

بررسی مشخصات هیدرودینامیکی راکتور بافل دار بی‌هوازی در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی

ابوالقاسم علی‌قارداشی^{*}، مهدی حسن‌وند جمادی^۲، گایک بدلیانس قلی‌کندی^۳ و شروین جمشیدی^۴

^۱ استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و فاضلاب، دانشگاه شهید بهشتی

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

^۴ دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران

چکیده

ویژگی‌های هیدرودینامیکی راکتورهای تصفیه فاضلاب با سرعت بالا از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر طراحی و راهبری راکتور می‌باشد. یکی از راکتورهای تصفیه با سرعت بالا، راکتور بافل‌دار است که اخیراً برای تصفیه فاضلاب به صورت بی‌هوازی به کار گرفته شده است. این راکتور ساختاری اتاقک‌بندی شده داشته و هر اتاقک به دو بخش با جریان رو به پایین و رو به بالا تقسیم می‌شود. با توجه به این ساختار، تغییرات هیدرودینامیکی از قبیل سرعت و جهت جریان بر عملکرد راکتور اثرگذار بوده و هیدرودینامیک جریان نقش مهمی در راهبری این راکتور دارد. در این مقاله، ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان عبوری از یک راکتور بافل‌دار بی‌هوازی در مقیاس آزمایشگاهی به حجم ۶ لیتر و دارای ۸ اتاقک مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در دو زمان ماند هیدرولیکی ۱۱۰ و ۳۳۲ دقیقه انجام پذیرفته و شاخص‌های هیدرودینامیکی مربوط به راکتور بررسی گردید که از آن جمله می‌توان به زمان ماند تجربی، فضای غیر فعال، شاخص اتصال کوتاه و راندمان هیدرولیکی اشاره کرد. همچنین رژیم جریان هیدرولیکی عبوری از راکتور مورد بررسی قرار گرفت. برای زمان‌های تئوریک مورد مطالعه، زمان ماند تجربی راکتور به ترتیب ۹۸ و ۳۲۷ دقیقه به دست آمد. حجم فضای غیر فعال برای زمان ماند ۱۱۰ دقیقه برابر ۱۱/۱۴ درصد و برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه تنها ۱/۵ درصد محاسبه گردید. شاخص اتصال کوتاه برای زمان ماند ۱۱۰ و ۳۳۲ دقیقه به ترتیب ۰/۴۰۹ و ۰/۲۵۲ و راندمان هیدرولیکی به ترتیب برابر ۰/۸۰ و ۰/۸۸ به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت در حالت کلی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی، راکتوری با عملکرد هیدرولیکی نسبتاً مناسب است. همچنین این راکتور دارای انتشار نسبتاً پایینی بوده و به راکتورهای نهرگونه گرایش دارد.

واژگان کلیدی: هیدرودینامیک جریان، راکتور بافل‌دار بی‌هوازی، منحنی پراکندگی زمان ماند.

۱- مقدمه

راکتور بافل‌دار بی‌هوازی (ABR) از یک سری اتاقک متوالی تشکیل یافته که هر اتاقک نیز به کمک تیغه‌هایی به دو بخش بالارونده و پایین رونده جریان تقسیم می‌شود. به دلیل سرعت پایین‌تر جریان در قسمت بالارونده، لجن در قسمت بالارونده آن به صورت معلق مانده و از این رو قابلیت تماس مناسب میان سوبستره و میکروارگانیسم‌های موجود در جریان عبوری افزایش می‌یابد. راکتور ABR قابلیت تصفیه فاضلاب‌های با بار آلی زیاد را دارد. این راکتور تولید لجن مازاد بسیار کمی داشته و نیاز به تانک ته‌نشینی نهایی ندارد [۱].

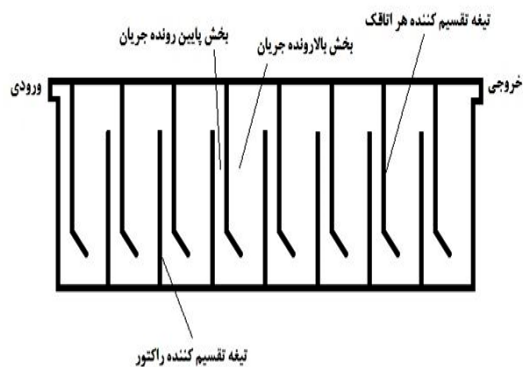
ساختار راکتور به گونه‌ای است که جهت و سرعت جریان داخل راکتور به صورت متوالی تغییر نموده و این تغییر جهت و سرعت، ویژگی‌های خاصی به راکتور برای تصفیه فاضلاب می‌دهد. برای مثال سرعت بالای جریان در بخش پایین‌رونده

با توجه به هزینه بالای راهبری و نیز مصرف بالای انرژی توسط فرآیندهای معمول هوازی از قبیل فرایند لجن فعال، استفاده از واحدهای بی‌هوازی که هم راهبری خاصی را نیاز ندارند و هم تولید انرژی به صورت بیوگاز دارند، علی‌الخصوص برای کشورهای در حال توسعه که همواره با مشکلات مالی در پروژه‌ها مواجه هستند، بایستی مد نظر قرار گیرد.

علاوه بر مزیت گفته شده برای سیستم‌های بی‌هوازی، از این راکتورها برای تصفیه فاضلاب‌های مقاوم‌تر که با روش‌های معمول هوازی قابل تصفیه نیستند، استفاده می‌شود. یکی از این سیستم‌ها، راکتور بافل‌دار بی‌هوازی است که با تغییراتی در ساختار راکتورهای UASB به دست آمده است.

۲- مواد و روش‌ها

برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی در این تحقیق، از یک راکتور با ابعاد آزمایشگاهی و به حجم ۶ لیتر استفاده شده است. این راکتور دارای ۸ اتاقک است. هر اتاقک به دو قسمت بالارونده و پایین‌رونده جریان تقسیم می‌شود که طول (و حجم) قسمت بالارونده ۳ برابر طول (و حجم) پایین‌رونده است [۷]. انتهای بافل داخلی تقسیم کننده اتاقک‌ها به منظور هدایت جریان به بخش‌های میانی به اندازه ۴۵ درجه خم شده است.



شکل ۱- راکتور مورد استفاده

جهت به دست آوردن ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان عبوری از راکتورها، از منحنی پراکندگی زمان ماند (RTD) استفاده می‌شود. این منحنی یکی از مشخصات منحصر به فرد جریان عبوری از راکتور است [۸]. برای به دست آوردن منحنی RTD، ماده خاصی موسوم به ماده ردیاب در ورودی راکتور تزریق شده و مقدار خروجی آن در لحظات مختلف اندازه‌گیری

جریان، تنشینی احتمالی مواد و یا پدیده کانال‌زایی هیدرولیکی را از بین برده و با کاهش حجم مفید راکتور مقابله می‌کند. قسمت انتهایی تیغه تقسیم کننده هر اتاقک به اندازه ۴۵ درجه خم می‌شود که این امر باعث هدایت جریان به بخش‌های مرکزی راکتور شده و تماس بهتر فاضلاب عبوری را با میکروارگانیسم موجود فراهم می‌آورد [۲، ۳]. همچنین به دلیل ایجاد گلوگاه در زیر تیغه کج شده، سرعت جریان در این قسمت افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت، به طوری که در صورت تنشینی مواد موجود در بخش بالارونده، سرعت بالای موجود در این قسمت از هرگونه گرفتگی احتمالی جلوگیری خواهد کرد. با توجه به این موارد، اساس کارکرد این راکتور بر هیدرودینامیک جریان استوار بوده و لذا مطالعه هیدرودینامیک جریان عبوری از این راکتور حائز اهمیت فوق‌العاده‌ای است.

تحقیقات مشابهی پیرامون راکتور بافل‌دار بی‌هوازی از نقطه نظر هیدرودینامیکی انجام شده است. از این جمله می‌توان به بررسی جریان ناپایدار هیدرولیکی و تأثیر آن بر مشخصات هیدرودینامیکی راکتور بافل‌دار بی‌هوازی توسط Sarathai و همکاران اشاره نمود [۴]. در تحقیق مذکور، راکتوری با سه اتاقک و با تانک تنشینی اولیه مورد آزمایش قرار گرفته که از نظر تعداد اتاقک‌ها نصف اتاقک‌های راکتور مورد مطالعه در تحقیق حاضر است. در مطالعه دیگری راکتور ABR از نقطه نظر شاخص‌های هیدرودینامیکی با راکتورهای بی‌هوازی دیگر مقایسه شده است [۵]. مطالعات محدود دیگری نیز به صورت جانبی در کنار مطالعات فرآیندی این راکتور انجام شده است [۶]. تحقیقات انجام گرفته بر روی هیدرودینامیک راکتور بافل‌دار، علی‌رغم اهمیت آن، در مقایسه با تحقیقات انجام شده بر روی فرایندهای بیولوژیکی بسیار کمتر است. همچنین در اغلب این موارد راکتورهای با تعداد اتاقک‌های پایین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لذا مطالعه بیشتر در خصوص هیدرودینامیک این راکتور و به خصوص راکتورهای با تعداد اتاقک بیشتر، حائز اهمیت است.

در این مطالعه از راکتوری با تعداد اتاقک‌های زیاد استفاده شده است. ویژگی‌های هیدرودینامیک راکتور بافل‌دار بی‌هوازی، به عنوان پایه طراحی این راکتور مورد بررسی قرار گرفته و کارایی راکتور ارزیابی شده است. همچنین رژیم جریان عبوری از راکتور نیز مورد بحث قرار گرفته است که نقش مهمی در راهبری راکتور دارد.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}_c} \quad \text{واریانس نرمال} \quad (۶)$$

به دلایل مختلف از جمله ایده آل نبودن شرایط بهره‌برداری، تمام حجم راکتور در فرآیندهای رخ داده داخل راکتور شرکت نمی‌کند. قسمتی از حجم را که عمده اختلاط جریان و واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی در آن به وقوع می‌پیوندد و فرآیندها در آن صورت می‌پذیرد فضای فعال گویند که برابر است با نسبت زمان ماند تجربی به تئوریک و از رابطه (۷) به دست می‌آید [۴].

در بخش‌های خارج از فضای فعال، به دلیل قابل اغماض بودن اختلاط مواد موجود با جریان ورودی، عملاً فرایند قابل ذکری رخ نمی‌دهد [۱۱].

$$e = \frac{\bar{t}_c}{HRT} \quad \text{فضای فعال راکتور} \quad (۷)$$

به بخش‌هایی از راکتور که در خارج فضای فعال قرار می‌گیرد، فضای غیر فعال یا مرده گفته می‌شود که از پارامترهای مهم مورد بررسی در مطالعات هیدرودینامیکی راکتورها است. ایجاد فضای غیر فعال باعث تقلیل فضای مورد نیاز جهت انجام واکنش‌های بیوشیمیایی و در نتیجه کاهش میزان فعالیت راکتور می‌گردد [۱۱] زیرا بخشی از راکتور که در فضای غیر فعال هیدرولیکی قرار می‌گیرد، با جریان سیال ورودی اختلاط نمی‌یابد [۹]. در این نواحی، سیال موجود به صورت راکد است و تبادلات بین این نواحی و نواحی فعال بسیار اندک و با سرعت پایین خواهد بود. از این رو میزان فضای مرده هیدرولیکی نقش مهمی در افت عملکرد راکتور دارد. میزان فضای غیر فعال هیدرولیکی به صورت کسر درصد فضای فعال از واحد تعریف می‌شود [۴]:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - e \quad \text{نسبت فضای مرده به کل حجم راکتور} \quad (۸)$$

اتصال کوتاه دیگر شاخص هیدرودینامیکی مورد بررسی است. این پدیده به دلیل ناکافی بودن اختلاط، وجود جریان‌های چگال به واسطه تفاوت دمایی، تشکیل گردابه جریان، طراحی نامناسب و انتشار محوری (در راکتورهای نهرگونه) ایجاد می‌گردد [۹]. اتصال کوتاه پدیده‌ای پیچیده است که معمولاً تأثیرات قابل توجهی بر کارکرد راکتور به جا گذاشته [۱۲] و یکی از عمده‌ترین موانع طراحی موفق یک راکتور است [۱۳] که

می‌شود. در این پژوهش از ماده رودامین به عنوان ماده ردیاب استفاده شده است. ۱۲ میلی‌گرم رودامین حل شده در ۵ سی‌سی آب به صورت لحظه‌ای (Pulse Injection) در ابتدای آزمایش به راکتور تزریق شده و میزان خروجی آن در زمان‌های مختلف تا ۲/۵ برابر زمان ماند تئوریک اندازه‌گیری شد. با رسم غلظت نرمال شده ماده ردیاب به ازای زمان، منحنی پراکندگی به دست می‌آید. پارامترهای نرمال شده به صورت روابط زیر تعریف می‌شود [۹].

$$\theta = \frac{t}{HRT} \quad \text{زمان نرمال} \quad (۱)$$

$$C(\theta) = (C(t))/C_0 \quad \text{غلظت نرمال} \quad (۲)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{t}_c}{HRT} \quad \text{زمان ماند نرمال} \quad (۳)$$

در روابط بالا t زمان، HRT زمان ماند تئوریک و برابر با حاصل تقسیم حجم راکتور بر دبی جریان ورودی، θ زمان نرمال، $C(t)$ غلظت در زمان t ، C_0 غلظت اسمی برابر جرم ردیاب تزریقی به حجم راکتور، $C(\theta)$ برابر غلظت نرمال در زمان نرمال θ و $\bar{\theta}$ زمان ماند متوسط نرمال راکتور می‌باشد. زمان ماند متوسط یک راکتور، نشان دهنده متوسط زمان اقامت یک ذره از سیال در داخل راکتور بوده و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۹]. این زمان با زمان ماند تئوریک راکتور اندکی تفاوت دارد.

$$\bar{t}_c = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{زمان ماند متوسط} \quad (۴)$$

پراکندگی داده‌ها توسط واریانس آن داده‌ها (نحوه پراکندگی داده‌ها اطراف مقدار میانگین) مشخص می‌شود [۱۰]. اهمیت واریانس منحنی پراکندگی زمان ماند به این دلیل است که مقدار آن با نوع رژیم جریان هیدرولیکی راکتور مرتبط است.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t}_c)^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} - \bar{t}_c^2 \quad \text{واریانس منحنی} \quad (۵)$$

از آنجایی که منحنی‌های پراکندگی بر اساس پارامترهای نرمال شده رسم می‌شوند، لذا در مباحث هیدرودینامیکی به جای واریانس، از واریانس نرمال شده استفاده می‌شود.

پکلت که عکس‌هم‌اند به عنوان شاخص میزان انتشار به کار می‌روند [۲۰]:

$$d = \frac{D}{uL} \quad (11) \quad \text{عدد بی بعد انتشار}$$

$$Pe = \frac{1}{d} = \frac{uL}{D} \quad (12) \quad \text{عدد بی بعد پکلت (عکس عدد انتشار)}$$

در روابط بالا، d عدد انتشار، Pe عدد پکلت، D ضریب انتشار محوری، u سرعت جریان و L طول مشخصه می‌باشد.

هرچه عدد انتشار بیشتر باشد میزان پخش مواد و اختلاط داخل راکتور بیشتر است به گونه‌ای که برای یک راکتور اختلاط کامل ایده‌آل این مقدار برابر بی‌نهایت می‌باشد [۲۱] همچنین عدد انتشار کمتر نشان از پایین بودن اختلاط در راکتور داشته و با نزدیک شدن آن به صفر، راکتور به یک راکتور نهرگونه ایده‌آل نزدیک خواهد شد. عکس مفاهیم فوق برای عدد پکلت قابل ذکر است. ارتباط بین واریانس و عدد انتشار به صورت زیر است [۱۹]:

$$\sigma_{\theta}^2 = 2d - 2d^2(1 - e^{-\frac{1}{d}}) \quad (13)$$

با معلوم بودن واریانس و حل عددی معادله بالا، مقدار عدد انتشار برای جریان به دست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

برای ارزیابی رفتار هیدرودینامیکی راکتور، آزمایش ماده ردیاب در دو زمان ماند ۱۱۰ و ۳۳۲ دقیقه انجام پذیرفت. منحنی‌های پراکندگی برای زمان‌های ماند مذکور در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

باعث ایجاد فضاهای غیر فعال شده [۹] و از کارایی راکتور می‌کاهد [۱۴]. وقوع این پدیده را یکی از عوامل مؤثر در بازده پایین هیدرولیکی دانسته‌اند [۱۵، ۱۶]. شاخص اتصال کوتاه به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود [۱]:

$$\text{Short - circuiting Index} = \frac{t_i}{HRT} \quad (9) \quad \text{شاخص اتصال کوتاه}$$

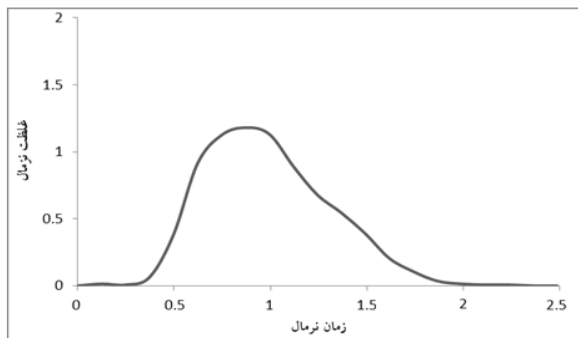
که t_i اولین زمان خروج ماده ردیاب از راکتور می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی راکتور از مفهوم راندمان هیدرولیکی استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\lambda = e(1 - \sigma_{\theta}^2) \quad (10) \quad \text{راندمان هیدرولیکی راکتور}$$

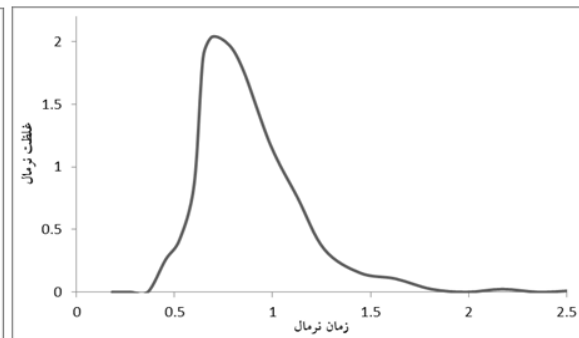
در رابطه (۱۰)، λ راندمان، e حجم مفید راکتور و σ_{θ}^2 واریانس نرمال است.

از نقطه نظر رژیم جریان هیدرولیکی، راکتورها در دو دسته نهرگونه و اختلاط کامل طبقه‌بندی می‌شوند. راکتور نهرگونه یا پیستونی به راکتوری گفته می‌شود که جریان در آن به صورت طولی بوده و در جهت عمود بر مسیر جریان اختلاطی روی نمی‌دهد و کاهش غلظت سوبستره در مسیر طولی مشهود است [۱۸]. راکتور اختلاط کامل راکتوری است که جریان ورودی به آن کاملاً اختلاط پیدا می‌کند. به عبارتی جریان ورودی به صورت کامل با مواد داخل راکتور مخلوط شده و رقیق می‌شود [۱].

در این تحقیق برای تشخیص نوع رژیم جریان در راکتور از مدل پراکندگی محوری استفاده شده است. در این مدل از اختلاط شعاعی صرف‌نظر شده و فقط اختلاط محوری منظور می‌گردد [۱۹]. در مدل پراکندگی محوری، اعداد بی‌بعد انتشار و



(ب)



(الف)

شکل ۲- منحنی پراکندگی زمان ماند: الف) زمان ماند ۱۱۰ دقیقه، ب) زمان ماند ۳۳۲ دقیقه

برابر ۱۱/۱۴ درصد است. این در حالی است که در زمان ماند ۳۳۲ دقیقه تنها ۱/۵ درصد از حجم راکتور را فضای غیر فعال تشکیل می‌دهد. این امر نشان دهنده کاهش قابل توجه فضای غیر فعال با افزایش زمان ماند است. می‌توان این مطلب را به این صورت توجیه کرد که با کاهش زمان ماند یک راکتور، دبی راکتور و در نتیجه سرعت جریان عبوری و عدد رینولدز آن افزایش می‌یابد و سرعت و عدد رینولدز بالاتر جریان عبوری سبب تشکیل تعداد بیشتری از جریان‌های چرخشی و گردابه‌ها می‌شود که مستعد ایجاد فضاهای غیر فعال هستند. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های محققان دیگر مشابهت دارد [۲۳، ۲۲].

هر چند در زمان ماند ۱۱۰ دقیقه میزان فضای غیر فعال راکتور چندین برابر این میزان در زمان ۳۳۲ دقیقه است ولی باید گفت در مقایسه با انواع دیگر راکتورهای تصفیه فاضلاب، میزان فضای غیر فعال در راکتور ABR نسبتاً کم است. میزان فضای غیر فعال برای یک راکتور EGSB^۱ با ابعاد آزمایشگاهی تا ۳۰ درصد [۲۴]، در فیلترهای بی‌هوازی ۵۰ تا ۹۳ درصد و در راکتور اختلاط کامل (CSTR) این میزان بالاتر از ۸۰ درصد گزارش شده [۶] که در مقایسه با یافته‌های این تحقیق بسیار بیشتر است. همچنین میزان فضای مرده به دست آمده برای راکتور ABR، در تحقیقات مشابه نیز نسبتاً پایین ارزیابی شده است. گروبیکی و استاکی مقدار فضای مرده هیدرولیکی ABR را بسیار کم (کمتر از ۸ درصد) دانسته‌اند [۲۵]. حتی در حالت جریان شدیداً ناپایدار، این مقدار کمتر از ۲۸ درصد بوده است [۴].

شاخص اتصال کوتاه که نشان دهنده نسبت زمان اولین خروج ردیاب به زمان ماند راکتور است، برای زمان ماندهای ۱۱۰ و ۳۳۲ دقیقه به ترتیب ۰/۴۰۹ و ۰/۲۵۲ به دست آمد. هرچه این میزان به یک نزدیک شود اتصال کوتاه کم‌تر بوده و با نزدیک شدن به صفر اتصال کوتاه افزایش خواهد یافت، به طوری که مقدار کمتر از ۰/۳ حاکی از اتصال کوتاه قابل توجه است [۴]. با در نظر گرفتن میزان ۰/۳ برای تشخیص اتصال کوتاه قطعی در راکتور، باید گفت که در زمان ماند ۱۱۰ دقیقه، اتصال کوتاه قابل توجهی در راکتور به وقوع نمی‌پیوندد؛ اما برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه مسیر کوتاه جریان در راکتور تشکیل می‌شود.

با دقت در تعریف راندمان هیدرولیکی مشاهده می‌شود که هر چه پراکندگی منحنی RTD کمتر و فضای فعال آن بیشتر باشد، راندمان هیدرولیکی راکتور بیشتر خواهد بود. برای زمان

واریانس بی‌بعد منحنی که پراکندگی داده‌ها را نشان می‌دهد برای زمان ماند ۱۱۰ دقیقه، ۰/۰۹۹ و برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه، ۰/۱۰۴ به دست آمده که نشان می‌دهد پراکندگی منحنی در زمان ۳۳۲ دقیقه به مقدار بسیار اندکی، بیشتر است. می‌توان گفت که با سه برابر شدن زمان ماند، پراکندگی داده‌ها تفاوت زیادی نکرده است.

زمان ماند متوسط یا تجربی راکتور برای زمان ماند تئوریک ۱۱۰ دقیقه، برابر ۹۸ دقیقه و برای زمان ماند تئوریک ۳۳۲ دقیقه، برابر ۳۲۷ دقیقه به دست آمد. همان گونه که دیده می‌شود متوسط زمان اقامت حقیقی ذرات سیال در داخل راکتور، کمتر از متوسط زمان اقامت تئوریک است. در توجیه این مطلب باید گفت که به علت شرکت نکردن بخشی از حجم راکتور در فضای فعال آن، عملاً حجم مؤثر راکتور از حجم واقعی آن کمتر شده و از آنجایی که دبی جریان ورودی ثابت است، لذا زمان ماند ذرات کمتر از برآورد تئوریک خواهد بود. نسبت زمان ماند تجربی به تئوریک برای زمان ماند ۱۱۰ دقیقه، برابر با ۰/۸۹ و برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه، برابر با ۰/۹۸۵ است که نشان دهنده درصد فضای فعال راکتور در دو زمان مذکور است. چنانچه دیده می‌شود میزان فضای فعال در زمان تئوریک ۱۱۰ دقیقه کمتر از زمان ۳۳۲ دقیقه است. علاوه بر درصد فضای فعال راکتور، نسبت مذکور نشان از میزان انطباق زمان‌های ماند هیدرولیکی واقعی و بیولوژیکی سیستم دارد. زمان ماند بیولوژیکی، زمان ماند لازم جهت تصفیه فاضلاب ورودی توسط میکروارگانیسم‌ها و تجزیه مواد آلی موجود در آن، در حد مورد انتظار بوده و زمان ماند تئوریک بر اساس آن به دست می‌آید. زمان ماند هیدرولیکی واقعی سیستم به وسیله آزمایش و توسط رابطه (۴) تعیین می‌شود. سیستمی عملکرد مناسب خواهد داشت که در آن، این دو زمان ماند با هم برابر باشند. هر چند به دلیل غیر ایده‌آل بودن عملکرد سیستم‌ها، زمان ماند بیولوژیکی با هیدرولیکی متفاوت است. اما هرچه این زمان‌ها به هم نزدیک‌تر باشد، راکتور در شرایط بهره‌برداری بهتری عمل خواهد کرد. به عبارت دیگر با نزدیک شدن نسبت فضای فعال به عدد ۱، زمان ماند بهره‌برداری راکتور، زمان بهینه خواهد بود. می‌توان گفت راکتور بافل‌دار بی‌هوازی در زمان ماند بالاتر، عملکرد بهتری خواهد داشت؛ زیرا نسبت زمان ماند تجربی به تئوریک تقریباً برابر با ۱ به دست آمده است.

با کسر درصد فضای فعال از واحد، میزان فضای غیر فعال راکتور به دست می‌آید. این مقدار برای زمان ماند ۱۱۰ دقیقه،

۴- نتیجه‌گیری

راکتور بافل‌دار بی‌هوای راکتوری با عملکرد هیدرودینامیکی نسبتاً مناسب است و عمده حجم راکتور را فضای فعال تشکیل می‌دهد. همچنین این راکتور در زمان ماند نزدیک به بهینه عمل می‌کند. راندمان هیدرولیکی این راکتور بالا بوده و کارایی هیدرولیکی مناسبی را در مرحله بهره برداری خواهد داشت. به نظر می‌رسد با افزایش زمان اقامت هیدرولیکی جریان در راکتور، حجم غیر فعال راکتور کاهش یافته و در مقابل امکان بروز جریانات کوتاه افزایش می‌یابد. این راکتور دارای انتشار نسبتاً پایینی بوده و به سمت راکتورهای نهرگونه گرایش دارد.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله از زحمات و کمک‌های فراوان خانم مهندس رباب حسن‌وند جمادی، در تهیه ماده ردیاب و اندازه‌گیری آن نهایت تشکر را می‌نمایند. همچنین زحمات آقایان مهندس رضا ذوقی‌پور و مهندس احمد نظری، در ساخت پایلوت مورد استفاده، قابل تقدیر فراوان است.

ماند ۱۱۰ دقیقه، راندمان راکتور برابر ۸۰٪ و برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه برابر ۸۸٪ به دست آمده است. بالاتر بودن راندمان برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه به دلیل بیشتر بودن فضای فعال قابل توجه است. مقادیر به دست آمده بیانگر این است که در حالت کلی راکتور ABR سیستمی با راندمان هیدرولیکی بالاست. اعداد انتشار و پکلت برای زمان ۱۱۰ دقیقه، به ترتیب ۰/۰۵۲ و ۱۹/۲۱ و برای زمان ماند ۳۳۲ دقیقه، ۰/۰۵۵ و ۱۸/۲۵ به دست آمد. این مقادیر که نشان دهنده میزان انتشار در راکتور می‌باشد، تفاوت چندانی با هم ندارند. یعنی با تغییر زمان ماند هیدرولیکی، تغییری در میزان انتشار داخل راکتور به وجود نیامده است. لذا می‌توان گفت که میزان انتشار در راکتور به زمان ماند آن بستگی ندارد.

عدد پکلت برابر ۵ (عدد انتشار برابر ۰/۲) مرز بین انتشار بالا و پایین است [۲۶]. در صورتی که عدد پکلت کمتر از ۵ باشد (عدد انتشار بیشتر از ۰/۲) انتشار موجود در راکتور بالا در نظر گرفته می‌شود و بالعکس. با توجه به این معیار می‌توان ادعا کرد که انتشار در راکتور بافل‌دار بی‌هوای بسیار کم بوده و لذا راکتور بسیار به راکتورهای نهرگونه ایده‌آل نزدیک است. جدول (۱) خلاصه شاخص‌های مطالعه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- شاخص‌های هیدرودینامیکی راکتور ABR مورد بررسی

زمان ماند تفویک (دقیقه)	واریانس	زمان ماند تجربی (دقیقه)	حجم مفید (%)	حجم مرده (%)	شاخص اتصال کوتاه	راندمان هیدرولیکی (%)	عدد انتشار	عدد پکلت
۱۱۰	۰/۰۹۹	۹۸	۰/۸۹۰	۱۱/۱۴	۰/۴۰۹	۸۰	۰/۰۵۲	۱۹/۲۱
۳۳۲	۰/۱۰۴	۳۲۷	۰/۹۸۵	۱/۵	۰/۲۵۲	۸۸	۰/۰۵۵	۱۸/۲۵

۶- مراجع

Baffled Reactor as Onsite Wastewater Treatment System", *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22 (9), 1319-1326.

[۵] بدلیانس قلی‌کندی، گ.، علی قارداشی، ا.، جمشیدی، ش.، حسن‌وند جمادی، م.، "بررسی مقایسه‌ای هیدرودینامیک جریان در راکتورهای بی‌هوای تصفیه فاضلاب با سرعت بالا"، مجموعه مقالات دومین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی محیط زیست، همدان، ۱۳۹۲.

[6] Barber, W. P., Stuckey, D. C., "The Use of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) for Wastewater Treatment: A Review", *Water Research*, 1999, 33 (7), 1559-1578.

[1] Smith, P. G., Scott, J. S., "Dictionary of Water and Waste Management", Second Edition, IWA Publishing, London, UK, 2005.

[2] Bachmann, A., Beard, V. L., McCarty, P. L., "Comparison of Fixed-Film Reactors with a Modified Sludge Blanket Reactor", *The 1st International Conference on Fixed-Film Biological Processes*, 1982, pp 1192-1211.

[3] Bachmann, A., Beard, V. L., McCarty, P. L., "Performance Characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor", *Water Research*, 1985, 19 (1), 99-106.

[4] Sarathai, Y., Koottatep, T., Morel, A., "Hydraulic Characteristics of an Anaerobic

- [17] Persson, J., Somes, N. L. G., Wong, T. H. F., "Hydraulics Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds", *Water Science and Technology*, 1999, 40 (3), 291-300.
- [18] Reynolds, T. D., Richards, P. A., "Unit Operations and Processes in Environmental Engineering", 2nd Edition, PWS Publishing Co., Boston, 1996.
- [19] Yang, Y. J., Goodrich, J. A., Clark, R. M., Li, S. Y., "Modeling and Testing of Reactive Contaminant Transport in Drinking Water Pipes: Chlorine Response and Implications for Online Contaminant Detection", *Water Resources*, 2008, 42, 1397-1412.
- [20] Levenspiel, O., "Chemical Reaction Engineering", 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, US, 1999.
- [21] Patiño, P., Cruz, C., Torres, P., Laín, S., "Hydrodynamic Evaluation of a Hydraulic Clarifier through Hydraulic Behaviour Indicators and Simplified Flow Models", *Ingeniería e Investigación*, 2012, 32 (1), 77-82.
- [22] Young, H. W., Young, J. C., "Hydraulic Characteristics of Upflow Anaerobic Filter", *Journal of Environment Engineering*, 1988, 114, 621-638.
- [23] Xiao-Lei, L., Nan-qi, R., Chun-li, W., "Hydrodynamic Characteristics of a Four-Compartment Periodic Anaerobic Baffled Reactor", *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19, 1159-1165.
- [24] Zheng, M. X., Wang, K. J., Zuo, J. E., Yan, Z., Fang, H., Yu, J. W., "Flow Pattern Analysis Of A Full-Scale Expanded Granular Sludg Bed-Type Reactor Under Different Organic Loading Rates", *Bioresource Technology*, 2012, 107, 33-40.
- [25] Grobicki, A. M. W., Stuckey, D. C., "Hydrodynamic Characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor", *Water Research*, 1992, 26, 371-378.
- [26] Ji, J., Zheng, K., Xing, Y., Zheng, P., "Hydraulic Characteristics and Their Effects on Working Performance of Compartmentalized Anaerobic Reactor", *Bioresource Technology*, 2012, 116, 47-52.
- [7] Dama, P., Bell, J., Brouckaert, C. J., Buckley, C. A., Stuckey, D. C., "Computational Fluid Dynamics: Application to the Design of The Anaerobic Baffled Reactor", *WISA Biennial Conference*, Sun City, South Africa, 2000.
- [8] Fogler, H. S., "Elements of Chemical Reaction Engineering", 4th Edition, Pearson Education, Inc., Massachusetts, US, 2006.
- [9] Metcalf, E., "Wastewater Engineering, Treatment and Reuse", 4th Edition, McGraw-Hill, New York, US, 2003.
- [10] DeCoursey, W. J., "Statistics and Probability for Engineering Applications with Microsoft Excel", Newnes, Elsevier Science, New York, 2003.
- [11] Parsamehr, M., "Modeling and Analysis of a UASB Reactor", MSc Thesis, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå University of Technology, 2012.
- [12] Tsai, D. W., Rmaraj, R., Chen, P. H., "A Method of Short-Circuiting Comparison", *Water Resource Management*, 2012, 26, 2689-2702.
- [13] Persson, J., "Hydraulic Efficiency in Pond Design", PhD Thesis, Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Sweden, 1999.
- [14] Dierberg, F. E., Juston, J. J., DeBusk, T. A., "Relationship between Hydraulic Efficiency and Phosphorus Removal in a Submerged Aquatic Vegetation-Dominated Treatment Wetland", *Journal of Ecological Engineering*, 2005, 25, 9-23.
- [15] Singh, S., Haberl, R., Moog, O., Raj Shrestha, R., Shrestha, P., Shrestha, R., "Performance of Anaerobic Baffled Reactor and Hybrid Constructed Wetland Treating High-Strength Wastewater in Nepal-A Model for DEWATS", *Journal of Ecological Engineering*, 2009, 35, 654-660.
- [16] Xanthos, S., Gong, M., Ramalingam, K., Fillos, J., Deur, A., Beckmann, K., McCorquodale, J. A., "Performance Assessment of Secondary Settling Tanks Using CFD Modeling", *Water Resources Management*, 2011, 25, 1169-1182.

EXTENDED ABSTRACT

The Investigation of Hydrodynamic Characteristics of a Lab Scale Anaerobic Baffled Reactor

Abolghasem Alighardashi ^{a,*}, Mehdi Hassanvand Jamadi ^a, Gagik Badalians Golikandi ^a, Shervin Jamshidi ^b

^a Faculty of Water and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^b Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 17 August 2015; **Accepted:** 22 February 2016

Keywords:

Flow hydrodynamics, Anaerobic baffled reactor, Retention time distribution curve

1. Introduction

Anaerobic baffled reactor (ABR) consists of a series of continuous chambers divided into two upflow and downflow parts by a baffle. ABR could effectively purify high strength wastewater types with negligible surplus sludge and doesn't need a settlement tank [1]. ABR is a treatment system based on its hydrodynamic characteristics and so, the hydrodynamic study of the current flow is an important issue about it. In this study, the hydrodynamic characteristics of the reactor are investigated. Also, the regime of passing flow is discussed.

2. Methodology

A 6 liters 8 chambers anaerobic baffled reactor is used as lab scale pilot. The tracer test has been applied at times of 110 and 332 minutes and retention time distribution (RTD) curves have been achieved. By means of RTD analysis, the hydrodynamics of the reactor could be available.

For some reasons such as non-ideal operation conditions, a percent of reactor volume doesn't involve in occurred processes in the reactor. This part is called inactive or dead volume. Also the effective volume of total reactor volume is called active volume. In this study the active and inactive volume of ABR are investigated.

The other assessed factor is short-circuiting. Short-circuiting is an undesirable phenomenon occurs because of inadequate mixing; dense current resulted from temperature differences; eddy formation; poor design and axial dispersion (in plug reactors) [2].

Using the axial dispersion model, this work assesses the flow regime of ABR. Dimensionless numbers of dispersion and Peclet are used to investigate the dispersion within the reactor. The low dispersion number (high Peclet number) indicates the low mixing and plug flow within the reactor.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the RTD for times of 110 and 332 minutes. The variance of curve is 0.099 and 0.104 for 110 and 332 minutes, respectively. It shows the stability of curve variance in various retention times. The experimental retention times of reactor calculated as 98 and 327 minutes, respectively for theoretical times of 110 and 332 minutes. It shows that real retention time of fluid is less than theoretical time. Since a part of reactor volume does not take part in its active space, the effective reactor volume is less than the total volume. Because of constant flow rate and less effective volume, the retention time will be lessen. The ratio of experimental retention time/theoretical retention time is 0.89 for time of 110 minutes and 0.985 for 332 minutes. This ratio also announces the active volume of reactor.

* Corresponding Author

E-mail addresses: alighardashi@pwut.ac.ir (Abolghasem Alighardashi), mehdi0h@yahoo.com (Mehdi hassanvand Jamadi), g.badalians@yahoo.com (Gagik Badalians Golikandi), jamshidi.wri@gmail.com (Shervin Jamshidi).

Deduction of active volume from unit, gives the inactive volume percentage. Inactive volume is 11.14% for 110 minutes and just 1.5% for 332 minutes. It indicates a prominent reduction of inactive volume by increasing the retention time.

The short-circuiting index, that reveals the ratio of first tracer exit time to retention time of reactor, is 0.409 and 0.252 for times of 110 minutes and 332 minutes, respectively. The near zero ratio, the higher probability of short-circuiting and the ratio less than 0.3 indicates a great amount of short paths [3]. According to this, the reactor has a considerable short-circuiting in the time of 332 minutes.

The hydraulic efficiency depends on the variance of RTD curve and the active volume of the system. At the time of 110 minutes, it is equal to 80%. Also, the efficiency is 88% when the time is 332 minutes. These amounts shows the high efficiency of ABR.

The dimensionless dispersion and Peclet numbers are 0.052 and 19.21 for 110 minutes and are 0.055 and 18.25 for 332 minutes. These indicators are almost equal at both of retention times. It shows that the dispersion content of ABR is not dependent on the retention time. Also the Peclet number of 5 is the index [4]. The Peclet number lesser than 5 shows high dispersion in the reactor. As the resulted Peclet numbers at this study are more than 5, the reactor approaches to a plug flow one.

All compared factors are shown in Table. 1. Based on this table, ABR is a reactor with proper hydraulic conditions and its main volume is the active volume. Also, ABR acts in its optimum retention time.

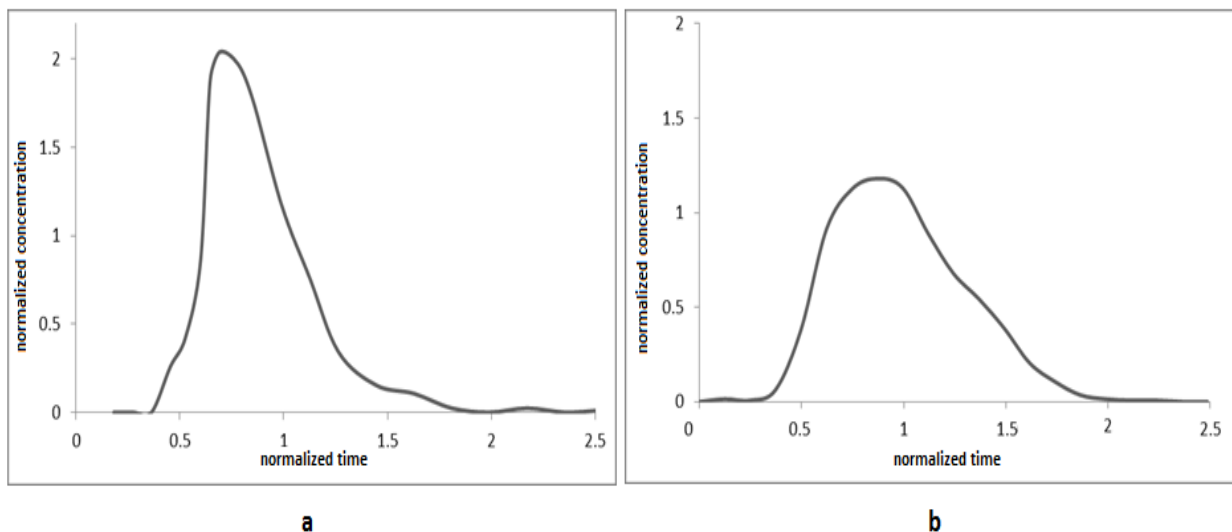


Fig. 1. The RTD curves for a) 110 and b) 332 minutes

Table 1. Hydrodynamic indexes resulted for studied ABR

Theoretical HRT (min)	Variance	Experimental HRT (min)	Active volume (%)	Inactive volume (%)	Short-circuiting index	Hydraulic efficiency (%)	Dispersion number	Peclet number
110	0.099	98	0.89	11.14	0.409	80	0.052	19.21
332	0.104	327	0.985	1.5	0.252	88	0.055	18.25

4. Conclusions

Anaerobic baffled reactor is a system with suitable hydraulic function and major percent of its volume is active space. Also, the reactor acts in almost its optimum retention time. The hydraulic efficiency of ABR is high and it is a capable hydraulic system in operation step. It seems that the increasing of retention time, decreases inactive volume percent but increases the short-circuiting probability. The dispersion is low and ABR is close to plug-flow reactors.

5. References

- [1] Smith, P. G., Scott, J. S., "Dictionary of Water and Waste Management", Second Edition, IWA Publishing, London, UK, 2005.

- [2] Metcalf, E., "Wastewater Engineering, Treatment and Reuse", 4th Edition, McGraw-Hill, New York, US 2003.
- [3] Sarathai, Y., Koottatep, T., Morel, A., "Hydraulic Characteristics of an Anaerobic Baffled Reactor as Onsite Wastewater Treatment System", *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22 (9), 1319-1326.
- [4] Ji, J., Zheng, K., Xing, Y., Zheng, P., "Hydraulic Characteristics and Their Effects on Working Performance of Compartmentalized Anaerobic Reactor", *Bioresource Technology*, 2012, 116, 47-52.