



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

1157P-NWWCE

شبیه سازی و تحلیل آزمایشگاهی بیوراکتور غشایی به منظور تصفیه پساب آب پنی

صدیقه احمد کیادلیری^۱، احمد رحیم پور^۲، رضا شعبانیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل

s.kiadaliri@stu.nit.ac.ir

خلاصه

صنایع لبنی از جمله اصلی ترین تولیدکننده های پساب با میزان مواد آلی بالا و حجم خروجی زیاد هستند. در این میان تصفیه پساب آب پنی قبل از ورود به طبیعت از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به قابلیت اطمینان، سادگی روش و مقرون به صرفه بودن فرایندهای بیولوژیکی، امروزه از بیوراکتورهای غشایی برای تصفیه پساب آب پنی استفاده شده است. از جمله مشکلات فرایندهای غشایی، پدیده گرفتگی غشا است. یکی از راه های موثر کاهش گرفتگی غشا، هوادهی است. از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری قدرتمند برای بررسی شرایط جریان بیوراکتور غشایی استفاده می شود. در این تحقیق اثر هیدرودینامیکی جریان دوفازی بر روی میزان گرفتگی غشای پلیمری ساخته شده در آزمایشگاه در ۵ نرخ هوادهی مختلف و سه هندسه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی از مدل سه بعدی اولر-اولر استفاده شده است. همچنین اثر بفل و فاصله بفل بر میزان فلاکس پرمیت و گرفتگی غشا مطالعه شده است.

کلمات کلیدی: بیوراکتور غشایی، پساب آب پنی، دینامیک سیالات محاسباتی، کاهش گرفتگی غشا

۱. مقدمه

امروزه بیوراکتورهای غشایی (MBR^۱) برای تصفیه پساب ها مورد استفاده قرار می گیرند و جایگزین فرایندهای لجن فعال مرسوم شده اند. روش لجن فعال که از ته نشینی جامدات برای جداسازی استفاده می کند، خروجی هایی با کیفیت متفاوت دارد و به سادگی قابل کنترل نیست. مزایای زیادی به نسبت روش لجن فعال دارد که عبارتند از: آب خروجی تمیزتر، کار کردن در شرایط با غلظت توده زیستی بالاتر (MLSS^۲)، کاهش تولید لجن و نیاز به فضای کمتر. گرفتگی غشا عبارت است از ته نشینی جامدات حل شده در پساب بر روی سطح غشا و درون حفرات آن که موجب کاهش کارایی غشا می گردد. گرفتگی به پارامترهای شیمیایی و فیزیکی بسیاری بستگی دارد. فرآیند پخش و توزیع هوا با انتقال رسوبات از سطح غشا موجب کاهش گرفتگی و افزایش فلاکس می گردند. شرایط هیدرودینامیکی داخل بیوراکتور با تشکیل جریان عرضی دوفازی موجب کاهش گرفتگی غشا می گردد. از آنجایی که MBR فرایندی پیچیده است، مدل سازی ریاضی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۳) آن ابزار مناسبی برای پیش بینی شرایط جریان و طراحی سیستم بیوراکتور غشایی است. [۱]

¹ Membrane Bioreactor

² Mixed Liquor Suspended Solids

³ Computational Fluid Dynamic

Nidinsa و همکاران به بررسی جریان دوفازی به عنوان مکانیسمی برای کنترل گرفتگی، اثر فاکتورهای هیدرودینامیکی (شدت جریان هوا، اندازه نازل ها، عرض کانال و...) و استفاده از بفل در بیوراکتور غشایی در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. آنها دریافتند که بین شدت جریان هوا و گرفتگی رابطه عکس، بین اندازه نازل و اثر حباب دهی رابطه مستقیم، بین فاصله بین غشاها و گرفتگی رابطه مستقیم، و بین استفاده از فیلتراسیون متناوب با مصرف انرژی رابطه عکس وجود دارد. همچنین استفاده از بفل باعث کاهش گرفتگی تا حد معین و افزایش فلاکس بحرانی می گردد و بعد از این مقدار، تغییر چشمگیری حاصل نمی شود. [۲] در مقاله ای دیگر از Nidinsa و همکاران، نتایج CFD را با نتایج تجربی مقایسه کردند و نشان دادند با افزایش تنش برشی کلی، فلاکس زیاد می شود و ورود فاز گازی به داخل سیستم باعث افزایش تلاطم می شود. [۳]

Drew و همکاران نشان دادند که هوادهی بیوراکتور غشایی در صورتی که اندازه حباب و فاصله بین غشاها مناسب نباشد می تواند اثر معکوس داشته باشد زیرا بسته به فاصله بین غشاها تنش برشی می تواند با کاهش اندازه حباب کم شود. [۴] Prieske و همکاران در مطالعاتشان نتیجه گرفتند که با فرض اینکه افت فشار در ماژول غشایی تنها ناشی از فاز مایع باشد، سرعت جریان عرضی بسته به طول و ضخامت صفحات غشا و فاصله بین آنها تعیین می شود. همچنین تطبیق نتایج تجربی و شبیه سازی، بستگی زیادی به اندازه حباب دارد. [۵] Khalili و همکاران مقادیر مقاومت ها (شامل مقاومت کیک، مقاومت جذب سطحی، مقاومت انسداد حفرات و مقاومت ذاتی) و درصد نسبی آنها را به عنوان تابعی از پارامترهای عملیاتی که به صورت آزمایشگاهی بدست آمدند تعیین کردند و اثر شدت جریان ورودی هوا و زاویه بفل را نیز بررسی کردند و نشان دادند فلاکس نفوذی و مقاومت با تنش برشی بر روی سطح غشا ارتباط مستقیم دارد. آنها همچنین دریافتند با افزایش هوادهی و تغییر زاویه بفل از ۹۰ به ۸۵ درجه تنش برشی افزایش یافت. [۶] در مطالعاتی دیگر، آنها سطح مایع در بیوراکتور هواگرد را بررسی کردند و نشان دادند با کاهش سطح مایع کیفیت اختلاط و یکنواختی توزیع فاز مایع در جریان بالارونده بهتر شده، ولی تنش برشی روی سطح غشا و درصد هوا در جریان ناودانی کمتر می شود. [۷] Xiaoxu و همکاران به منظور بهینه کردن شرایط هیدرودینامیکی راکتور، اثر موقعیت و اندازه بفل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای بررسی هیدرودینامیک بیوراکتور هواگرد از CFD در مقیاس آزمایشگاهی با موقعیت ها و اندازه های مختلف بفل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج صحت سنجی شده نشان داد که بفل های کناری از بفل های جلوی غشا در افزایش تنش برشی موثر تر بوده اند و حداکثر تنش برشی زمانی بوده که هر دو نوع بفل کناری و جلویی را قرار دادند. [۸] Xiaoxu و همکاران، اثر مشخصات هندسی مخزن افقی مخزن آزمایشگاهی (مشخصه طولی جریان بالارونده، مشخصه طولی جریان ناودانی، مشخصه عرضی مخزن) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی آنها نشان داد که میانگین جریان عرضی بالارونده با افزایش نسبت سطح مقطع عرضی جریان بالارونده به ناودانی کاهش می یابد. همچنین کوچک بودن عرض مخزن موجب افزایش تنش برشی روی سطح غشا می گردد. [۹] Amini و همکاران مشخصات هیدرودینامیکی شامل (تنش برشی، سرعت جریان عرضی و مقاومت رسوب گذاری) یک بیوراکتور هواگرد را در مقیاس صنعتی با استفاده از CFD بررسی کردند. آنها نشان دادند که سرعت جریان عرضی نقش مهمی در رسوب گذاری غشا و تعیین قطر ذرات ایفا می کند و همچنین در ماژول صنعتی با چند غشا، خارجی ترین غشا بیشتر در معرض رسوب گذاری است و سرعت جریان عرضی بین آنها و دیواره کمتر است. [۱۰] در مطالعاتی دیگر از آنها اثر فاصله ی ورودی هوا روی پارامترهای هیدرودینامیکی مختلف بررسی شد. در حالت اول اسپارژر در پایین بیوراکتور و در حالت دوم در ورودی ماژول قرار داده شد. نتایج نشان داد که در هوادهی یکسان، سرعت جریان عرضی بین غشاها و تنش برشی روی سطح غشا در حالت اول به نسبت حالت دوم بهتر و توزیع حباب مطلوب تر و جریان به شرایط جریان پلاگ نزدیکتر است. [۱۱] Chao و همکاران بر روی اثر همزن مکانیکی روی رسوب گذاری غشا، تمرکز کرده اند و دریافته اند که حذف آمونیم با افزایش ویسکوزیته بالک و در نتیجه کاهش سرعت همزن، کاهش می یابد و همچنین مقاومت لایه زلی به طور قابل ملاحظه ای در سرعت های پایین همزن افزایش یافت که نشان می دهد نرخ رسوب گذاری بیوراکتور غشایی در مراحل مختلف به تغییرات لایه زلی بر می گردد. بررسی CFD جریان نشان داد که سرعت و جهت تغییرات جریان سیال با شدت های مختلف همزن تغییر می کند. [۱۲] در این تحقیق اثر تغییرات دبی هوا، وجود بفل و فاصله بفل از ماژول غشایی روی هیدرودینامیک و بازده پساب خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی دوفازی شامل لجن فعال و هوا صورت گرفته است. همچنین بازده پساب خروجی توسط بررسی تغییرات^۱ COD مطالعه شده است.

^۱ Chemical Oxygen Demand

۲. مدل ریاضی بیوراکتور غشایی

در دینامیک سیالات محاسباتی روشهای اولر-اولر^۱ و اولر-لاگرانژ^۲ با معایب و مزایای مختص به خود وجود دارد، که در این مقاله از دیدگاه اولر-اولر سه بعدی برای شبیه سازی بیوراکتور هواگرد دوفازی استفاده شده است. این مدل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی را برای هر فاز حل می کند. همچنین از یک فشار برای همه فازها استفاده می شود. [۶]

رابطه پیوستگی

جز حجمی هر فاز توسط رابطه ی پیوستگی محاسبه می شود. رابطه زیر برای محاسبه ی جز حجمی (α) فاز i در سیستم بدون در نظر گرفتن انتقال جرم بین فازها است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

بقای مومنتم

معادله مومنتم برای فاز i از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \sum_{j=1}^n \vec{R}_{ji} + \alpha_i \rho_i (\vec{F}_i) \quad (2)$$

در این مقاله برای آشفتگی از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon$$

و در آن ε (m^2/s^3) و k (m^2/s^2) به ترتیب انرژی جنبشی و انرژی اتلافی در اثر آشفتگی هستند. چگالی و سرعت مخلوط (ρ_m و \vec{v}_m) از روابط زیر حساب می شوند:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \quad (4)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i} \quad (5)$$

ویسکوزیته آشفتگی مخلوط از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

ثابت های این معادلات عبارتند از:

$$\sigma_\varepsilon = 1/3 \text{ و } \sigma_k = 1/0, C_\mu = 0/09, C_{2\varepsilon} = 1/92, C_{1\varepsilon} = 1/44 \quad (7)$$

و تولید انرژی ناشی از آشفتگی به صورت زیر است:

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) : \nabla \vec{v}_m \quad (8)$$

¹ Euler-Euler

² Euler-Lagrange

۳. مجموعه آزمایشگاهی

آب پنیتر استفاده شده در این مطالعه از کارخانه لبنی صالح آمل تهیه شده است. پس از تعیین برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن، در دمای 3°C نگه داری شد تا از تغییرات شیمیایی و اسیدی شدن آن جلوگیری شود. ویژگی های پساب آب پنیتر اولیه در جدول ۱ آمده است. با توجه به مقدار زیاد مواد جامد معلق درون پساب، از فرایند انعقاد به منظور جداسازی و حذف آن ها استفاده شده است. ابتدا آب پنیتر خام به نسبت ۱ به ۹ رقیق شده است و COD آن به 6100 mg/l رسیده است. جهت فرآیند انعقاد از منعقد کننده کلروفریک با غلظت متوسط 160 mg/l استفاده شده است. فرآیند لخته سازی به مدت ۲۰ دقیقه و با سرعت 20 rpm انجام شده است. جهت ته نشینی ذرات لخته شده، محلول به مدت $1/5$ ساعت به طور ساکن نگه داری شده و در نهایت برای خنثی سازی از محلول قلیایی NaOH جهت افزایش pH پساب تا حد خنثی استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات پساب آب پنیتر مورد آزمایش

ویژگی	واحد	مقدار
COD	g/l	۶۳-۶۸
TSS	mg/l	250.0 ± 5.0
PH	-	$5/9 \pm 0/5$
Conductivity	mS/cm	$5/2 \pm 0/1$

ساخت غشا و تهیه ماژول غشایی

جهت ساخت غشا اولترافیلتراسیون پلی سولفونی آبدوست، از روش تغییر فاز توسط رسوب دهی غوطه‌وری استفاده شد. برای تهیه محلول پلیمری یکنواخت مقدار مشخصی از پلی اتر سولفون (16% وزنی) به مخلوطی حاوی DMF به عنوان حلال، پلی وینیل پیرولیدون (1% وزنی) به عنوان عامل شکل دهی حفره، و تریتن X-100 به عنوان سورفکتانت (2% وزنی) اضافه شد. برای اطمینان از پخش یکنواخت ذرات PES افزوده شده، محلول پلیمری در 200 rpm به مدت ۲۴ ساعت هم زده شد تا محلول یکنواخت بدون توده‌های ماکروسکوپی شکل گرفت. سپس به منظور حذف حباب به مدت ۴ ساعت ساکن نگه داشته شد. برای ایجاد غشا صفحه تخت، محلول پلیمری بر روی نگهدارنده پارچه ای بی بافت پلی استر چسبیده به روی شیشه ریخته شد و با استفاده از یک ضخامت دهنده یا فیلم کش به صورت فیلم هایی با ضخامت $100\mu\text{m}$ در آمد. فیلم پلیمری تهیه شده بلافاصله در حمام انعقاد آب خالص در دمای دلخواه قرار داده شد. سپس به منظور حذف حلال باقی مانده به مدت ۲۴ ساعت در آب خالص نگه داشته شد. سرانجام غشا ۲۴ ساعت قبل از تعیین مشخصه و تست آزمایشگاهی خشک شد. پس از تعیین اندازه حفره غشا، از آن در تهیه ماژول غشایی استفاده شد.

تست های آزمایشگاهی

از فرآیند بیولوژیکی به منظور کاهش COD پساب آب پنیتر در راکتور ناپیوسته هوازی از جنس پلکسی گلاس با ابعاد $24 \times 50 \times 13\text{ cm}$ و حجم 15.6 لیتر استفاده شده است. جهت کنترل پدیده کف کنندگی از 70% درصد حجم راکتور (ارتفاع 35 سانتی متر) استفاده شد. یک شیر خروجی جهت انتقال لجن از مخزن ته نشینی تعبیه شد. یک سنگ هوا به ابعاد 2×12 در مرکز بیوراکتور قرار داده شد. هوا توسط یک پمپ هوادهی به بیوراکتور وارد می شود. به کمک اختلاف ارتفاع خوراک به داخل مخزن هدایت شده و توسط یک شناور سطح مایع داخل بیوراکتور ثابت نگه داشته شده است. در جدول ۲ مشخصات مهم ماژول غشایی ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مهم ماژول غشایی

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	اندازه حفرات غشا	$0.2\mu\text{m}$
۲	سطح فعال غشا	155 cm^2
۳	فاصله ی بین دو غشا در ماژول	10 mm

لجن فعال نیز از کارخانه صالح آمل تهیه شده است. در ابتدا بیوراکتور با مخلوط مایع حاصل از سیستم لجن فعال کارخانه تغذیه شد. دمای راکتور $25-23^{\circ}\text{C}$ بود. به منظور افزایش مقدار لجن فعال داخل بیوراکتور، راکتور در فرایند نیمه پیوسته در مدت یک هفته کار کرد و در پایان این دوره راکتور به صورت پیوسته توسط پساب تغذیه شده و غلظت COD لجن فعال به مقدار 3200 mg/l رسید. با اضافه کردن پیوسته پساب به داخل راکتور با هر دو ساعت یک بار COD و MLSS لجن خوانده شد. و بعد از ۱۴ ساعت میزان COD پساب تغییرات ناچیزی داشت که مبین رسیدن به حالت پایدار بوده است. HRT سیستم برابر با ۹ ساعت بوده است. برای هوادهای مختلف و در ۳ حالت سیستم بدون بفل، با بفل در حالت اول و با بفل در حالت دوم این عمل تکرار شده و بعد از رسیدن به حالت پایدار، COD ورودی و خروجی سیستم و همچنین فلاکس عبوری از غشا خوانده شده است.



شکل ۱ - مجموعه آزمایشگاهی بیوراکتور غشایی

۴. شبیه سازی و نتایج

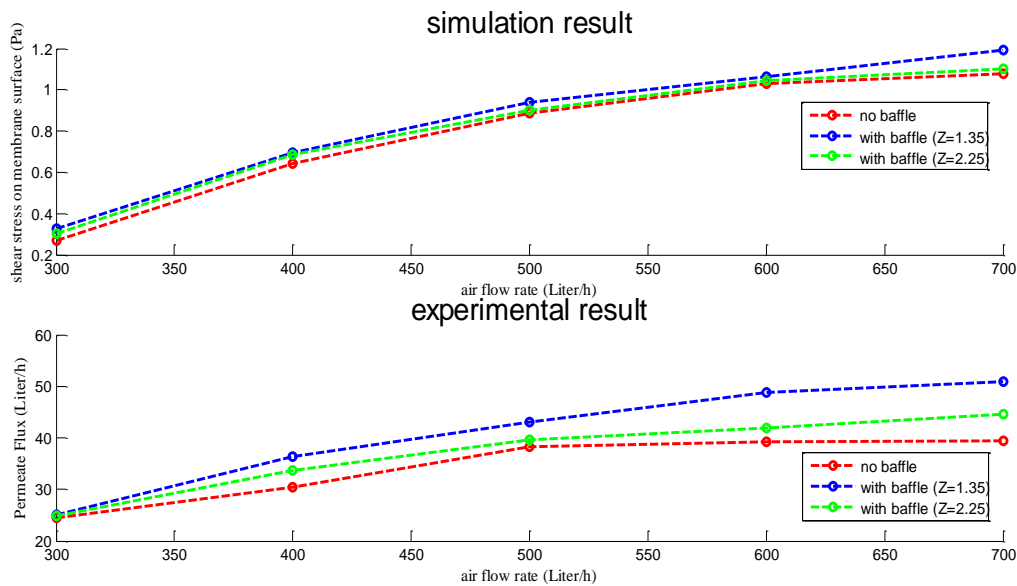
شبیه سازی بیوراکتور غشایی به صورت سه بعدی در نرم افزار ANSYS Fluent 14 انجام شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات و مقارن بودن سیستم آزمایشگاهی، نیمی از سامانه شبیه سازی شده است. برای شبیه سازی دوفازی از معادله اولرین استفاده شده است. [۲ و ۱] در تعیین شرایط مرزی سامانه، خروجی فشار برای صفحه ی بالایی بیوراکتور، صفحه ورودی سرعتی برای توزیع کننده هوا و به علت تاثیر ناچیز نفوذ بر روی هیدرودینامیک، دیواره ی غیر قابل نفوذ برای غشا در نظر گرفته شده است. ویسکوزیته و دانسیته سیالات در شبیه سازی نقش موثری دارند و معمولاً مقدار ثابتی در نظر گرفته می شود. [۶] از آنجایی که میانگین MLSS را در آزمایشات مختلف برابر با $4/7\text{ g/l}$ بدست آوردیم، و این مقدار از 1 g/l کمتر می باشد، برای شبیه سازی از ویسکوزیته و چگالی روابط زیر استفاده شده است [۱۳ و ۱۴]:

$$\mu_L = 1.05 \mu_w e^{0.08C} \quad (9)$$

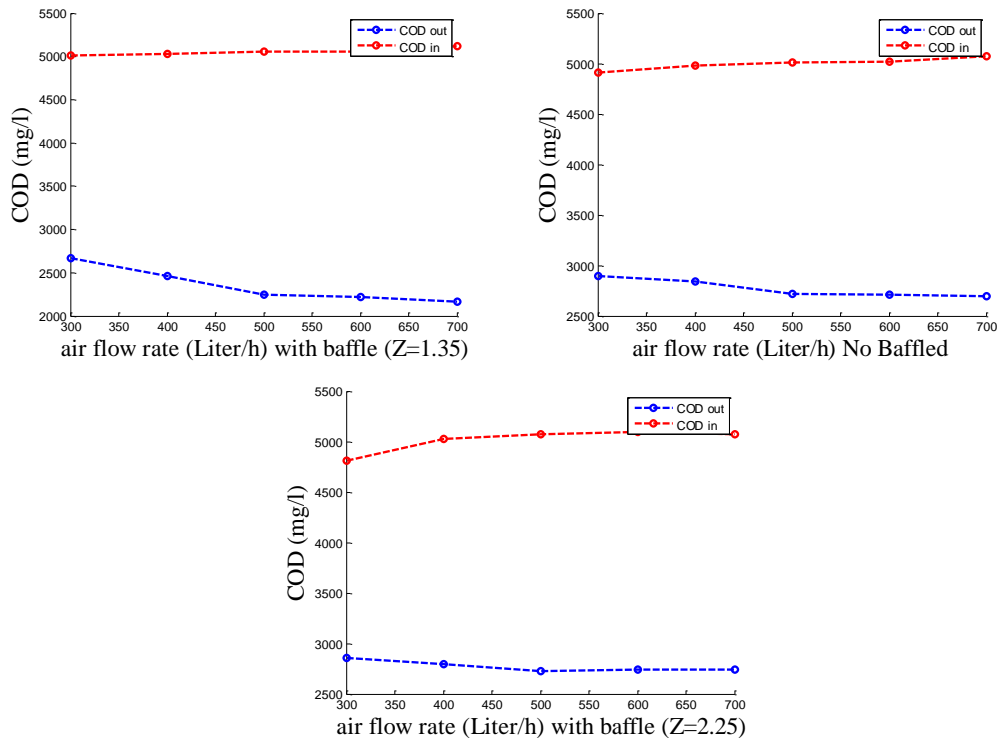
$$\rho = MLSS + 1000 \left(1 - \frac{MLSS}{\rho_{DS}} \right) \quad (10)$$

در این روابط μ_w ویسکوزیته آب، C غلظت MLSS، ρ_{DS} چگالی ویژه جامدات خشک (1250 kg/m^3) می باشد. برای شدت های هوادهی مختلف میزان شار نفوذی از غشا برای ۳ حالت آزمایش شامل بیوراکتور بدون بفل، بیوراکتور با بفل در فاصله ی $Z=1/3$ از غشا و بیوراکتور با بفل در فاصله ی $Z=2/25$ از غشا، اندازه گیری شده است. شکل ۲ نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایشگاه را به صورت نمودارهای تنش روی سطح غشا بر حسب دبی هوادهی و فلاکس پرمیت خروجی از غشا بر حسب هوادهی نشان می دهد. با مقایسه این دو نمودار در می یابیم تنش برشی بر روی غشا با شدت هوادهی و فلاکس پرمیت خروجی رابطه مستقیم دارد. نمودارهای شکل ۳ میزان COD در پساب ورودی و خروجی ۳ حالت مورد بررسی در آزمایشگاه را نشان می دهد. طبق نمودار شکل ۴، بازده حذف COD در ۳ حالت مختلف باهم مقایسه شده است و نشان می دهد در حالاتی که

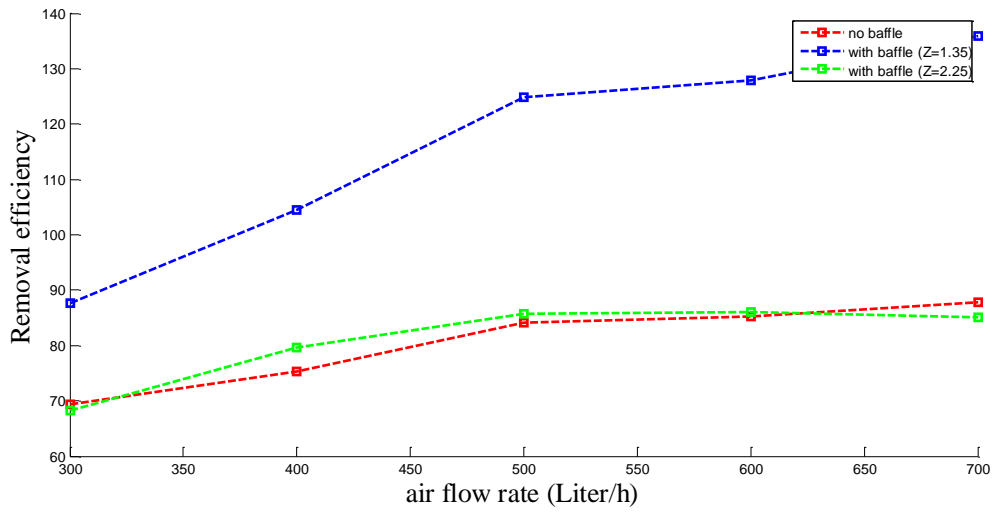
سیستم بفل دارد بازده حذف بیشتر از سیستم بدون بفل می باشد. همچنین در شکل کانتورهای فازی و برداری و هندسه کلی شبیه سازی اطراف صفحه غشا نشان داده شده است.



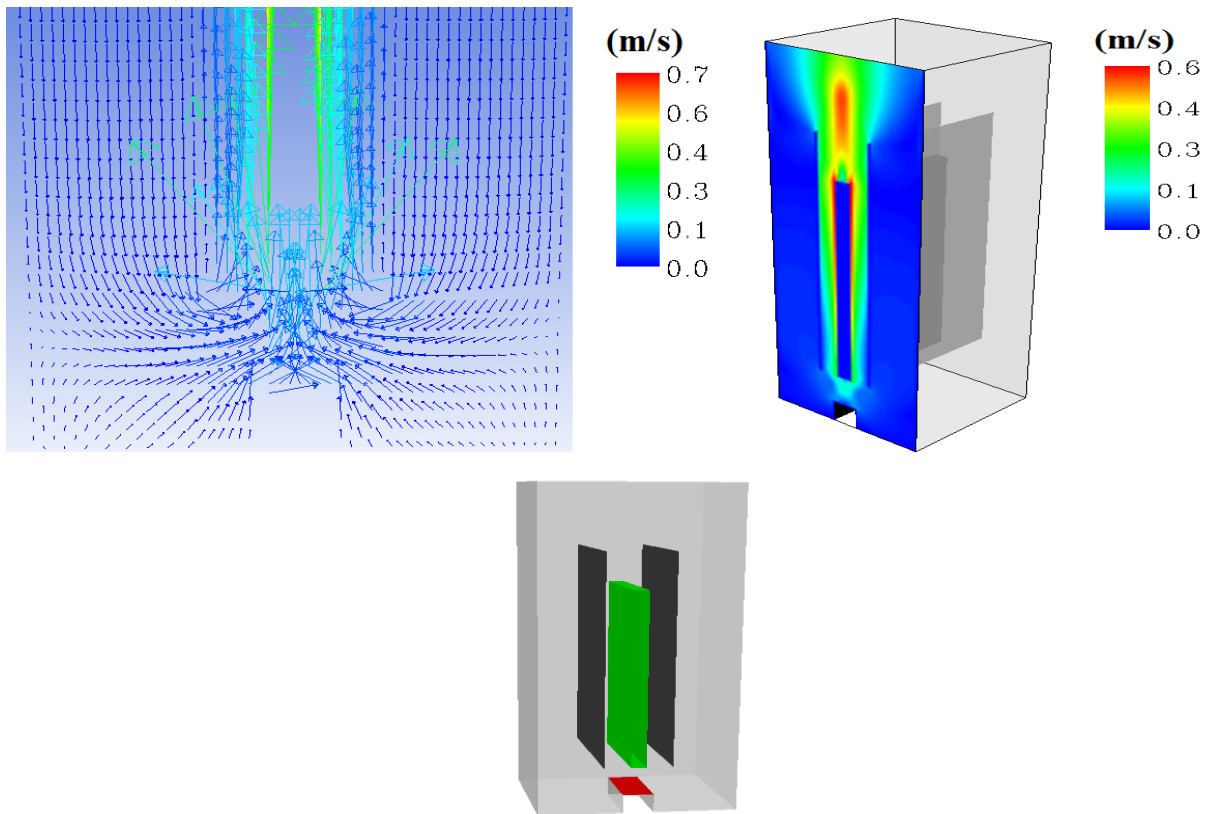
شکل ۲ - نمودار تنش برشی و فلاکس خروجی هوا برای سه حالت بدون بفل، با بفل (Z=1.35) و با بفل (Z=2.25)



شکل ۳ - نمودار COD ورودی و خروجی پساب آب پنیبر برای سه حالت بدون بفل، با بفل (Z=1.35) و با بفل (Z=2.25)



شکل ۴- نمودار راندمان بیوراکتور غشایی در تصفیه پساب آب پنییر برای سه حالت بدون بفل، با بفل ($Z=1.35$) و با بفل ($Z=2.25$)



شکل ۵- شکل کاتوره‌های فازی و برداری و هندسه کلی شبیه سازی اطراف صفحه غشا



۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، هیدرودینامیک و نتایج تجربی یک بیوراکتور غشایی با پساب آب پتیر، در سه حالت شامل یک حالت مخزن بدون بفل و دو حالت بفل دار با فاصله‌های مختلف بفل از مازول غشایی مورد بررسی قرار گرفته است. در هر کدام از حالت‌های ذکر شده، اثر ۵ هوادهی مختلف بر روی هیدرودینامیک بیوراکتور بررسی شده است و نتایج حاصل عبارت است از: معادله‌ی چندفازی اولرین و معادله‌ی آشفستگی $k-\epsilon$ استاندارد به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. با افزایش میزان هوادهی مقدار تنش حاصل از جریان دوفازی بر روی سطح غشا افزایش می‌یابد و این تغییرات تنش در هوادهی‌های کمتر بیشتر مشهود است. همچنین با افزایش هوادهی بازده حذف COD افزایش می‌یابد. از طرف دیگر وجود بفل باعث منظم شدن جریان و افزایش سرعت جریان عرضی در قسمت بالا رونده شده است، به همین دلیل در حالت سیستم با بفل، تنش حاصل از شبیه‌سازی و همچنین شار نفوذی در نتایج آزمایشگاهی نسبت به سیستم بدون بفل مقادیر بیشتری دارد. با مقایسه سیستم‌های بفل دار، در می‌یابیم که محل قرار دادن بفل از پارامترهای مهم می‌باشد. با افزایش فاصله‌ی بفل از غشا، و افزایش نسبت سطح مقطع جریان بالا رونده به جریان پایین رونده، میزان تنش بر روی سطح غشا و بازده حذف COD کاهش می‌یابد.

۶. مراجع

1. Sengur, R., Deveci, G., Kaya, R., Turken, T., Guclu, S., Imer, D. Y., & Koyuncu, I. (2015). CFD modeling of submerged membrane bioreactors (sMBRs): a review. *Desalination and Water Treatment*, 55(7), 1747-1761.
2. Ndinisa, N. V., Fane, A. G., & Wiley, D. E. (2006). Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: part I—bubbling and hydrodynamic effects. *Separation science and technology*, 41(7), 1383-1409.
3. Ndinisa, N. V., Fane, A. G., Wiley, D. E., & Fletcher, D. F. (2006). Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part II—Two-phase flow characterization and CFD simulations. *Separation science and technology*, 41(7), 1411-1445.
4. Drews, A., Prieske, H., Meyer, E. L., Senger, G., & Kraume, M. (2010). Advantageous and detrimental effects of air sparging in membrane filtration: Bubble movement, exerted shear and particle classification. *Desalination*, 250(3), 1083-1086.
5. Prieske, H., Drews, A., & Kraume, M. (2008). Prediction of the circulation velocity in a membrane bioreactor. *Desalination*, 231(1), 219-226.
6. Khalili, A., Mehrnia, M. R., Mostoufi, N., & Sarrafzadeh, M. (2009). Flow characteristics in an airlift membrane bioreactor. *Chemical Product and Process Modeling*, 4(5).
7. Khalili-Garakani, A., Mehrnia, M. R., Mostoufi, N., & Sarrafzadeh, M. H. (2011). Analyze and control fouling in an airlift membrane bioreactor: CFD simulation and experimental studies. *Process Biochemistry*, 46(5), 1138-1145.
8. Yan, X., Xiao, K., Liang, S., Lei, T., Liang, P., Xue, T., ... & Huang, X. (2015). Hydraulic optimization of membrane bioreactor via baffle modification using computational fluid dynamics. *Bioresource technology*, 175, 633-637.
9. Yan, X., Wu, Q., Sun, J., Liang, P., Zhang, X., Xiao, K., & Huang, X. (2016). Hydrodynamic optimization of membrane bioreactor by horizontal geometry modification using computational fluid dynamics. *Bioresource technology*, 200, 328-334.
10. Amini, E., Mehrnia, M. R., Mousavi, S. M., & Mostoufi, N. (2013). Experimental study and computational fluid dynamics simulation of a full-scale membrane bioreactor for municipal wastewater treatment application. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(29), 9930-9939.
11. Amini, E., Mehrnia, M. R., Mousavi, S. M., Azami, H., & Mostoufi, N. (2015). Investigating the effect of sparger configuration on the hydrodynamics of a full-scale membrane bioreactor using computational fluid dynamics. *RSC Advances*, 5(127), 105218-105226.
12. Qi, C., Wang, J., & Lin, Y. (2016). New insight into influence of mechanical stirring on membrane fouling of membrane bioreactor: Mixed liquor properties and hydrodynamic conditions. *Bioresource*



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



technology, 211, 654-663.

13. Li, X. Y., & Wang, X. M. (2006). *Modelling of membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. Journal of Membrane Science, 278(1), 151-161.*
14. Jiang, T. (2007). *Characterization and modeling of soluble microbial products in membrane bioreactors. Ghent: Ghent University.*