

عملکرد بیولوژیکی راکتور چند محفظه بی‌هوایی در تصفیه شیرابه

سیدرضا محتشمی^۱

ایوب کریمی جشنی^۲

ناصر طالب بیدختی^۳

(دریافت ۸۶/۸/۲۱ پذیرش ۸۶/۱۲/۲۸)

چکیده

شیرابه محل دفن، یکی از آلوده‌ترین انواع فاضلاب می‌باشد که به دلیل استفاده وسیع از لندفیل‌های شهری برای دفع نهایی پسماندها، نگرانیهای بهداشتی و زیست‌محیطی فراوانی ایجاد کرده است. در این تحقیق، شیرابه محل دفن شیراز با موفقیت و با استفاده از راکتور ABR چهار محفظه‌ای با حجم ۶۴ لیتر و زمان ماند هیدرولیکی ۴ روز، مورد تصفیه بیولوژیکی قرار گرفت. راکتور در بارگذاری‌های آلی ۱/۲، ۳، ۵ و ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز، به ترتیب ۸۲/۳۸، ۸۵/۱۹، ۸۲/۵۳، ۸۲/۲۲ و ۸۰/۱۲ درصد COD را تصفیه کرد. با نمونه‌گیری و انجام آزمایش مشخص شد که فعالیت اسیدسازی در محفظه اول راکتور حداکثر بوده و کمترین میزان pH برابر با ۶/۵۴ در این محفظه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میزان قلیابیت شیرابه در ABR به دلیل شکل‌گیری قلیابیت آمونیاکی افزایش یافته و به مقدار خروجی حداکثر ۶۲۹۱ میلی‌گرم در لیتر (برحسب کربنات کلسیم) در بارگذاری آلی ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز رسید. در این تحقیق، خصوصیات هیدرودینامیکی و قابلیت بیولوژیکی راکتور چند محفظه بی‌هوایی (ABR) نیز مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های توزیع زمان ماند (RTD) به روش پله‌ای بر روی راکتور، پس از رسم نمودار و مقایسه آزمایش با مدل نظری، نتایج نشان داد که تعداد راکتورهای CFSTR متوالی مدل، برابر با تعداد محفظه‌های ABR می‌باشد (N=4).

واژه‌های کلیدی: راکتور چند محفظه بی‌هوایی، شیرابه محل دفن، توزیع زمان ماند، ردیاب پله‌ای، تصفیه بیولوژیک.

Performance of Anaerobic Baffled Reactor (ABR) in Landfill Leachate Treatment

Seyed Reza Mohtashami¹ Ayob Karimie Jashnie² Naser Taleb Bidokhti³

(Received Nov. 12, 2007 Accepted Mar. 18, 2008)

Abstract

Landfill leachate is one of the most contaminated wastewaters. Because of the widespread use of municipal landfills for final disposal of solid waste, there is an increasing concern over their public health and environmental hazards. In this study, the landfill leachate of city of Shiraz was successfully treated using an ABR system of 4 compartments with a capacity of 64 liters volume and a hydraulic retention time of 4 days. COD removal efficiencies of 82.38, 85.19, 82.22, and 80.12 per cent were achieved for organic loading rates (OLR) of 1.2, 2, 3, 5, and 7.75 kg COD/m³/day, respectively. Sampling and test results revealed that the highest activity of acidogenesis bacteria belonged to the 1st compartment with the least amount of pH=6.54. It was shown that due to the formation of ammonia alkalinity in the reactor, there was a slight increase in the alkalinity of leachate with the maximum effluent amount of 6291 mg/l (as CaCO₃) in OLR=7.75 kg COD/m³/day. In this study, hydrodynamic characteristics and biological performance of an anaerobic baffled reactor (ABR) was also investigated. Residence time distribution (RTD) test with step input method was carried out on ABR. According to the graphs and theoretical model results, the number of CFSTRs was equal to the number of the ABR compartments (N=4).

Keywords: Anaerobic Baffled Reactor, Landfill Leachate, Residence Time Distribution, Step Tracer, Biological Treatment.

1. M.Sc. Student, Department of Civil Eng., Shiraz University, s.r.mohtashami@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Civil Eng., Shiraz University
3. Professor, Department of Civil Eng., Shiraz University

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه شیراز، s.r.mohtashami@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی، بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

۳- استاد دانشکده مهندسی، بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

پسماند و نیز به دلیل نفوذ رطوبت ناشی از بارندگی به لایه‌ها، مایعی بسیار آلوده به نام " شیرابه " تولید می‌شود [۸].

پس از آنکه پسماند در لندفیل دفن شد، تغییر فاز از مرحله کوتاه مدت اسیدی (هوازی)، به مرحله بسیار طولانی تر اسیدسازی و متان‌سازی (بی‌هوازی) اتفاق می‌افتد. شیرابه تولید شده در مرحله اسیدی حاوی مقدار زیادی از اسیدهای چرب فرآر^۶ می‌باشد. این مواد که از وزن مولکولی کوچکی برخوردارند، بخش اعظم مواد آلی موجود در شیرابه را تشکیل داده و از لحاظ بیولوژیکی نیز به آسانی تجزیه پذیر می‌باشند [۹]. نسبت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی به اکسیژن خواهی شیمیایی (BOD/COD) شیرابه تازه در مرحله اسیدی ۰/۴ تا ۰/۵ می‌باشد [۱۰].

در طول مرحله متان‌سازی، باکتری‌های متان‌ساز اسیدهای چرب فرآر را تجزیه کرده و با کاهش میزان مواد آلی شیرابه، pH را به بالاتر از ۷ افزایش می‌دهند. پس از این تجزیه، تنها ترکیبات هیومیک^۷ که وزن مولکولی بیشتری دارند در شیرابه باقی می‌مانند. از آنجا که BOD بسیار سریع‌تر از COD کاهش می‌یابد، نسبت BOD/COD در شیرابه تثبیت شده کمتر از ۰/۱ می‌باشد [۱۱].

به طور کلی خصوصیات شیرابه به عوامل مختلفی مانند ترکیبات پسماند، میزان تثبیت پسماند، هیدرولوژی سایت دفن، درصد رطوبت، میزان کوبش در هنگام دفن، تغییرات آب و هوایی و سن لندفیل بستگی دارد. در جدول ۱ خصوصیات نوعی شیرابه لندفیل در سالهای مختلف نشان داده شده است.

تاکنون تحقیقات متعددی به منظور تصفیه شیرابه صورت گرفته و روشهای موفقی نیز ارائه شده است. این روشها شامل روشهای فیزیکی - شیمیایی، تبخیر پیشرفته، فناوری غشایی، راکتورهای بیولوژیک مانند UASB^۸ و ... می‌باشد [۱۲-۱۵].

بررسی تحقیقات سایرین نشان داد که تاکنون تصفیه شیرابه قوی لندفیل به وسیله راکتور چند محفظه بی‌هوازی (ABR) مورد مطالعه و آزمایش قرار نگرفته است. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی قابلیت تصفیه پذیری شیرابه قوی لندفیل به وسیله ABR و ارزیابی عملکرد راکتور در بارگذاری‌های آلی مختلف می‌باشد. به علاوه برای آنکه ببینیم راکتور ABR مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به وسیله راکتورهای CFSTR متوالی، که تعداد CFSTRها برابر با تعداد واقعی محفظه‌های ABR است، مدل کرد یا نه، آزمایش‌های هیدرودینامیکی بر روی سیستم صورت گرفت.

تصفیه بیولوژیکی یکی از متداول‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روشهای تصفیه فاضلاب در دنیاست. بهره‌گیری صحیح از فناوری بی‌هوازی در تصفیه فاضلابهای صنعتی، در نتیجه توسعه و به کارگیری راکتورهای قوی بیولوژیکی بی‌هوازی حاصل می‌شود [۱]. یکی از راکتورهای نسبتاً جدید در این نوع، راکتور چند محفظه بی‌هوازی^۱ می‌باشد. این راکتور برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ توسط مک کارتی^۲ و همکارانش در دانشگاه استنفورد مورد استفاده قرار گرفت [۲]. ABR در واقع یک راکتور بی‌هوازی با رژیم هیدرولیکی لوله‌ای^۳ است که به چند محفظه تقسیم شده است. شکل خاص راکتور باعث می‌شود فاضلاب در طی مسیر ورودی تا خروجی، چندین بار با سرعت کم، متناوباً به سمت بالا و پایین حرکت کند. این نوع خاص از رژیم هیدرولیکی، توده بیولوژیکی را برای مدت طولانی درون راکتور نگه داشته و موجب می‌شود لایه‌ای از باکتری‌های بی‌هوازی در کف راکتور ته نشین شود. فاضلاب چندین مرتبه از میان این لایه از توده بیولوژیکی عبور کرده و به این ترتیب عمل تصفیه صورت می‌پذیرد. از خصوصیات منحصر به فرد ABR، می‌توان به قابلیت جداسازی فعالیت باکتری‌های اسیدساز و متان‌ساز اشاره کرد. این عمل باعث می‌شود که راکتور در برابر شوک‌های هیدرولیکی و نیز تغییرات ناگهانی بار آلی^۴ ورودی، مقاومت بالایی از خود نشان دهد. تولید گاز متان برای استفاده در تصفیه‌خانه و عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، عدم وجود قطعات متحرک در راکتور، عدم نیاز به نیروی کارگر ماهر و هزینه‌های اندک بهره‌برداری از سایر مزایای ABR می‌باشد. بنا بر خصوصیات ذکر شده، تاکنون تحقیقات متعددی صورت گرفته و انواع مختلف فاضلابهای قوی صنعتی توسط ABR با موفقیت تصفیه شده‌اند [۳-۶].

دفن پسماندها در لندفیل^۵های شهری، مرسوم‌ترین روش دفع نهایی در کشورهای مختلف دنیاست. در محل دفن، پسماندها در لایه‌های نسبتاً نازکی پخش شده و پس از کوبیده شدن و کاستن حجم به کم‌ترین مقدار ممکن، در پایان هر روز به وسیله لایه‌ای از خاک پوشیده می‌شوند [۷]. پس از دفن پسماند، تغییرات و واکنش‌های فیزیکی - شیمیایی و بیولوژیکی مختلفی بر روی آن صورت می‌گیرد. در نتیجه این فعل و انفعالات و تجزیه قسمت آلی

¹ Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

² McCarty

³ Plug Flow

⁴ Organic Loading Rate (OLR)

⁵ Landfill

⁶ Volatile Fatty Acids

⁷ Humic

⁸ Upflow Anaerobic Sludge Blanket

جدول ۱- خصوصیات و ترکیبات نوعی شیرابه لندفیل* [۷]

سن لندفیل			ویژگی
سال ۱۶	سال ۵	سال ۱	
۸۰	۴۰۰۰	۷۵۰۰-۲۸۰۰	BOD
۴۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰-۴۰۰۰۰	COD
-	۶/۳	۶/۴-۵/۲	pH
-	-	۷۰۰-۱۰۰	TSS
۲۲۵۰	۵۸۱۰	۴۰۰۰-۸۰۰	قلیابیت (CaCO ₃)
-	-	۴۸۲-۵۶	نیتروژن آمونیاکی
۱/۶	۰/۵	۰/۸-۰/۲	نترات
۲	۲	۶۵۰-۴۰۰	سولفات
۰/۶	۶/۳	۳۲۵-۲۱۰	آهن
کمتر از ۰/۰۵	کمتر از ۰/۰۵	-	کادمیم
۱	۰/۵	-	سرب

* همه مقادیر به جز pH بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- راکتور ABR

راکتور ABR از جنس پلکسی گلاس (با ضخامت ۸ میلی‌متر برای دیواره خارجی و ۴ میلی‌متر برای قطعات داخلی) به طول، عرض و ارتفاع ۸۰، ۲۰ و ۵۵ سانتی‌متر ساخته شد. راکتور شامل چهار محفظه و به حجم مفید ۶۴ لیتر بود. هر محفظه دارای یک بخش پایین رو و بالارو به نسبت عرضی ۳:۱ بود که دیواره بخش پایین رو به قطعه‌ای با زاویه ۴۵ درجه، که باعث بهبود اختلاط در بخش بالارونده می‌گردید، منتهی می‌شد. همچنین شیرهای نمونه‌گیری در چهار قسمت بالارونده برای نمونه‌گیری در طول ABR تعبیه شد. در شکل ۱ نمایی از راکتور نشان داده شده است.

۲-۲- آزمایش هیدرودینامیکی

به منظور بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی سیستم، قبل از شروع مرحله تصفیه، آزمایش ردیاب^۱ پله‌ای انجام شد. راکتور از آب خالص پر شده و ورودی سیستم با آب حاوی کلرید سدیم جایگزین شد. سپس در فواصل زمانی مشخص، از خروجی نمونه‌گیری شد و غلظت خروجی تعیین گردید. به منظور تعیین غلظت، در ابتدا نمونه‌هایی با غلظت‌های مشخص آماده شد و با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، منحنی کالیبراسیون آنها تهیه گردید. طول زمان آزمایش به مدت سه برابر زمان ماند هیدرولیکی سیستم ادامه یافت.

نمودار F خروجی (شکل بی بعد غلظت خروجی) که نشان دهنده N راکتور CFSTR متوالی است، از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۶].

$$F = 1 - e^{-N\theta} \left[1 + N\theta + \frac{(N\theta)^2}{2!} + \dots + \frac{(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} + \dots \right] \quad (1)$$

مقادیر بی بعد غلظت (F) و زمان (θ) توسط روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$F = \frac{C_t}{C_{tracer}} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{t}{HRT} \quad (3)$$

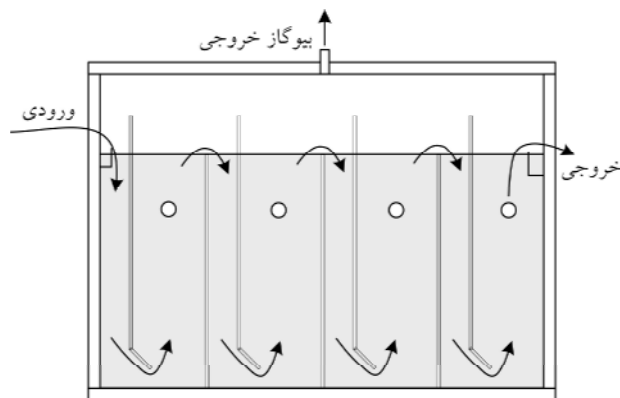
که در آن:

N تعداد CFSTRهای ایدئال متوالی، C_t غلظت خروجی در زمان t، C_{tracer} غلظت ورودی، t زمان از لحظه تغییر ورودی از آب خالص به آب حاوی کلرید سدیم و HRT زمان ماند هیدرولیکی است.

منحنی F به دست آمده از آزمایش، با منحنی F مدل نظری CFSTRهای متوالی مقایسه شده و با استفاده از رابطه ۴ مشخص می‌شود که آیا نظریه مخزنهای متوالی، به طور دقیق توصیف کننده رژیم هیدرولیکی راکتور ABR بوده و نیز نمونه‌های گرفته شده از هر شیر نمونه‌گیری، معرف ویژگیهای مایع درون آن محفظه (در اینجا شیرابه) می‌باشد یا خیر.

² Continuous Flow Stirred Tank Reactor

¹ Tracer



شکل ۱- نمایی از راکتور ABR مورد استفاده در این تحقیق

از یک عدد پمپ پرستالتیک قابل تنظیم استفاده شد که دبی ورودی به سیستم را به میزان ۱۶ لیتر در روز در طول دوره آزمایش ثابت نگه می‌داشت. این میزان دبی، معادل چهار روز زمان ماند هیدرولیکی بود. برای توزیع یکنواخت شیرابه در ورودی و خروجی راکتور، از سرریزهایی با لبه V شکل استفاده گردید. بیوگاز تولیدی در اثر فعالیتهای بی‌هوازی از طریق خروجی تعبیه شده در قسمت بالایی راکتور تخلیه می‌گردید.

پس از پرکردن راکتور از لجن بی‌هوازی، شیرابه با غلظت COD ۴۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر (معادل بار آلی ۱/۲) به سیستم وارد شد [۱]. همان طور که ذکر شد دبی ورودی در طول آزمایش ۱۶ لیتر در روز ثابت بود. پس از رسیدن سیستم به حالت تعادل، غلظت COD ورودی و بار آلی سیستم افزایش می‌یافت. هنگامی که مقدار COD و pH خروجی برای چند روز تقریباً ثابت ماند، فرض شد که سیستم اصطلاحاً به حالت تعادل رسیده است. حداقل زمانی که برای تعادل در نظر گرفته شد، یک ماه بود. در این تحقیق، بارهای آلی ۱/۲، ۲، ۳، ۵ و ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز بر سیستم اعمال شد. آزمایش‌های صورت گرفته شامل میزان COD در ورودی و خروجی ABR، و pH و قلیاییت در ورودی، خروجی و نیز در محفظه‌های راکتور بود. تمام آزمایش‌ها براساس دستورالعمل کتاب روشهای استاندارد آزمایش آب و فاضلاب صورت گرفت [۱۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات هیدرودینامیکی ABR

در ابتدا محلولهایی با غلظتهای مختلف کلرید سدیم آماده شد و پس از اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی هر کدام، منحنی کالیبراسیون مربوطه رسم گردید (شکل ۲). از این نمودار برای تعیین غلظت نمونه‌های خروجی از راکتور استفاده شد.

$$R^2 = \frac{RSS_{CFM}}{TSS_{CFM}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

که در آن:

RSS_{CFM} جمع جزئی مربعات تصحیح شده نسبت به میانگین،

TSS_{CFM} جمع کلی مربعات تصحیح شده نسبت به میانگین،

\bar{y} میانگین مقدار y (در اینجا F آزمایش اختلاط)،

\hat{y} مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل،

y_i مقدار به‌دست آمده از آزمایش و

R^2 میزان تغییرات نسبت به میانگین است.

۳-۲- آزمایش بیولوژیکی

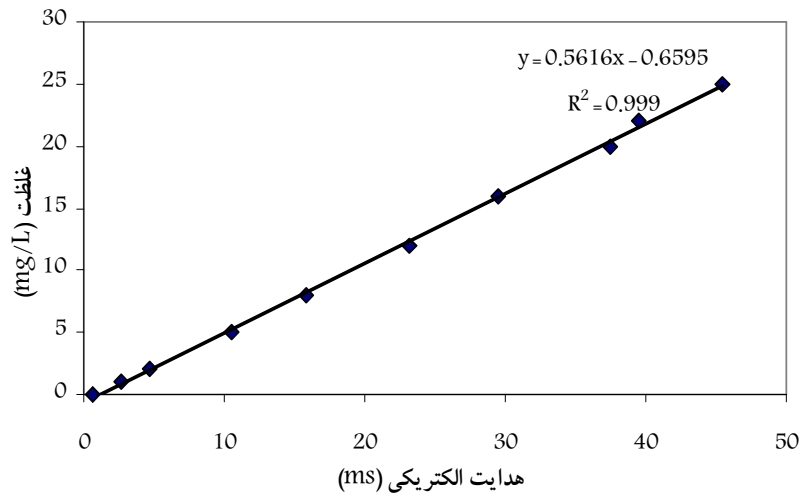
در شروع کار، نیمی از حجم راکتور توسط لجن بی‌هوازی که از بخش تحتانی لاگون بی‌هوازی تصفیه پساب لبنیاتی گرفته شده بود، پر شد (هر محفظه ۸ لیتر). به منظور حذف سنگریزه و دانه‌های درشت، لجن ابتدا از الک با دهانه ۲ میلی‌متر رد شد و سپس مورد استفاده قرار گرفت. لجن استفاده شده دارای TSS برابر با ۴۸ گرم در لیتر، و VSS^۱ برابر با ۳۲ گرم در لیتر بود.

راکتور در دمای $33 \pm 0.5/5$ درجه سانتی‌گراد در محدوده مزوفیلیک^۲ کار می‌کرد. گرمایش سیستم با به کارگیری چهار عدد المان گرم‌کننده الکتریکی قابل تنظیم که درون محفظه‌ها تعبیه شده بود، انجام شد. شیرابه مورد استفاده در تحقیق به طور منظم از محل دفن پسماند شیراز جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه آورده می‌شد. به منظور تغییر بار آلی ورودی به راکتور، شیرابه با آب شهری رقیق شده و در مخزن تغذیه ریخته می‌شد. جهت تزریق شیرابه به راکتور

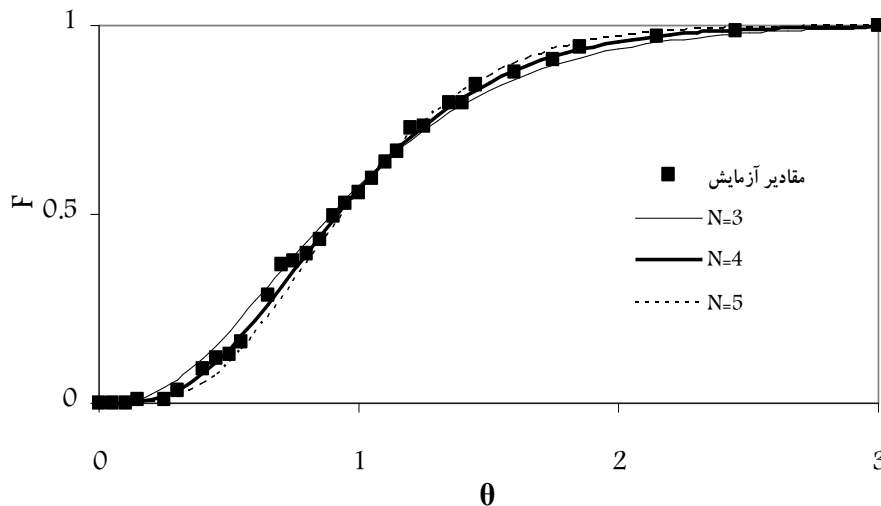
¹ Total Suspended Solids

² Volatile Suspended Solids

³ Mesophilic



شکل ۲- منحنی کالیبراسیون غلظت کلرید سدیم بر حسب هدایت الکتریکی



شکل ۳- مقدار F برای زمان ماند ۲۰ ساعت و منحنی‌های مدل N=3، N=4، و N=5

مدل با $N=4$ مقادیر تجربی آزمایش، همبستگی بیشتری دارد و این امر مطابق با این واقعیت است که تعداد محفظه‌های راکتور ABR مورد استفاده نیز ۴ عدد می‌باشد. بنابراین راکتور مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان به وسیله ۴ راکتور CFSTR متوالی مدل کرد. همچنین می‌توان اطمینان داشت که نمونه‌های گرفته شده از شیرهای نمونه‌گیری هر محفظه، معرف و بیانگر خصوصیات آن محفظه بوده و نتایج آزمایش‌های بیولوژیکی صحیح و قابل اعتماد است.

۳-۲- راندمان حذف COD با افزایش بارگذاری آلی

به منظور اُخت شدن لجن بی‌هوازی لجنیات با شیرابه محل دفن، بارگذاری اولیه با COD ۴۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر به مدت دو ماه حفظ شد. غلظت COD خروجی در پایان این دوره ۸۴۶ میلی‌گرم

به منظور بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی با استفاده از روش مخازن اختلاط کامل متوالی، آزمایش توزیع زمان ماند با زمان ماند هیدرولیکی ۲۰ ساعت با ورود پله‌ای کلرید سدیم به راکتور انجام و نمودار F غلظت خروجی ترسیم گردید. در شکل ۳ نمودار غلظت بی‌بعد F، بر حسب زمان بی‌بعد θ رسم شده و با نمودارهای نظری مدل $N=3$ ، $N=4$ و $N=5$ راکتور اختلاط کامل متوالی، بر روی هم قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقریباً هر سه مدل بیانگر خصوصیات ABR در شرایط آزمایش می‌باشند. سپس مقادیر R^2 برای هر سری از مقادیر نظری محاسبه گردید. جدول ۲ خلاصه نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

¹ Residence Time Distribution (RTD)

اسیدسازی و متان‌سازی در تصفیه بی‌هوازی شده و مقاومت سیستم را در برابر تغییرات و افزایش بار آلی بالا می‌برد [۱]. درصد حذف COD در همه بارگذاری‌های انجام شده بیشتر از ۸۰ درصد بود. در شکل ۴ مقادیر حذف COD در بارگذاری‌های مختلف نشان داده شده است.

در تحقیقی در سال ۲۰۰۰، آقایان وانگ^۱ و شن^۲، شیرابه لندفیل با COD نسبتاً پایین ۳۷۰۰ تا ۸۸۸۵ میلی‌گرم در لیتر را پس از مخلوط کردن و رقیق سازی با فاضلاب شهری به راکتور ABR با حجم ۱۳/۲ لیتر وارد کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که حداکثر میزان حذف COD برابر با ۴۰ درصد است که در مقایسه با میزان تصفیه شیرابه و حذف COD در این تحقیق بسیار پایین‌تر می‌باشد [۱۸].

¹ Wang
² Shen

در لیتر بود. با افزایش بارگذاری آلی وارد شده به راکتور، غلظت COD خروجی به تدریج افزایش یافت. این مقدار در بارگذاری آلی ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز برابر با ۶۱۶۴ میلی‌گرم در لیتر بود. با این وجود، با توجه به غلظت بالای انواع آلودگیها مانند COD، BOD، TSS، آمونیاک، فلزات سنگین و نیز حضور مواد سمی محدود کننده رشد بیولوژیکی، که از خصوصیات کلی شیرابه محل دفن می‌باشد، راکتور ABR عملکرد بسیار خوبی در تصفیه از خود نشان داد. نتایج مربوط به میزان COD ورودی و خروجی ABR در جدول ۳ آورده شده است.

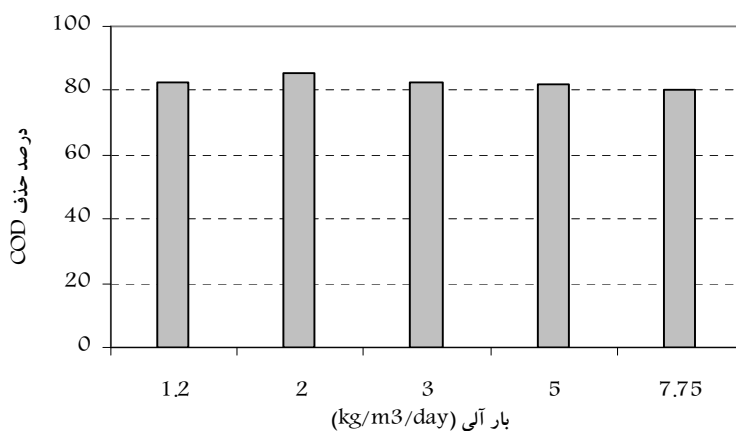
در طول کارکرد سیستم، معمولاً پس از افزایش بار آلی، غلظت COD خروجی به یک‌باره زیاد می‌شد ولی پس از چند روز، راکتور افزایش بار را تحمل کرده و راندمان حذف افزایش می‌یافت. این امر از مهم‌ترین ویژگیهای ABR می‌باشد که به دلیل ساختار فیزیکی و رژیم هیدرولیکی خاصی که دارد، باعث جداسازی فازهای

جدول ۲- مقایسه همبستگی مقادیر تجربی با مدل

مدل منحنی F	R ²
N = 3	۰/۹۱۱
N = 4	۱/۰۰۵
N = 5	۱/۰۷۸

جدول ۳- مقدار COD ورودی و خروجی در دوره کارکرد ABR

میانگین غلظت COD خروجی (mg/L)	میانگین غلظت COD ورودی (mg/L)	زمان ماند هیدرولیکی (روز)	بار آلی (kgCOD/m ³ /day)
۸۴۶	۴۸۰۰	۴	۱/۲
۱۱۸۵	۸۰۰۰	۴	۲
۲۰۹۶	۱۲۰۰۰	۴	۳
۳۵۵۷	۲۰۰۰۰	۴	۵
۶۱۶۴	۳۱۰۰۰	۴	۷/۷۵



شکل ۴ - میزان حذف COD در بارهای آلی مختلف

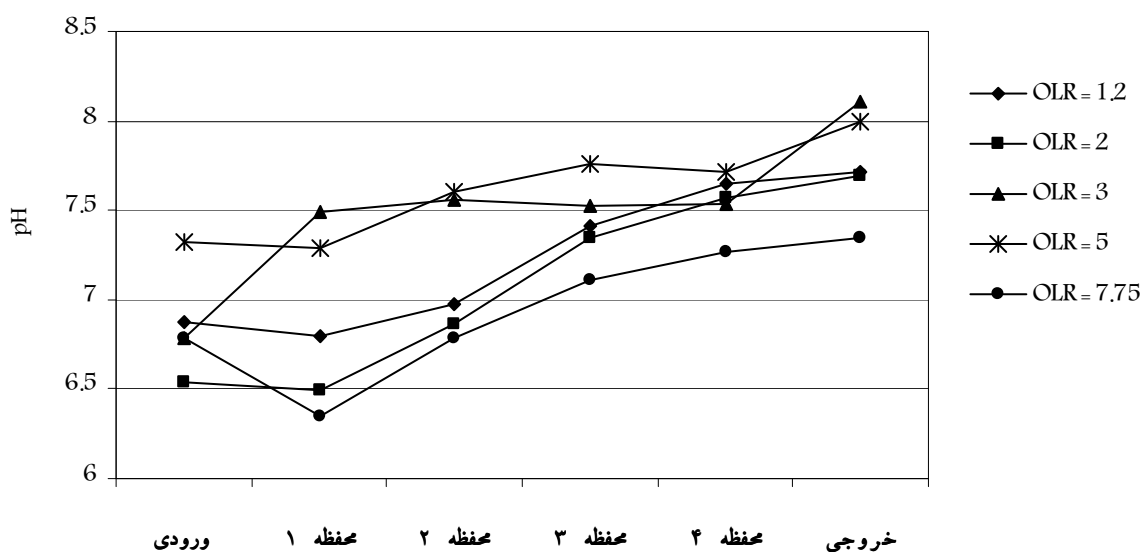
۳-۳- تغییرات pH

مقدار pH شیرابه ورودی بین ۶/۵۴ و ۷/۳۲ متغیر بود. این مقدار در خروجی بین ۷/۳۵ و ۸/۱۱ بود که علی‌رغم افزایش، در محدوده بهینه قرار می‌گیرد. این مقادیر بدون اضافه نمودن مواد به منظور تنظیم pH به دست آمد. همان طور که در شکل ۵ و جدول ۴ نشان داده شده است، پس از ورود شیرابه به راکتور، به جز در بار آلی ۳ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز، pH در محفظه اول کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود می‌رسد. دلیل آن را می‌توان آغاز مرحله اسیدسازی بی‌هوازی و تجمع اسیدهای چرب فرآر در محفظه اول دانست. این امر نشان دهنده موفقیت راکتور در جداسازی مراحل اسیدسازی و متان‌سازی می‌باشد. با پیشروی شیرابه در طول راکتور و مصرف اسیدهای چرب فرآر توسط باکتری‌های متان‌ساز، pH به تدریج افزایش یافته و به مقدار حداکثر خود در خروجی می‌رسد.

۴-۳- تغییرات قلیابیت

مقدار قلیابیت ورودی بین ۲۰۲۱ و ۴۹۶۵ میلی‌گرم در لیتر (برحسب کربنات کلسیم) بود. همان طور که در شکل ۶ و جدول ۵

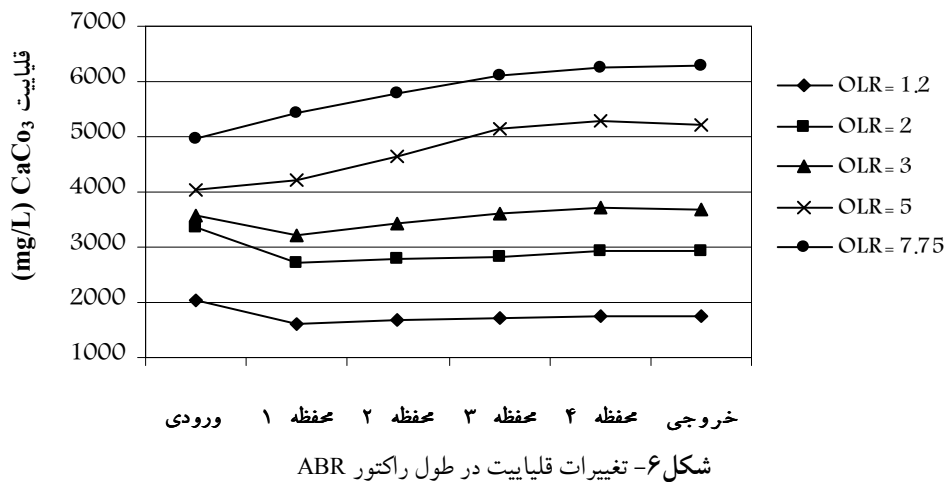
مشخص است، قلیابیت شیرابه در محفظه اول در بارگذاری‌های پایین، اندکی کاهش یافته است. همان طور که پیشتر نیز ذکر شد، در محفظه اول اسیدهای چرب فرآر تجمع می‌یابند؛ وجود این اسیدها باعث به مصرف رسیدن و کاهش قلیابیت در این بخش از راکتور می‌شود. قلیابیت شیرابه خروجی در محدوده ۱۷۶۴ تا ۶۲۹۱ میلی‌گرم در لیتر (برحسب کربنات کلسیم) بود. در بارگذاری‌های آلی ۱/۲ و ۲ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز، قلیابیت اندکی کاهش یافته، در حالی که در بارگذاری‌های ۳، ۵ و ۷/۷۵ کیلوگرم COD در مترمکعب بر روز میزان قلیابیت نسبت به ورودی با افزایش همراه بوده است. این امر نشان دهنده شکل‌گیری قلیابیت آمونیاکی در بارگذاری‌ها و غلظت‌های بالاتر شیرابه می‌باشد. وجود ترکیبات نیتروژن‌دار در شیرابه، باعث تولید آمونیاک در واکنش‌های بی‌هوازی می‌گردد. آمونیاک پس از ترکیب با CO₂ محلول در محیط، که طی فرایند بی‌هوازی تولید می‌شود، به صورت NH₄-HCO₃ در آمده و قلیابیت ایجاد می‌کند. همان طور که در شکل دیده می‌شود، در بارگذاری‌های ۵ و ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز، برخلاف سایر بارگذاری‌ها، مقدار قلیابیت حتی



شکل ۵- تغییرات pH در طول راکتور ABR

جدول ۴- تغییرات pH در طول راکتور ABR در بارگذاری‌های آلی مختلف

خروجی	محفظه ۴	محفظه ۳	محفظه ۲	محفظه ۱	ورودی	بار آلی (kgCOD/m ³ /day)
۷/۷۲	۷/۶۵	۷/۴۱	۶/۹۸	۶/۸	۶/۸۷	۱/۲
۷/۶۹	۷/۵۷	۷/۳۵	۶/۸۶	۶/۴۹	۶/۵۴	۲
۸/۱۱	۷/۵۴	۷/۵۳	۷/۵۶	۷/۴۹	۶/۷۹	۳
۸	۷/۷۲	۷/۷۶	۷/۶	۷/۲۹	۷/۳۲	۵
۷/۳۵	۷/۲۷	۷/۱۱	۶/۷۹	۶/۳۵	۶/۷۸	۷/۷۵



جدول ۵- تغییرات قلیابیت CaCO_3 برحسب میلی‌گرم بر لیتر در طول راکتور ABR در بارگذاری‌های آلی مختلف

ورودی	محفظه ۱	محفظه ۲	محفظه ۳	محفظه ۴	خروجی	بار آلی ($\text{kgCOD}/\text{m}^3/\text{day}$)
۲۰۲۱	۱۶۲۵	۱۶۷۱	۱۶۹۹	۱۷۵۴	۱۷۶۴	۱/۲
۳۳۷۵	۲۷۰۹	۲۷۸۹	۲۸۳۷	۲۹۲۹	۲۹۴۵	۲
۳۵۸۸	۳۲۰۱	۳۴۳۳	۳۶۰۴	۳۷۱۱	۳۶۹۶	۳
۴۰۲۰	۴۲۰۰	۴۶۶۰	۵۱۶۰	۵۲۷۰	۵۲۲۰	۵
۴۹۶۵	۵۴۴۴	۵۷۹۲	۶۱۲۰	۶۲۵۶	۶۲۹۱	۷/۷۵

۳- مقدار pH در خروجی بین ۷/۳۵ تا ۸/۱۱ در بارگذاری‌های مختلف متغیر بود. این مقدار در محدوده عملکرد بهینه سیستم بود. به طور کلی کاهش pH در محفظه اول اتفاق افتاد که کمترین مقدار آن ۶/۳۵ بود. تجمع اسیدهای چرب فرآر در اثر فعالیت باکتری‌های اسیدساز در این بخش از راکتور، باعث کاهش pH و ایجاد محیط اسیدی گردید.

۴- در بارگذاری‌های بالا، افزایش قلیابیت در طول راکتور مشاهده گردید. دلیل آن را می‌توان شکسته شدن مولکول‌های مواد نیتروژن دار مانند پروتئین‌ها و در نتیجه تولید آمونیاک دانست. با ترکیب آمونیاک و دی‌اکسیدکربن محلول، مقدار قلیابیت افزایش یافته و خاصیت بافرینگ در برابر کاهش pH به وجود آمد.

۵- قدردانی

به این وسیله از سازمان‌های نظیف و بازیافت شهرداری شیراز به خاطر حمایت مالی و نیز از خانم مهندس خالو که بدون کمک و حمایت ایشان انجام این تحقیق میسر نمی‌شد، کمال تشکر و سپاسگزاری به عمل می‌آید.

در محفظه اول نیز کم نشده و افزایش یافته است که می‌توان دلیل آن را تولید آمونیاک بیشتر و در نتیجه افزایش قلیابیت و مقاومت بیشتر آن در برابر تولید اسیدهای چرب فرآر و کاهش pH دانست.

۴- نتیجه‌گیری

۱- انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی نشان داد که رژیم هیدرولیکی راکتور ABR از مدل CFSTRهای متوالی پیروی می‌کند. نتایج آزمایشگاهی با مقادیر مدل $N=3$ ، $N=4$ و $N=5$ مقایسه شد و پس از رسم نمودار و انجام محاسبات، نتایج آزمایش، تطابق بیشتری با مدل ۴ CFSTR متوالی داشت. بنابراین می‌توان گفت که تعداد CFSTRهای متوالی، برابر با تعداد محفظه‌های راکتور ABR می‌باشد.

۲- راکتور ABR عملکرد خوبی در تصفیه بیولوژیکی شیرابه محل دفن و حذف COD از خود نشان داد. با افزایش بار آلی، غلظت COD خروجی نیز به تدریج افزایش یافت و به حداکثر مقدار ۶۱۶۴ میلی‌گرم در لیتر در بار آلی ۷/۷۵ کیلوگرم COD بر مترمکعب در روز رسید. با این وجود، بیش از ۸۰ درصد حذف COD در همه بارگذاری‌ها حاصل شد.

- 1- Barber, W. P., and Stuckey, D. C. (1999). "The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review." *J. Wat. Res.*, 33, 1559-1578.
- 2- McCarty, P. L. (1981). "One hundred years of anaerobic treatment digestion." *J. Anaerobic Digestion*, 1, 3-21.
- 3- Kennedy, K., and Barriault, M. (2005). "Effect of recycle on treatment of aircraft de-icing fluid in an anaerobic baffled reactor." *J. Water SA.*, 31(3), 377-384.
- 4- Boopathy, R. (1998). "Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactor." *J. Bioresource Technology*, 64, 1-6.
- 5- Grover, R., Marwaha, S. S., and Kennedy, J. F. (1999). "Studies on the use of an anaerobic baffled reactor for the continuous anaerobic digestion of pulp and paper mill black liquors." *J. Process Biochemistry*, 34, 653-657.
- 6- Baloch, M. I., Akunna, J. C., and Collier, P. J. (2007). "The performance of a phase separated granular bed bioreactor treating brewery wastewater." *J. Bioresource Technology*, 98, 1849-1855.
- 7- Qasim, S. R., and Chiang, W. (1994). *Sanitary landfill leachate*, Technomic publishing Co Inc., Lancaster Pennsylvania.
- 8- Kurniawan, T. A., Lo, W., and Chan, G. Y. (2006). "Physico-chemical treatment for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate." *J. Hazardous Materials*, B129, 80-100.
- 9- Ehrig, H. J. (1984) "Treatment of sanitary landfill leachate: biological treatment." *J. Waste Manage. Res.*, 2, 131-152.
- 10- Lo, I. M. C. (1996). "Characteristics and treatment of leachates from domestic landfills." *J. Environ. Int.*, 22, 433-442.
- 11- Harmsen, J. (1983). "Identification of organic compounds in leachate from a waste." *J. Water Res.*, 17, 699-705.
- 12- Ozturk, I., Altinbas, M., Koyunco, I., Arikan, O., and Gomec-Yangin, C. (2003). "Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates." *J. Waste Management*, 23, 441-446.
- 13- Ettala, M. (1998). "Full-scale leachate treatment using new evaporation technology." *J. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, ASCE*, 17112, 86-87.
- 14- Visvanathan, C., Choudhary, M. K., Montalbo, M. T., and Jegatheesan, V. (2007). "Landfill leachate treatment using thermophilic membrane bioreactor." *J. Desalination*, 204, 8-16.
- 15- Kennedy, K. J., and Lentz, E. M. (2000). "Treatment of landfill leachate using sequencing batch and continuous flow upflow anaerobic baffled reactor (UASB) reactors." *J. Water Res.*, 34(14), 3640-3656.
- 16- Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering*, 3rd Ed., Wiley, NJ.
- 17- APHA, AWWA, WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st Ed., Washington, D.C.
- 18- Wang, B., and Shen, Y. (2000). "Performance of an anaerobic baffled reactor as a hydrolysis-acidogenesis unit in treating landfill leachate mixed with municipal sewage." *J. Water Science and Technology*, 42(12), 115-121.