

عملکرد راکتور بافلدار بی‌هوازی در حذف سولفات فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر

سید علیرضا مومنی^۲

محمد مهدی امین^۳

سید مهران ابطحی^۲

علی تریابیان^۱

(دریافت ۸۷/۱۰/۲۶ پذیرش ۸۸/۲/۲۶)

چکیده

در این مطالعه عملکرد یک راکتور بافلدار بی‌هوازی به منظور حذف سولفات از فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر بررسی شد. راکتور شامل یک پایلوت ۱۰۰ لیتری و شش اتاقک بود. راه‌اندازی راکتور با زمان ماند هیدرولیکی ۲۵ ساعت و دمای ۳۵ درجه سلسیوس آغاز شد و سرانجام زمان ماند به تدریج تا ۳/۳۳ ساعت کاهش یافت. بهترین عملکرد راکتور در زمان ماند هیدرولیکی ۴ ساعت و نرخ بارگذاری سولفات ۳/۳۱۸ کیلوگرم سولفات بر مترمکعب در روز با راندمان حذف سولفات ۸۹/۱۵ درصد مشاهده شد. در این شرایط بیشترین درصد حذف سولفات ۶۹/۰۸ درصد در اتاقک اول بود. اتاقک اول به علت رخ دادن فازهای اسیدزایی و استات‌زایی دارای کمترین pH بود. این نتیجه نشان داد که سولفیدزایی در فاز اسیدزایی فرایند تصفیه بی‌هوازی رخ می‌دهد. سپس در زمان ماند هیدرولیکی ۴ ساعت، دما تا ۲۰ درجه سلسیوس کاهش یافت و حداکثر درصد حذف سولفات ۶۶/۱۱ درصد به دست آمد. در این شرایط حداکثر درصد حذف سولفات ۲۸/۹۸ درصد در اتاقک چهارم بود که این اتاقک دارای پایین‌ترین pH نیز بود. این پدیده نشان می‌دهد که کاهش دمای راکتور موجب انتقال مرحله اسیدزایی به اتاقک‌های بعدی راکتور می‌شود. همچنین این یافته‌ها دلیلی دیگر بر توانایی فاز اسیدزایی در حذف سولفات است.

واژه‌های کلیدی: راکتور بافلدار بی‌هوازی، اتاقک، سولفات، pH، زمان ماند هیدرولیکی، دمای راکتور

Operation of an Anaerobic Baffled Reactor for Sulfate Removal of Amirkabir Industrial Estate Wastewater

Ali Torabian¹

Seyed Mehran Abtahi²

Mohammad Mehdi Amin³

Seyed Alirza Momeni⁴

(Received Jan. 16, 2009 Accepted May. 15, 2009)

Abstract

In this study, the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR Pilot 100 l and six compartments) for sulfate removal from the wastewater from Amirkabir Industrial Estate was investigated. The reactor was started with a hydraulic retention time (HRT) of 25 h at 35°C to be gradually reduced to 3.33 h. The best reactor performance was observed at a HRT of 4 h and a sulfate loading rate of 3.318 Kg SO₄/m³.d at which the sulfate removal efficiency was 89.15%. In this condition, the highest sulfate removal was observed in the first compartment (69.08%) which had the lowest pH as acidogenesis and acetogenesis had taken place in earlier compartments. This result demonstrated that the sulfidogenesis occurred in the acidogenic phase. Maximum sulfate removal

1. Prof., Dept. of Environmental Eng., University of Tehran
2. M.Sc. of Civil and Environmental Engineering, Dept. of Environmental Eng., University of Tehran (Corresponding Author) (+98 311) 4345363 abtahi.mehran@yahoo.com
3. Assist. Prof., Faculty of Public Health, Isfahan University of Medical Sciences
4. M.Sc. of Environmental Eng., Isfahan Industrial Estates Co.

- ۱- استاد دانشکده مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران
- ۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) ۴۳۴۵۳۶۳ (۰۳۱۱) abtahi.mehran@yahoo.com
- ۳- استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان
- ۴- کارشناس ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، شرکت شهرک‌های صنعتی استان اصفهان

(66.11%) was obtained when temperature was reduced to 20°C (HRT of 4 h). Under the same conditions, the fourth compartment which had lowest pH level exhibited maximum sulfate removal percent (28.98%). This indicates that decreasing temperature leads to the acidogenic phase to shift toward the following reactor compartments. Also, these findings are a further indication of the ability of the acidogenic phase for sulfate removal.

Keywords: Anaerobic Baffled Reactor, Compartment, Sulfate, pH, Hydraulic Retention Time (HRT), Reactor Temperature.

۱- مقدمه

مشکلات ناشی از احیای سولفات به سولفید در سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی، موجب استفاده از راکتورهایی شده است که در تصفیه فاضلابهای غنی از سولفات، عملکرد موفقی را نشان داده‌اند. از بین راکتورهای بی‌هوازی با سرعت بالا، راکتور بافلدار بی‌هوازی^۱، راکتور دارای بستر لجن و جریان رو به بالا^۲ و فیلتر بی‌هوازی^۳، عملکرد بهتری را در تصفیه این‌گونه فاضلابها از خود نشان داده‌اند [۱]. احیای سولفات، فعالیت اکثر باکتری‌های بی‌هوازی را کاهش می‌دهد و اثرات مهمی، در تصفیه بی‌هوازی دارد که عبارت‌اند از:

الف) کاهش تولید متان؛ هنگامی که فاضلاب محتوی سولفات باشد، قسمتی از COD در احیای سولفات مصرف می‌شود و بنابراین کل COD موجود برای تولید متان کاهش می‌یابد [۲].

ب) حاصل احیای SO₄ تولید H₂S است که برای باکتری‌های مولد متان سمی است. هنگامی که نسبت COD/SO₄ به ۷ تا ۱۰ برسد ممانعت جدی تولید متان آغاز می‌گردد. در نسبت‌های بالاتر COD/SO₄، درصد مهمی از بیوگاز تولیدی را H₂S تشکیل می‌دهد [۳].

ج) H₂S منجر به پیدایش بوهای بدی می‌گردد و اگر متان تولیدی بسوزد، انتشار بو در فضاهای اطراف قابل اعتراض خواهد بود. همچنین سولفید هیدروژن وارد شده به بیوگاز، خاصیت خوردگی را در بیوگاز به وجود می‌آورد [۴].

د) در طول فرایند متان‌زایی، به‌عنوان مرحله نهایی تجزیه بی‌هوازی، رقابت بین باکتری‌های احیا کننده سولفات^۴ (SRB) و باکتری‌های تولید کننده متان^۵ (MPB) وجود دارد. در برخی تحقیقات گزارش شده است که این رقابت بر سر مصرف استات و هیدروژن است. تحقیقات دیگر در مورد روابط سینتروفیک^۶ این دو گروه باکتری گزارش داده‌اند [۵].

بنا بر نظر بسیاری از محققان، مهم‌ترین فاکتور تعیین کننده در رقابت بین باکتری‌های احیا کننده سولفات و باکتری‌های تولید کننده متان، نسبت COD/SO₄ فاضلاب ورودی است [۶]. چوی^۷ و ریم^۸ در سال ۱۹۹۱ مشاهده کردند که باکتری‌های SRB و MPB در نسبت‌های COD/SO₄ ۱/۷ تا ۲/۷ بسیار رقابتی عمل می‌کنند. به طوری که باکتری‌های MPB در نسبت‌های بالاتر COD/SO₄ غالب هستند، در حالی که باکتری‌های SRB با کاهش نسبت COD/SO₄ غالب می‌شوند [۷]. متقابلاً دی پراساد^۹ و هانری^{۱۰} در سال ۱۹۸۸ مشاهده کردند که باکتری‌های MPB در نسبت COD/SO₄ تقریباً برابر با ۱، بر باکتری‌های SRB غالب هستند [۸].

در راکتور بافلدار بی‌هوازی (ABR)، قرار گرفتن بافل‌ها در مسیر جریان باعث تغییر جهت آن به سمت بالا و پایین می‌گردد و به این ترتیب تماس بین بیومس و مواد غذایی افزایش می‌یابد. ساختمان اتاقک‌دار این راکتور موجب جداسازی فازهای اسیدزایی و متان‌زایی می‌شود [۹]. شاید پروفیل تغییرات pH در اتاقکهای مختلف راکتور حاکی از جداسازی کامل این فازها باشد ولی به دلیل تولید متان در تمامی اتاقکهای راکتور، جداسازی کامل این دو فاز بعید به نظر می‌رسد [۱۰]. مزیت این راکتورها در ارتباط با تصفیه فاضلابهای غنی از سولفات به خاطر ساختمان چند اتاقکی این راکتورهاست که موجب جداسازی فازهای سولفیدزایی از متان‌زایی در طول راکتور است. به طوری که با کاهش سولفات در اتاقکهای ابتدایی، باکتری‌های متان‌ساز شرایط مناسب‌تری را برای فعالیت در اتاقکهای انتهایی راکتور خواهند داشت [۱۱].

در مطالعه‌ای بر روی راکتور ABR به منظور تصفیه فاضلاب دارویی حاوی سولفات بالا (COD برابر ۲۰ گرم در لیتر و نسبت COD/SO₄ = ۸) در شرایط پایدار، حذف ۵۰ درصد از COD و احیای ۹۵ درصد از سولفات موجود در فاضلاب طی یک روز انجام گرفت. نتایج نشان داد که در اتاقکهای ابتدایی راکتور، سولفات به سولفید احیاء می‌شود و در اتاقکهای انتهایی، سولفید

¹ Anaerobic Baffled Reactor (ABR)
² Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
³ Anaerobic Filter (AF)
⁴ Sulfate Reducing Bacteria (SRB)
⁵ Methane Producing Bacteria (MPB)
⁶ Syntrophic Relations

⁷ Choi
⁸ Rim
⁹ Prasad
¹⁰ Henry

سلسیوس، دما تا ۲۰ درجه سلسیوس کاهش یافت و عملکرد راکتور در این حالت نیز مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که اغلب شهرکهای صنعتی در ایران دارای فاضلابی با مقادیر قابل ملاحظه از سولفات هستند و اکثر راکتورهای بی‌هوای در این شهرکها، سیستم گرمکن ندارند لذا نتایج موفقیت‌آمیز این مطالعه می‌تواند راهگشای این مشکل در بسیاری از تصفیه‌خانه‌های شهرکهای صنعتی باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- پایلوت راکتور ABR

این پایلوت با استفاده از ورقه‌های پلکسی‌گلاس^۳ شفاف با ضخامت ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شد. حجم مفید آن ۱۰۰ لیتر و طول، عرض و ارتفاع نیز به ترتیب ۱۰۰، ۲۵ و ۴۰ سانتی‌متر بود. این پایلوت توسط بافل‌های عمودی ایستا به ۶ اتاقک با حجم مساوی تقسیم شد که هر اتاقک با استفاده از بافل عمودی آویزان دارای قسمت پایین رونده و بالارونده بود. شیرهای نمونه‌گیری از هر اتاقک در عمق ۱۰ سانتی‌متری بالای هر اتاقک نصب شد. همچنین این راکتور مجهز به حمام آب گرم به‌عنوان محفظه کنترل دما برای تنظیمات مربوط به دمای راکتور بود. نمای شماتیک این پایلوت در شکل ۱ آمده است.

۲-۲- بذردهی راکتور

از لجن بی‌هوای گرفته شده از هاضم بی‌هوای تصفیه‌خانه فاضلاب شاهین‌شهر اصفهان با TSS برابر با ۳/۶۷ g SS/l و جامدات معلق فرار برابر با ۲۵/۱ g VSS/l، برای بذردهی راکتور استفاده شد. قبل از بذردهی، ذرات درشت و آشغالهای لجن با استفاده از الک با سوراخهای کمتر از ۵ میلی‌متر گرفته شد و این لجن به‌طور یکنواخت در هر ۶ اتاقک ریخته شد که مجموعاً ۳۵ درصد حجم راکتور را تشکیل داد. باقیمانده حجم راکتور با استفاده از فاضلاب خروجی از تانک متعادل‌ساز تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر پر شد. درب پایلوت بسته شده و هواگیری انجام گردید. سپس دمای راکتور بر روی ۳۵ درجه سلسیوس تنظیم شد.

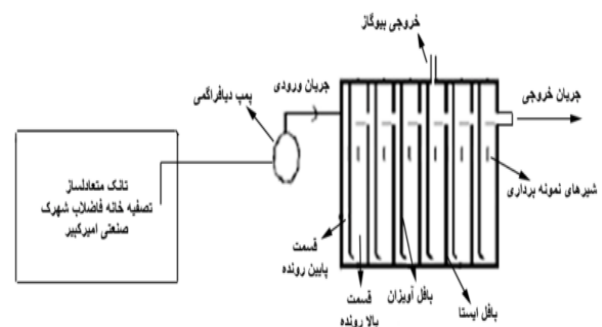
۲-۳- مشخصات فاضلاب ورودی به راکتور ABR

مشخصات فاضلاب خروجی از تانک متعادل‌ساز تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر کاشان که در مدت زمان عملکرد ۴ ماهه به پایلوت ABR وارد گردید در جدول ۱ آمده است. با

الکترون می‌گیرد و تبدیل به H_2S می‌گردد. بعد از تغییر نسبت COD/SO_4 ، با اضافه‌کردن گلوکز، ایزوپروپانول و سولفات، میزان حذف سولفات از بیشتر از ۹۵ درصد در COD/SO_4 برابر ۱۵۰ به میزان کمتر از ۵۰ درصد در COD/SO_4 برابر ۲۴ کاهش یافته بود. افزایش غلظت سولفات همراه با گلوکز و ایزوپروپانول سبب کاهش احیای سولفات شده بود زیرا در این حالت، H_2S به‌عنوان یک ممانعت‌کننده از فعالیت بیولوژیک عمل می‌نماید. همچنین افزایش میزان COD از ۲ تا ۸ گرم در لیتر در نسبت COD/SO_4 برابر ۸، طی ۱۰۰ روز، سبب افزایش غلظت سولفید در جریان خروجی و افزایش سمیت شده (۸۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر H_2S یونیزه‌نشده در pH حدود ۷) و در این حالت، راندمان حذف COD به کمتر از ۲۰ درصد رسیده بود [۱۲].

یکی از موارد حائز اهمیت در فرایندهای بی‌هوای، به‌کارگیری دماهای بالاتر به‌منظور افزایش راندمان حذف است. بر اساس قانون وانت هاف^۱، سرعت واکنش‌های بیوشیمیایی با افزایش هر ۱۰ درجه سلسیوس، دو برابر می‌شود [۹]. همچنین معادله آرنیوس^۲ پیش‌بینی می‌کند که با کاهش هر ۱۵ درجه سلسیوس، نرخ فعالیت‌های بیولوژیک ۳ برابر کمتر می‌گردد [۱۳]. مطالعات متعدد در مقیاس پایلوت نشان می‌دهند که علی‌رغم اینکه کاهش دما منجر به کاهش نرخهای کاتابولیکی، کاهش میزان بیوگاز تولیدی و افزایش محصولات محلول میکروبی می‌شود، ولی راکتورهای ABR توانایی حذف مواد آلی را در دماهای پایین در حد مطلوب دارند [۱۴]. این در حالی است که تا به حال مطالعه‌ای در مورد تأثیر کاهش دما بر روی حذف سولفات فاضلاب انجام نگرفته است.

فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر کاشان، یک فاضلاب صنعتی ضعیف محتوی سولفات است. در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر کاهش دما در عملکرد راکتور ABR در حذف سولفات فاضلاب، بعد از رسیدن راکتور به بهترین راندمان حذف سولفات در ۳۵ درجه



شکل ۱- نمای شماتیک پایلوت راکتور بافلدار بی‌هوای (ABR)

³ Plexiglass

¹ Van't Hoff Rule
² Arrhenius Equation

توجه به اینکه برای تصفیه بی‌هوازی فاضلاب‌هایی با COD کمتر از ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بهترین نسبت COD:N:P معادل ۳۵۰:۵:۱ است، آنالیز نیتروژن و فسفر فاضلاب ورودی به راکتور نشان می‌دهد که مقدار نیتروژن و فسفر فاضلاب ورودی به مقداری است که نیازی به اضافه کردن مواد مغذی به راکتور ABR نیست (جدول ۱).

۲-۴- روشهای آنالیز آزمایشگاهی

پارامترهای SO₄، COD، BOD₅، TSS، نیتروژن کل، فسفر کل و اورتوفسفات طبق روشهای استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام گرفتند [۱۵]. برای اندازه‌گیری pH از pH متر پرتابل مارک جنوی مدل ۱۳۱۴۵^۱ استفاده گردید. مونیتورینگ دمای راکتور توسط سیستم گرمایشی راکتور انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- راه‌اندازی و عملکرد راکتور ABR

برای آشنایی لجن با خوراک و حذف مواد زائد از لجن، راکتور به مدت ۱۰ روز عملکرد ناپیوسته داشت. پس از آن عملکرد پیوسته راکتور با تزریق فاضلاب خروجی از تانک متعادل‌ساز تصفیه‌خانه

^۱ Jenway pH meter (model : 13145)

فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر به داخل راکتور آغاز گشت. در تمام مدت زمان عملکرد راکتور، افزایش نرخ بارگذاری سولفات^۲ (SLR) با کاهش زمان ماند هیدرولیکی^۳ (HRT) انجام شد. عملکرد پیوسته راکتور با HRT برابر ۲۵ ساعت آغاز گردید (SLR=۰/۳۳۸-۰/۳۳۸ KgSO₄/m³.d). سپس به تدریج زمان ماند به ۲۰، ۱۰، ۶، ۵، ۴ و ۳/۳۳ ساعت کاهش پیدا کرد. SLR مربوط به هر یک از این زمان‌های ماند در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که جدول ۲ و شکل ۲ نشان می‌دهد، نهایتاً در HRT برابر ۳/۳۳ ساعت، SLR تا ۴/۰۶۱ Kg SO₄/m³.d افزایش یافت. برای هر HRT، هنگامی که بعد از گذشت چند روز تغییراتی در غلظت سولفات فاضلاب خروجی از راکتور مشاهده نشد، افزایش SLR با کاهش HRT صورت می‌گرفت. در طول کاهش HRT از ۲۵ تا ۳/۳۳ ساعت، دمای راکتور بر روی ۳۵ درجه سلسیوس تنظیم شد. بعد از اینکه حداکثر درصد حذف سولفات در HRT برابر ۴ ساعت و دمای ۳۵ درجه سلسیوس مشاهده شد به منظور بررسی تأثیرات کاهش درجه حرارت در حذف سولفات، HRT مجدداً از ۳/۳۳ به ۴ ساعت افزایش یافت و این بار دمای راکتور بر روی ۲۰ درجه سلسیوس تنظیم گردید.

^۲ Sulfate Loading Rate (SLR)

^۳ Hydraulic Retention Time (HRT)

جدول ۱- مشخصات فاضلاب ورودی به راکتور ABR

پارامتر	میانگین غلظت‌های مربوط به فاضلاب اضافه شده به راکتور در مدت ۴ ماه	میانگین غلظت‌های مربوط به فاضلاب اضافه شده به راکتور بلافاصله پس از بدردهی
سولفات (mg SO ₄ /L)	۴۴۳/۸ ± ۶۰/۷	۵۰۱
COD (mg/L)	۶۷۱/۵ ± ۴۹/۹	۶۸۴
BOD ₅ (mg/L)	۳۵۰/۱ ± ۳۶/۸	۳۷۷
کل جامدات معلق (mg SS/L)	۲۵۸/۸ ± ۵۱/۶	۲۴۰
نیتروژن کل (mg N/L)	۵۷/۴ ± ۸/۰۳	۶۴/۲
فسفر کل (mg P/L)	۵/۲۲ ± ۰/۹۴	۵/۵۱
اورتوفسفات (mg PO ₄ /L)	۱۷/۰۵ ± ۱/۳۶	۱۴/۷۳
pH	۷/۵۷ ± ۰/۱۹	۷/۹۳
COD : N : P	۳۵۰ : ۲۹/۹۱ : ۲/۷۲	۳۵۰ : ۳۲/۸۶ : ۲/۸۲

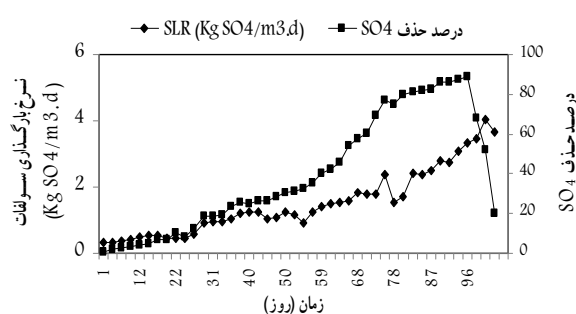
جدول ۲- خلاصه‌ای از مراحل عملکرد راکتور بافلدار بی‌هوایی (ABR) در حذف سولفات

پارامتر	عملکرد پیوسته						راه‌اندازی ۱	راه‌اندازی ۲
	دوره ۶	دوره ۵	دوره ۴	دوره ۳	دوره ۲	دوره ۱		
زمان عملکرد (روز)	۱۰۶-۱۲۱	۹۷-۱۰۵	۸۶-۹۶	۷۲-۸۵	۵۵-۷۱	۲۷-۵۴	۷-۲۶	۱-۶
زمان ماند هیدرولیکی (h)	۴	۳/۳۳	۴	۵	۶/۶۷	۱۰	۲۰	۲۵
دمای راکتور (°C)	۲۰	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
نرخ بارگذاری سولفات (Kg SO ₄ /m ³ .d)	۲/۷۹±۰/۲۶	۳/۷۳±۰/۲۵	۲/۸۹±۰/۲۹	۲/۰۴±۰/۳۶	۱/۶±۰/۱۹	۱/۰۹±۰/۱۳	۰/۴۹±۰/۰۵	۰/۰۲±۰/۰۳۶
راندمان حذف سولفات (%)	۵۱/۵±۷/۴۳	۴۴/۶±۱۳/۱	۷۱/۶±۶/۶۷	۶۵/۴±۴/۶۶	۶۳/۲±۴/۴۳	۵۳/۸±۶/۵	۳۸/۰۱±۱۲/۳	۴/۵۲±۳/۲
تفاوت میانگین pH بین اتاقک اول و ششم	۷/۲۶۷	۷/۰۷۳	۶/۲۵۳	۶/۳۴۷	۶/۸۲	۶/۹۲	۶/۵۵۷	۷/۷۸۵
	۶/۹۲۷ تا	۷/۳۷۳ تا	۶/۷۴ تا	۶/۷۸۳ تا	۷/۱ تا	۷/۳۱ تا	۶/۹۸ تا	۷/۹۳ تا

حداقل درصد حذف سولفات به ترتیب در اتاقک اول و ششم مشاهده شد.

همچنین با توجه به شکل ۲ و ۴، در مدت زمان عملکرد راکتور ABR در ۳۵ درجه سلسیوس، حداکثر درصد حذف سولفات برابر با ۸۹/۱۵ درصد بود که این مقدار حذف در HRT برابر ۴ ساعت در ۳/۳۱۸ Kg SO₄/m³.d به دست آمد. در این شرایط حداکثر درصد حذف سولفات در اتاقک اول برابر با ۶۹/۰۸ درصد بود در حالی که مجموع درصد حذف سولفات در اتاقکهای دوم تا ششم فقط ۲۰/۰۷ درصد بود (شکل ۵).

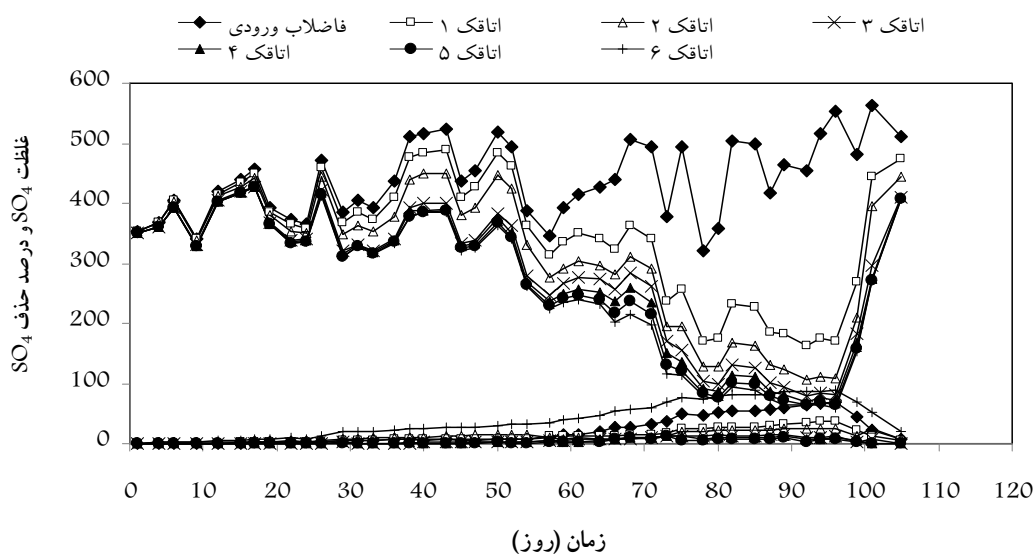
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اتاقک اول که دارای بیشترین درصد حذف سولفات بود، پایین‌ترین pH را داشت و مقادیر مربوط به میانگین pH در اتاقکهای بعدی به مرور افزایش یافت.



شکل ۲- نرخ بارگذاری سولفات و درصد حذف سولفات در مدت زمان عملکرد راکتور ABR در ۳۵ درجه سلسیوس

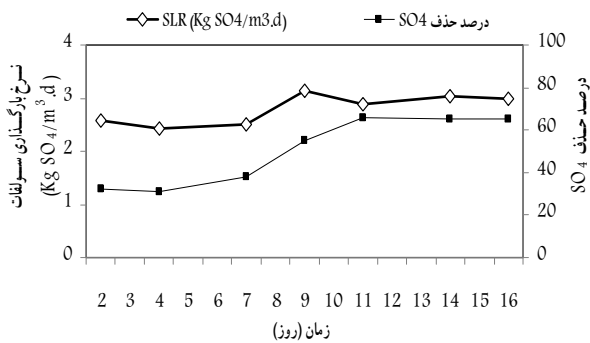
۲-۳- حذف سولفات در ۳۵ درجه سلسیوس

با توجه به شکل ۳ که تغییرات غلظت سولفات و درصد حذف سولفات را در اتاقکهای راکتور در مدت زمان عملکرد راکتور ABR در ۳۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد، حداکثر و

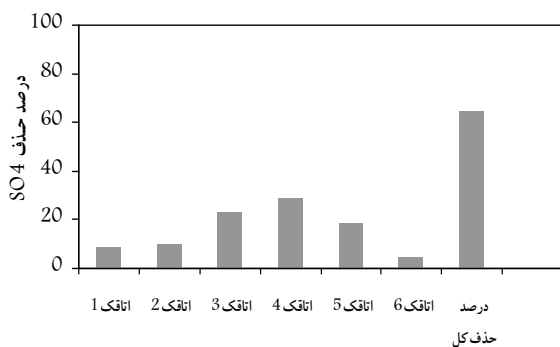


شکل ۳- غلظتهای مربوط به سولفات و درصدهای حذف سولفات در اتاقکهای راکتور ABR در ۳۵°C

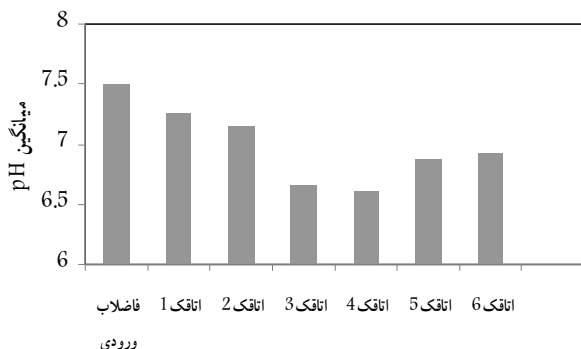
سولفات در مدت زمان عملکرد راکتور در ۲۰ درجه سلسیوس در شکل ۷ آمده است. در این شرایط با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، حداکثر درصد حذف سولفات ۶۶/۱۱ درصد به دست آمد. این بار بیشترین مقدار حذف سولفات در اتاقک چهارم و سوم اتفاق افتاد که مقدار آن به ترتیب معادل ۲۸/۹۸ درصد و ۲۳/۲۳ درصد بود. تغییرات میانگین pH در این حالت در شکل ۹ آمده است. این شکل نشان می‌دهد که اتاقک چهارم و بعد از آن اتاقک سوم که دارای بیشترین درصد حذف سولفات بودند، پایین‌ترین pH را داشتند.



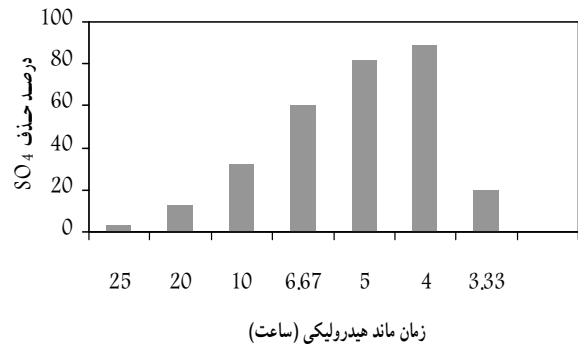
شکل ۷- نرخ بارگذاری سولفات و درصد حذف سولفات در مدت زمان عملکرد راکتور در $HRT=4h$ و $20^{\circ}C$



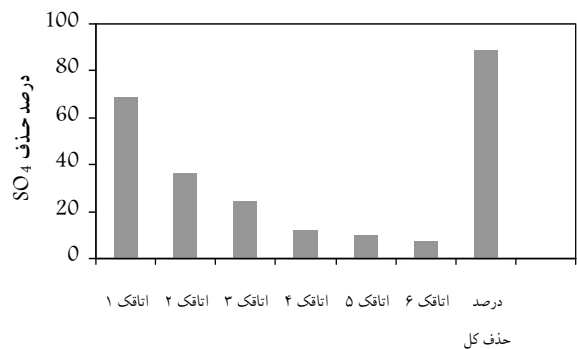
شکل ۸- حداکثر درصد حذف سولفات در اتاقک‌های راکتور ABR در $HRT=4h$ و $20^{\circ}C$



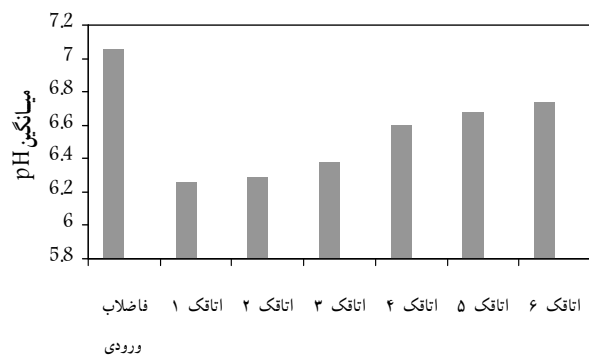
شکل ۹- مقادیر مربوط به میانگین pH در اتاقک‌های راکتور ABR در $HRT=4h$ و $20^{\circ}C$



شکل ۴- حداکثر درصد حذف سولفات در هر زمان ماند هیدرولیکی در ۳۵ درجه سلسیوس

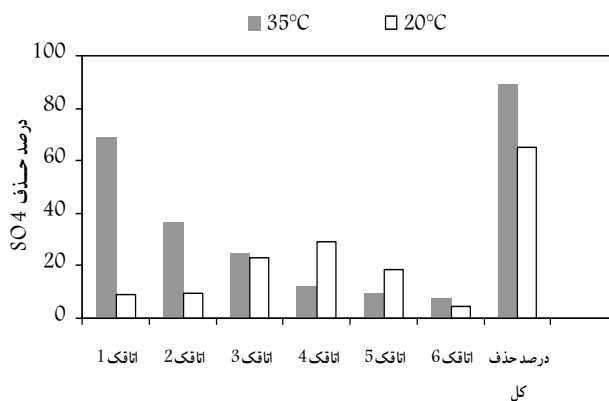


شکل ۵- حداکثر درصد حذف سولفات در اتاقک‌های راکتور ABR در $HRT=4h$ و ۳۵ درجه سلسیوس



شکل ۶- مقادیر مربوط به میانگین pH در اتاقک‌های راکتور ABR در $HRT=4h$ و $35^{\circ}C$

۳-۳- حذف سولفات در ۲۰ درجه سلسیوس همانطور که جدول ۲ و شکل ۲ نشان می‌دهد، بعد از کاهش HRT تا ۳/۳۳ ساعت در ۳۵ درجه سلسیوس، راندمان حذف سولفات نهایتاً تا ۲۰/۱۶ درصد کاهش یافت. در این شرایط HRT به ۴ ساعت افزایش یافت تا راکتور مجدداً خود را بازیابی کرده و درصد حذف سولفات در راکتور افزایش یابد. سپس دمای راکتور بر روی ۲۰ درجه سلسیوس تنظیم شد. تغییرات SLR و درصد حذف



شکل ۱۰- مقایسه درصد حذف سولفات در پایان مدت زمان عملکرد راکتور در دماهای ۳۵ و ۲۰°C و HRT=۴ h

اسیدزایی فرایند تصفیه بی هوازی رخ می‌دهد و اتاقل اول مانند یک راکتور کاهنده سولفات عمل می‌کند که این پدیده شرایط بهتری را برای تولید متان در اتاقلهای بعدی توسط باکتری‌های متان‌ساز فراهم می‌سازد [۵ و ۱۱]. بنابراین با جداسازی فعالیت‌های سولفیدزایی و متان‌زایی در طول راکتور ABR، رقابت باکتری‌های احیاکننده سولفات با باکتری‌های متان‌ساز بر سر مصرف سوستر کمتر می‌شود که این امر از اثرات مخرب احیای سولفات بر فرایند تصفیه بی‌هوازی می‌کاهد. در ارتباط با عملکرد راکتور در HRT برابر ۴ ساعت و دمای ۲۰ درجه سلسیوس، مشاهده شد که حداکثر درصد حذف سولفات به ترتیب در اتاقلهای چهارم و سوم رخ داد که این اتاقلها دارای پایین‌ترین pH نسبت به سایر اتاقلها بودند. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که کاهش دما، کاهش نرخهای کاتابولیسی را در بر دارد که موجب بالا رفتن مقادیر K_s در اتاقلهای ابتدایی راکتور و انتقال فاز اسیدزایی به سمت اتاقلهای بعدی راکتور می‌شود [۹]. حادث شدن فاز اسیدزایی در اتاقلهای میانی راکتور ABR، موجب پایین بودن pH این اتاقلها گردید. بالا بودن درصد حذف سولفات در این اتاقلها، دلیلی دیگر بر رخ دادن سولفیدزایی در فاز اسیدزایی فرایند تصفیه بی‌هوازی است. معادله آرنیوس پیش‌بینی می‌کند که با کاهش هر ۱۵ درجه سلسیوس، نرخ فعالیت‌های بیولوژیکی ۳ برابر کمتر می‌شود [۱۳]. در این مطالعه به ازای ۱۵ درجه سلسیوس کاهش دما ($20^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$)، درصد حذف سولفات ۲۴/۱۶ درصد کاهش یافت ($64/99 \rightarrow 89/15$) که این مقدار به اندازه مقدار پیش‌بینی شده توسط معادله آرنیوس نبود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که راکتور ABR حتی در دمای محیط و یا دماهای پایین‌تر از دمای مطلوب برای فرایند تصفیه بی‌هوازی، عملکرد مناسبی در تصفیه فاضلابهای حاوی سولفات

۳-۴- تأثیر کاهش دما از ۳۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس بر حذف سولفات

با توجه به شکل ۱۰ در پایان مدت زمان عملکرد راکتور در HRT برابر ۴ ساعت، درصدهای حذف سولفات در ۲۰ و ۳۵ درجه سلسیوس، به ترتیب برابر با ۸۹/۱۵ و ۶۴/۹۹ درصد به دست آمد. به عبارت دیگر به ازای ۱۵ درجه سلسیوس کاهش دما، راندمان حذف ۲۴/۱۶ درصد کاهش یافت و از مقدار ۸۹/۱۵ به ۶۴/۹۹ درصد رسید.

۳-۵- چگونگی حذف سولفات در طول عملکرد راکتور ABR

بهترین عملکرد راکتور ABR در مورد حذف سولفات فاضلاب شهرک صنعتی امیرکبیر در HRT برابر ۴ ساعت و دمای ۳۵ درجه سلسیوس مشاهده شد. حداکثر درصد حذف سولفات در اتاقل اول بود که پایین‌ترین pH را نسبت به سایر اتاقلهای راکتور داشت. ساختمان اتاقل‌دار راکتور ABR موجب جداسازی فازهای اسیدزایی و متان‌زایی در طول راکتور می‌شود [۹]. بنابراین می‌توان علت پایین‌تر بودن pH اتاقلهای ابتدایی راکتور به خصوص اتاقل اول را ناشی از تجمع اسیدهای چرب به خاطر ایجاد فازهای اسیدزایی^۱ و استات‌زایی^۲ در این اتاقلها دانست [۱۶]. سپس مقادیر pH با حرکت فاضلاب به سمت اتاقلهای انتهایی به علت تبدیل محصولات میانی فرایند تصفیه بی‌هوازی (اسیدهای چرب فرار)، به تدریج افزایش می‌یابند [۱۷]. همچنین به دلیل اینکه حداکثر درصد حذف سولفات در اتاقل اول رخ می‌دهد، می‌توان اظهار کرد که تبدیل سولفات به سولفید (سولفیدزایی^۳) در فاز

¹ Acidogenesis Phase

² Acetogenesis Phase

³ Sulfidogenesis

غلظت مواد آلی فاضلاب را بدون نگرانی از اثرات مخرب ناشی از احیای سولفات بر فرایند تصفیه بی‌هوازی تا درجه قابل قبولی کاهش داد.

دارد. از آنجایی که هزینه‌های مربوط به گرمایش فاضلاب درون راکتور برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی زیاد است و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست می‌توان با استفاده از راکتور ABR،

۵- مراجع

- 1- Zaiat, M., Vieira, L.G.T., and Foresti, E. (1987). "Spatial and temporal variation of monitoring performance parameters in horizontal flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor treating synthetic." *Wat.Res.*, 311(7), 1760-1766.
- 2- Alizadeh Oosaloo, A., and Seyyed Najafi, F. (2008). "Scruting of sulfate ion concentration reduction in the ABS unit effluent by anaerobic biological treatment." *Proc., the First Conference of Iran Petrochemistry*, Tehran 42-48 (in Persian).
- 3- Hoseinan, M. (2000). *UASB-Wastewaters Anaerobic Treatment*, 1st Ed., Hoseinian Technical Pub., Tehran (in Persian).
- 4- Vossoughi, M., Shakeri, M., and Alemzadeh, I. (2003). "Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄ ratios." *Chemical Engineering and Processing.*, 42 (10), 811-816.
- 5- Hilton, M. G., and Archer, D.B. (1998). "Anaerobic digestion of sulfate-rich molasses wastewater : Inhibition of hydrogen sulfide production." *Biotechnol. Bioeng.*, 31 (8), 885-888.
- 6- Chou, H.H., Huang, J.S., Chen, W. G., and Ohara, R. (2008). "Competitive reaction kinetics of sulfate-reducing bacteria and methanogenic bacteria in anaerobic filters." *Bioresource Technology.*, 99 (17), 8061-8067.
- 7- Choi, E., and Rim, J.M. (1991). "Competition and inhibition of sulfate reducers and methane producers in anaerobic treatment." *Wat. Sci.Technol.*, 23 (7), 1259-1264.
- 8- Prasad, D., Henry, G., and Haik, S. (1988). "Role of sulfate reducing bacteria in anaerobic treatment of landfill leachate." *Proc. of the 10th CSCE Annual Canadian Hydrotechnical Conference*, Vancouver, British Columbia, 105-112.
- 9- Barber, W.P., and Stuckey, D.C. (1999). "The use of anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment, A review." *Wat. Res.*, 33(7), 1559-1578.
- 10- Uyanik, S., Sallis, P.J., and Anderson, G.K. (2002). "The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part 1 : Process performance." *Wat. Res.*, 36 (4), 933-943.
- 11- Saritpongteeraka, K., and Chaiprapat, S. (2008). "Effect of pH adjustment by parawood ash and effluent recycle ratio on the performance of anaerobic baffled reactors treating high sulfate wastewater." *Bioresource Technology.*, 99 (18), 8987-8994.
- 12- Fox, P., and Venkatasubbiah, V. (1996). "Coupled anaerobic/aerobic treatment of high sulfate wastewater with sulfate reduction and biological sulfide oxidation." *Wat. Sci. Technol.*, 25 (7), 383-394.
- 13- Levenspiel, O. (1972). *Non ideal flow in chemical reaction engineering*, 2nd Ed., Wiley, New York.
- 14- Nechaiyasit, S., and Stuckey, D.C. (1997). "The effect of low temperature on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR)." *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 69 (2), 276-284.
- 15- APHA, AWWA, WPCF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater.*, 19st Ed., Washington D.C.
- 16- Dama, P., Bell, J., Foxon, K.M., Brouckaert, C. J., Huany, T., Buckley, C.A., Naidoo, V., and Stuckey, D.C. (2002). "Pilot-scale study of an anaerobic baffled reactor for the treatment of domestic wastewater." *Wat. Sci. Technol.*, 46 (9), 263-270.
- 17- Gopala Krishna, G. V. T., Kumar, P., and Kumar, P. (2007). "Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR)." *J. of Environmental Management.*, 90 (1), 1-11.