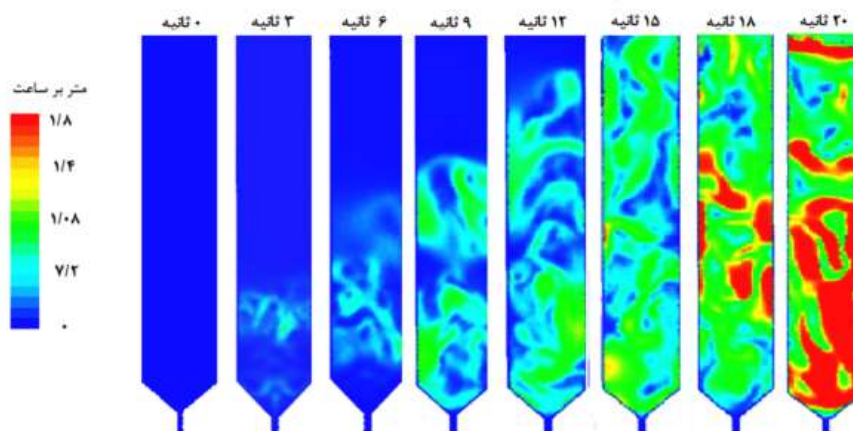
۲.۲.۳. تحلیل فاز مایع

در شکل ۳، کانتورهای مربوط به سرعت فاز مایع در بیوراکتور در زمان‌های مختلف نشان داده می‌شود. در ابتدا راکتور پر از آب بوده و به دلیل فعالیت بی‌هوازی هیچ‌گونه هوایی در راکتور وجود ندارد. وجود گرانول در این راکتور سبب به وجود آمدن یک الگوی نامنظم جریان می‌شود. پراکنده شدن گرانول‌ها در راکتور و تجمع آن‌ها در برخی نقاط سبب هدایت جریان مایع در مسیرهای مشخصی شده است. جریان وارد شده به راکتور با توجه به شکل مخروطی ابتدای آن، توزیعی متمایل به دیواره‌ها دارد و با بردارهایی مماس بر بدنه راکتور و با کاهش سرعت اولیه به دلیل افزایش قطر با حرکتی آرام و تقریباً یکنواخت به سمت بالا حرکت می‌کند. طبق الگوی جریان پلاگ، سرعت در مرکز بیشترین مقدار را دارد و با توجه به قانون نداشتن لغزش در دیواره‌ها به سمت دیواره کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، به دلیل افزایش برهم‌کنش بین جریان با گرانول‌ها، علاوه بر کاهش سرعت، الگوی جریان نیز نامنظم می‌شود. گذر از این بستر سبب کانالیزه شدن جریان می‌شود که این برای بیوراکتور نقص است و تماس مناسب و کافی بین خوراک و گرانول‌ها صورت نمی‌گیرد. نزدیک خروجی آب هم افزایش سرعت ناشی از بی‌تقارنی در خروجی مشاهده می‌شود. گرانول‌ها در بستر، توزیع یکنواختی ندارند، بنابراین پروفایل سرعت به وجود می‌آورند. تجمع گرانول‌ها، اختلاف فشار استاتیکی و یا اختلاف دانسیته مخلوط در نقاط مختلف راکتور موجب

می‌رود و به سطوح بالاتر می‌رسد. کانتور مربوط به جزء حجمی گرانول‌ها نشان‌دهنده این است که ناپیوستگی در جریان اختلاط وجود دارد. بدین معنا که توزیع گرانول از پایین به بالا کاهش می‌یابد.

حباب‌های گاز به سطح گرانول می‌چسبند و آن‌ها را از داخل بستر به بالا می‌کشند که به این فرایند، شناوری القایی گازها می‌گویند. تبدیل COD ورودی به گاز در هر مقطع متناسب با غلظت گرانول‌ها در آن سطح است که بیشترین تبدیل در نیمه پایین راکتور انجام می‌شود. طبق رابطه شناوری و نیروی درگ، قطر حباب باید اندازه لازم را داشته باشد تا بتواند ذرات را رو به بالا حرکت دهد. ذرات حباب با سرعت $0.18-0.5$ متر بر ساعت بالا می‌روند و به دلیل قانون شناوری القایی گاز یک روپوش از گرانول‌ها را تشکیل می‌دهد. هرچه ذرات بزرگ‌تر باشند، نیروی شناوری آن‌ها نیز بیشتر است. بنابراین یک سرعت نسبی بین حباب‌های گاز و مایع به وجود خواهد آمد که در نهایت سبب ایجاد چرخش^۱ می‌شود. به دنبال حرکت رو به بالای پسایی که غلظت زیادی از گرانول‌ها دارد، پساب‌هایی که غلظت کمی از گرانول‌ها دارند، رو به پایین حرکت می‌کنند تا جای آن‌ها را پر کنند. در حالت پایدار میزان ذراتی که بالا می‌روند با میزان ذراتی برابر می‌شوند که به دلیل جاذبه ته‌نشین می‌شوند. بنابراین در نهایت سطح گرانول‌ها ثابت خواهد بود.

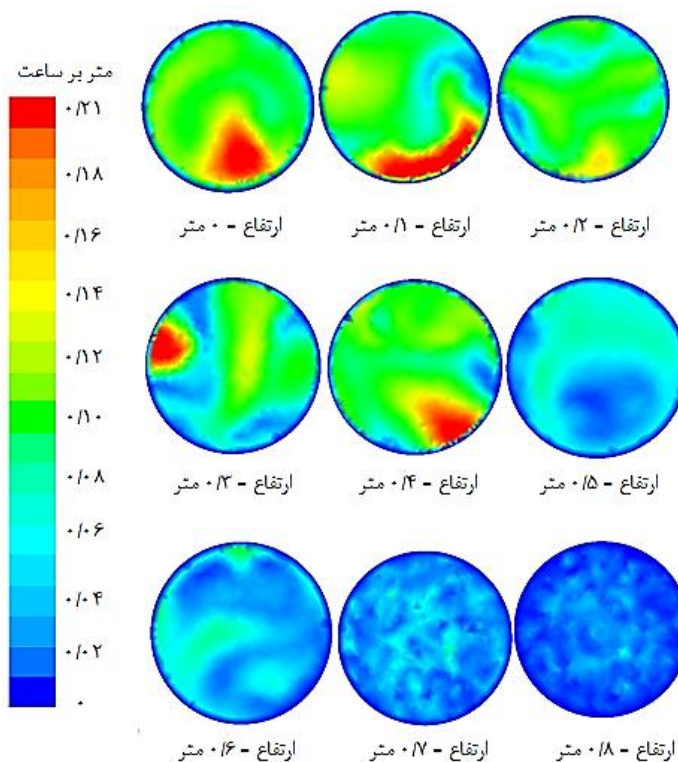
به وجود آمدن یک جریان متلاطم در راکتور می‌شود و به این معنی است که انرژی جنبشی در این نواحی بسیار است. تلاطم به وجود آمده بر میزان زمان اقامت گاز مؤثر است و موجب تأثیرپذیری حرکت رو به بالای فاز گاز می‌شود.



شکل ۳. کانتور سرعت فاز مایع در زمان‌های مختلف

جریان آب، مسیری جداگانه را در راکتور می‌پیماید. این مسیر حاوی گرانول کمتری است، بنابراین به فاز مایع برای حرکت رو به بالا سرعت بیشتری می‌دهد. حرکت مایع در بین ذرات گرانول و سرعت‌های متفاوت در بین این ذرات منجر به واکنش و اختلاط کامل در طول راکتور می‌شود.

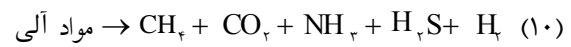
در شکل ۴، پروفایل سرعت مایع پس از رسیدن به همگرایی در سطح مقطع عرضی بیوراکتور برای ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، به دلیل نبودن توزیع یکسان گرانول‌ها، تقارنی در توزیع سرعت وجود ندارد. سرعت روی دیواره‌ها صفر است. مقداری از



شکل ۴. توزیع سرعت فاز مایع در سطح مقطع عرضی و در ارتفاع‌های مختلف بیوراکتور در زمان ۲۰ ثانیه

۳.۲.۳. تحلیل فاز گاز (آنالیز تولید بیوگاز)

در شکل ۵، کانتورهای مربوط به سرعت فاز گاز در راکتور به تصویر کشیده شده است. شایان ذکر است که مجموعه‌ای از ریزسازواره‌ها از طریق واکنش‌های متقابل، مواد آلی پیچیده با وزن مولکولی بالا را به متان و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌کنند. واکنش کلی تجزیه بی‌هوازی به صورت زیر است:

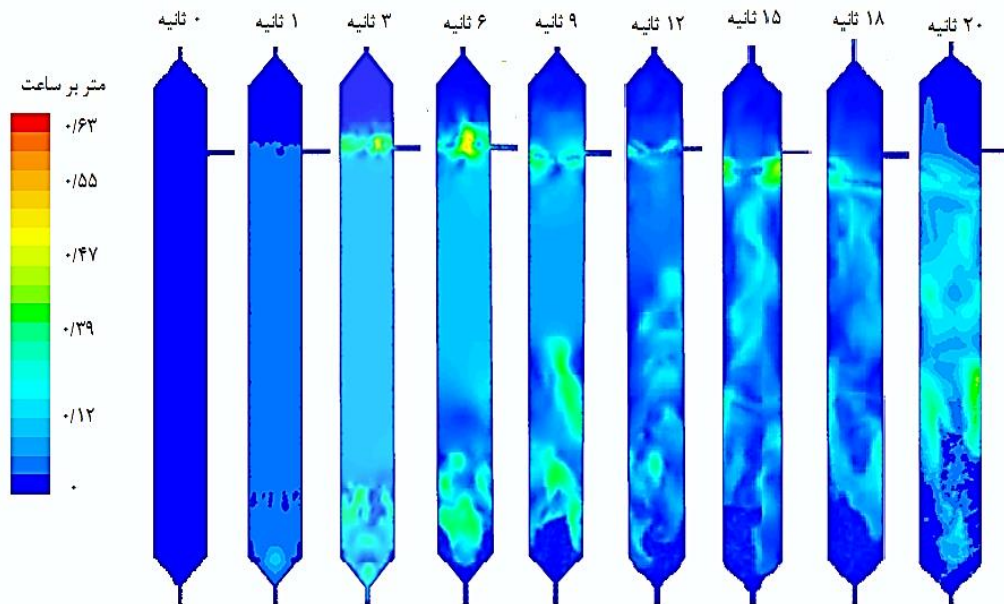


که در این تحقیق گلوکز به عنوان ماده آلی در نظر گرفته شد. بنابراین واکنش مربوط به تصفیه بی‌هوازی گلوکز که در نرم‌افزار تعریف شده است، به صورت زیر است:



مطابق شکل ۵، سرعت فاز گاز در شروع واکنش در

قسمت پایینی راکتور بیشتر است. با توجه به تئوری‌های مطرح‌شده در زمینه برهم‌کنش فاز گاز و فاز جامد این کانتورها قابل انتظار خواهد بود و با تئوری‌های مطرح‌شده مطابقت دارد [۱۸]. تراکم گرانول‌ها در قسمت پایینی راکتور ناهمگونی سرعت را به دنبال خواهد داشت. واکنش نیز بر سرعت فاز گاز تأثیرگذار است. با بالا رفتن در طول راکتور و با توجه به اینکه واکنش بیشتری انجام می‌شود، سرعت بیشتر خواهد بود. با گذر از بستر، سرعت در طول راکتور و قبل از رسیدن به ناحیه خروج فاز مایع یکنواخت می‌شود. با توجه به خروج فاز مایع و تلاطم ایجادشده، ناحیه خروجی فاز گاز نیز دچار تلاطم شده و سرعت این فاز بیشتر می‌شود. تلاطم در خروجی فاز مایع سبب هدایت فاز گاز به سمت مخالف خروجی می‌شود.



شکل ۵. کانتور سرعت گاز در بیوراکتور در زمان‌های مختلف

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فرایند تصفیه پساب پالایشگاهی در راکتور UASB با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده و تحلیل هیدرودینامیک جریان سه‌فازی در راکتور انجام شده است. با توجه به بررسی‌ها، می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- مدل اولرین توانایی خوبی در شبیه‌سازی این راکتور دارد.
- شبیه‌سازی سه‌بعدی بیوراکتور نسبت به دوبعدی جزئیات دقیق‌تری از سیستم را نشان می‌دهد.

فاز گاز تولیدشده در پایین راکتور، کناره‌های راکتور را برای پیمودن مسیر انتخاب می‌کند و گاز تولیدشده در میانه راکتور با توجه به کاهش جزء حجمی گرانول‌ها مسیر خود را در وسط راکتور ادامه می‌دهد. بیوگاز تولیدشده با سرعتی بیشتر از سرعت توده سیال رو به بالا حرکت می‌کند. گازهای تولیدشده با یک جریان چرخشی رو به بالا حرکت می‌کنند و این حرکت باعث می‌شود سرعت مایعی که به سمت بالا حرکت می‌کند بیشتر از سرعت ورودی پساب باشد.

گرانول‌ها در راکتور بر میزان کاهش COD و همچنین شرایط عملیاتی مؤثر خواهد بود.

- اندازهٔ گرانول‌ها و میزان فضای خالی بین آن‌ها بر هیدرودینامیک جریان و همچنین در میزان کاهش بار آلی تأثیر دارد.

- با توجه به ماهیت راکتور UASB و وجود گرانول‌ها، فاز مایع و فاز گاز، جریان ساختار پلاگ نخواهد داشت و هرچه سرعت ورودی بیشتر افزایش یابد، این ساختار بیشتر دگرگون می‌شود.
- با افزایش ارتفاع بستر گرانول‌ها در سیستم، مشاهده شد که سیستم کارایی مناسبی نخواهد داشت. بنابراین میزان

مراجع

- [1]. Vazquez, D., Quintero, R., (2004), "Petroleum biotechnology developments and perspectives", Mexico: Elsevier.
- [2]. Field, Sd., Marks, Re., Wojtanowics, Ak., (1991), "Advanced biological treatment and separation of hazardous constituents from petrochemical sludges", Journal of Hazardous Materials, Elsevier, Vol.28, No.2, pp.101-113.
- [3]. Seghezzi, L., (1998), A Review: "The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors", Bioresourcetchnology, Vol.65, No.3, pp.175-190.
- [4]. Puyol, D., Mohedano, A.F., Sanz, J.L., Rodriguez, J.J., (2009) "Comparison of UASB and EGSB performance on the anaerobic biodegradation of 2,4-dichlorophenol", Chemosphere, Vol.76, No.9, pp.1192-1198.
- [5]. Lim J.S., (2006), "Comparisons between the UASB and the EGSB reactor".
- [6]. Tli, J., HengYeoh, G., (2008), "Computational fluid dynamics a practical approach", USA: Elsevier.
- [7]. Craig, KJ., Nieuwoudt, MN., Niemand, LJ., (2013), "CFD Simulation Of Anaerobic Digester With Variable Sewage Sludge Rheology", Water Research, Vol.47, No.13, pp.4485-4497.
- [۸]. رستگار، ا.، (۱۳۹۰) "بهینه سازی عوامل مؤثر در فرایند تصفیه بیولوژیکی پساب پالایشگاه‌ها با استفاده از سامانه ترکیبی بیوراکتورهای بی‌هوایی جریان بالارو بستر آکنده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [9]. Patel, G.N., (2010), "CFD Simulation of Two-Phase And Three-Phase Flows In Internal-Loop Airlift Reactors, Master's thesis, Department of Mathematics and Physics", Lappeenranta University of Technology, Finland.
- [10]. Duangkhamchan, W., Ronsse, F., Dewettinck, K., (2011), "CFD study of solids concentration in a fluidized-bed coater with variation of atomization air pressure", Powder Technology, Vol.212, No.1, pp.103-114.
- [۱۱]. هاشم‌آبادی، ح.، دهنوی، م.ع.، (۱۳۹۰)، "شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی با نرم‌افزار FLUENT"، انتشارات اندیشه سرا، چاپ اول.
- [12]. Ranade. K., Vivek. V., (2002), "Computational flow modeling for chemical reactor engineering", San Diego, California : Academic Press.
- [13]. FLUENT 6.3 User's Guide, (2006), FLUENT Inc..
- [14]. Elghobashi S.E., Abouarab T.W., (1983), "A 2-Equation Turbulence Model For 2-Phase Flows", Physics of Fluids. Vol.26, No.4, pp.931-8.
- [15]. Wang, X., Ding, J., Ren, N., Liu, B., (2009), "CFD simulation of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor for biohydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.24, pp. 9686-9695.

- [16]. Yu L., Hai-Lou X., Shu-Fang Y., Joo H., (2003), "Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor", Water Research, Vol.37, No.3, pp.661–673, 2003.
- [17]. Ren, TT., Mu, Y., Ni, BJ., Yu, HQ., (2009), "Hydrodynamics Of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors", AICHE Journal, Vol.55, No.2, pp1124-37.
- [18]. Narnoli, S., Mehrotra, I., (1997), "Sludge Blanket of UASB Reactor: Mathematical Simulation, Pergamon", Vol.31, No.4, pp.715-26.