



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

بررسی کارایی راکتورهای بافل دار بی‌هوازی با بسترمدیای ثابت و چرخان برای تصفیه فاضلاب شهری

محمد آقانژاد^۱، غلامرضا موسوی^{۲*}

۱. دانشجوی دکترا، مهندسی بهداشت محیط، گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. (نویسنده مسئول): دکترا، مهندسی بهداشت محیط، گروه بهداشت محیط، دانشیار دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: راکتور بافل دار بی‌هوازی با توجه به مزایایی مانند هزینه ساخت و راهبری کمتر نسبت به روش‌های هوازی تصفیه فاضلاب بویژه برای جوامع کوچک مورد توجه است. با وجود این، نیاز است این سامانه برای ارتقا و غلبه بر محدودیت‌هایش مطالعه گردد. هدف اصلی این تحقیق بررسی کارایی راکتورهای بافل دار بی‌هوازی با بستر مدیای ثابت (FABR) و چرخان (RABR) در مقیاس آزمایشگاهی و شرایط میدانی برای تصفیه فاضلاب شهری و تعیین عملکرد هر کدام با توجه به تامین استانداردهای دفع پساب است.

روش بررسی: این مطالعه در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر خوی انجام گردید. راکتور FABR به مدت ۲۶۷ روز با زمان ماند هیدرولیکی ۱۸-۴۸ h و راکتور RABR به مدت ۹۰ روز با چرخش بستر مدیای ۱۰-۵۰ rpm راهبری شد. تغذیه راکتورها به صورت درخت از کانال فاضلاب بود. از ورودی و خروجی سامانه‌ها نمونه برداری ترکیبی ۲۴ ساعته به تعداد ۲۲۴ بار انجام و پارامترهای COD, BOD, TSS, TP, TKN, VSS اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: راه‌اندازی راکتور ۱۰۷ روز طول کشید. خروجی راکتور FABR در زمان ماند ۱۸-۴۸ h به ترتیب حذف ۹۳-۸۰ درصد COD، ۲۱-۱۰ درصد TKN و ۳۰-۲۱ درصد فسفات بود و در همه شرایط به استاندارد خروجی TSS و با HRT بهینه ۳۶ h به استاندارد خروجی COD و BOD رسید. RABR در زمان ماند ۲۴ h و دور ۵۰ rpm به این استانداردها رسید ولی در هیچکدام از زمان‌های ماند نتوانست استاندارد خروجی مواد مغذی را تامین کند.

نتیجه‌گیری: FABR سامانه مناسبی برای تصفیه فاضلاب شهری هست اما با توجه به حذف ناکافی مواد مغذی ضروری است، پساب خروجی آن با یک روش هوازی تصفیه تکمیلی گردد و یا با توجه به مفید بودن خروجی راکتور در آبیاری زمین‌هایی با خاک کشاورزی فقیر بصورت زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۲۰
تاریخ ویرایش: ۹۵/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۰۵
تاریخ انتشار: ۹۵/۰۹/۳۰

واژگان کلیدی: راکتور بافل دار بی‌هوازی، بستر ثابت، بستر چرخان، تصفیه فاضلاب شهری، شهر خوی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
moussavi@modares.ac.ir

مقدمه

روش‌های هوازی تصفیه فاضلاب در حالت کلی دارای محدودیت‌هایی چون هزینه ساخت و راهبری بالاتر، راهبری دقیق و حساس‌تر، تولید لجن بیشتر که مشکلات و هزینه‌های بعدی را دارد و عدم کارایی کافی در بار آلی بیش از حد اسمی هستند، بنابراین استفاده از آنها حداقل در جوامع کوچک مناسب و به‌صرفه نیست. روش‌هایی مانند لاگون نیز راندمان کافی بویژه در آب و هوای سرد ندارند و در آب و هوای گرم هم دارای مشکل رشد جلبک هستند. با توجه به این معایب، استفاده از روش‌های جدید که ضمن ارزانی و آسانی ساخت و بهره‌برداری بتوانند کارایی لازم را تامین کنند راهکار جدید و مناسبی است (۱). یکی از این راهکارها استفاده از راکتورهای بی‌هوازی با سرعت بالا مانند راکتور بافل‌دار بی‌هوازی (ABR) است. بدلیل مزایای زیاد و قابلیت‌های این راکتور از جمله بهبود سینتیک فرایند با توجه به جداسازی فازهای تجزیه بی‌هوازی، بازیافت گاز متان، امکان ارتقای آن در افزایش توان تصفیه از جهت حذف مواد آلی و مغذی و رفع محدودیت‌ها کاربرد آن مورد توجه قرار گرفته است (۲). از طرفی برای جایگزین کردن آن بجای روش‌های پرهزینه که در جوامع کوچک و پراکنده مناسب نیستند، اعمال اصلاحات و مطالعه ارتقای آن ضروری است. یکی از اصلاحات این راکتور تلفیق آن با رشد چسبیده میکروبی یا استفاده از مدیای میکروبی ثابت و متحرک در داخل راکتور است. توجه استفاده از این سیستم برای تصفیه انواع فاضلاب در مزایای خاص آن بارز است، طوری که استفاده از آن برای تصفیه فاضلاب شهرهای کوچک، اکثر صنایع، تصفیه و پیش تصفیه فاضلاب شهری بویژه وقتی که منبع پذیرنده پساب مانند رودخانه وجود دارد و در ترکیب با روش هوازی یا تصفیه طبیعی کاملاً موجه، معقول و به‌صرفه است. همچنین معمولاً تصفیه بی‌هوازی فقط با گندزدایی نهایی استاندارد آبیاری کشاورزی را تامین می‌کند (۳).

در سال ۲۰۱۵، ABR با حجم 1 m^3 در مقیاس پایلوت با دمای فاضلاب $12-23^\circ\text{C}$ بمدت ۲ سال برای تصفیه فاضلاب

شهری با $760 \pm 190 \text{ mg/L COD}$ راهبری شد. راندمان حذف COD ۴۳ درصد و TSS ۸۳ درصد بود و ABR را روش مناسبی برای تصفیه اولیه فاضلاب شهری در آب و هوای سرد معرفی شد (۴). در سال ۲۰۱۵، ABR برای تصفیه فاضلاب بهداشتی بصورت در خط در مقیاس پایلوت با زمان ماند هیدرولیکی (HRT) ۲۲ h بکار رفت. حذف COD ۵۸ - ۷۲ درصد و حذف کلی فرم‌ها حدود ۹۰ درصد بود. نتایج نشان داد هرچقدر زمان ماند بیشتر باشد کیفیت پساب خروجی بهتر خواهد بود و ABR روش مناسبی برای تصفیه فاضلاب در جوامع کم‌درآمد است. با وجود عدم تامین استاندارد خروجی بهداشتی، استفاده از پساب خروجی این راکتور برای آبیاری کشاورزی قابل قبول بود (۵).

با توجه به پژوهش‌ها تایید شده است که ترکیب فرایند رشد چسبیده (بیوفیلم) با روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب کارایی کلی را افزایش داده و از مشکلات بیومس معلق جلوگیری می‌کند. علاوه بر این بیوفیلم ممکن است برخی ضعف‌ها مانند حذف ناکافی مواد مغذی و شسته شدن بیومس را تقویت و اصلاح بکند (۶). با توجه به بررسی سوابق پژوهشی مطالعه مشابهی برای ارتقای ABR انجام نشده بود و برای توسعه و کاربرد کردن این سامانه که قابلیت اصلاح و ارتقای بالایی دارد، تحقیق حاضر ضروری بود. لذا هدف از این مطالعه بررسی کارایی سامانه راکتور بافل‌دار بی‌هوازی با مدیای ثابت *fixed bed anaerobic baffled reactor (FABR)* و راکتور بافل‌دار بی‌هوازی با بستر مدیای چرخان *rotating bed anaerobic baffled reactor (RABR)* در مقیاس آزمایشگاهی با شرایط میدانی برای تصفیه فاضلاب شهری، مقایسه آنها با همدیگر و تعیین عملکرد هر کدام در رسیدن به استانداردهای ملی دفع پساب بود.

مواد و روش‌ها

۱- راه‌اندازی و راهبری راکتورها

راکتور آزمایشی با مشخصات آمده در جدول ۱ از ورق

جدول ۱- ابعاد راکتور و مشخصات مدیا

اندازه	ابعاد
۶۰ cm	طول
۲۴	عرض
۳۰	بلندی
۳:۱	نسبت بالارو به پایین رو
۴۸/۶L	حجم کلی
۳۷L	حجم مفید
HDPE-۲H	نوع مدیا
۵۳۵m ^۲ /m ^۳	سطح ویژه مدیا
۸/۳L	حجم مدیا

۲- مشخصات بذر لجن و فاضلاب ورودی

مقدار ۱۱ L لجن دفعی تغلیظ شده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سلماس به عنوان بذر لجن تهیه گردید. ۳۰ درصد حجم مؤثر راکتور از این لجن به علاوه فضولات گاوی فیلتر شده به اندازه ۱/۵ L پر و مخلوط گردید. بدلیل اینکه لجن بی‌هوای در دسترس نبود این فضولات برای غنی‌سازی لجن از نظر باکتری‌های متان‌ساز استفاده شد. غلظت TSS و VSS این لجن به ترتیب ۸/۶ و ۴/۴ g/L و pH آن ۷/۵ بود. راکتور، با فاضلاب آشغال‌گیری و دانه‌گیری شده در بخش ورودی و از عمق ۳۰ سانتی‌متری کانال فاضلاب بصورت در خط تغذیه گردید. طبق اندازه‌گیری با دستگاه اکسیژن‌متر O_۲ محلول در ورودی سامانه تقریباً صفر بود. با توجه به HRT دبی ورودی بوسیله یک دستگاه پمپ پرستالتیک تنظیم و با حجم‌سنجی دقیق کالیبره گردید. شلنگ مسیر تغذیه هر روز ۳ نوبت تمیز گردید. مشخصات فاضلاب مورد تغذیه سامانه بصورت میانگین در جدول ۲ آمده است.

برای تعیین تقریبی بخش زنده بیومس در پایان پژوهش بعد از برداشت محتوی روی RABR و تخلیه کامل سوپرناتانت،

پلکسی‌گلس طراحی و ساخته شد و بعد از آزمون آب‌بندی و اندازه‌گیری حجم مؤثر بوسیله جابجایی آب در تصفیه‌خانه فاضلاب خوی در کنار پارشال فلوم و داخل اتاقکی که به همین منظور ساخته شده بود، نصب گردید. راکتور شامل ۵ بخش (۴ بخش برابر و یک بخش ابتدایی بزرگ‌تر (۱/۵) برابر بقیه بخش‌ها)) بود که بعنوان مخزن ته‌نشینی اولیه عمل می‌کرد و دارای ۳ ورودی و ۳ خروجی برای توزیع برابر جریان بود. مدیای میکروبی با مشخصات آمده در جدول ۱ در بخش ۳ و ۴ سامانه FABR بکار رفت. توده مدیا روی صفحه مشبک پلاستیکی قرار گرفت (تسا توزیع جریان به مدیا یکنواخت باشد) و با بذر لجن بطور یکنواخت آغشته گردید. برای رشد و تکثیر بهتر متان‌سازها و تشکیل فلاک‌های میکروبی مقاوم به شسته شدن، راکتور با HRT بالا یعنی ۴۸ h، برابر بارآلی ۰/۲۸ kg COD/m^۳.d راه‌اندازی شد. این مرحله مصادف با فصول تابستان و پاییز بود. اساس انتخاب گستره HRT برای سامانه FABR تامین استاندارد خروجی COD و BOD پساب بود، لذا راکتور به ترتیب در HRT ۴۸، ۳۶، ۲۴ و ۱۸ h بمدت ۱۷۵ روز در فصول پاییز، زمستان و بهار بطور پیوسته راهبری شد و کارایی آن در رسیدن به استاندارد دفع پساب با HRT بهینه مشخص گردید. بعد از اتمام کار راکتور بخش ۳ و ۴ آن با برداشت بافل میانی یکی شد و سامانه تبدیل به راکتور RABR شد. در بخش‌های یکی شده راکتور ظرف استوانه‌ای به قطر ۲۴ cm و بلندی ۲۴ cm از جنس توری استیل و حاوی همان مدیای استفاده شده در راکتور قبلی نصب گردید. این ظرف روی شفت سوار شده بود و بوسیله الکتروموتور با دور قابل تنظیم ۱۰۰-۰ rpm می‌چرخید. این سامانه با HRT ۲۴ h بمدت ۹۰ روز راهبری شد تا تاثیر چرخش بستر مدیا با دور ۶۰-۱۰ rpm در افزایش کارایی کلی آن ارزیابی گردد. معیار رسیدن سیستم به حالت پایدار در هر مرحله ثابت ماندن تقریبی راندمان حذف COD طی یک هفته بود. بعد از آن انتقال به مرحله بعدی انجام شد.

یک از بخش‌های راکتور بود. پارامترهای pH , $TP(PO_4)$, $SCOD$, COD , $(TCOD)$ BOD , TSS , TKN , SO_4 , NO_3 و قلیائیت به روش‌های استاندارد متد (۷) به ترتیب با روش رفلکس بسته، pH متر، WTW ، هضم پرسولفات و رنگ‌سنجی کلرید قلع، دستگاه BOD متر اکسی‌تاپ، دستگاه هضم، تقطیر ماکروکج‌دال $HACH$ برای تبدیل ازت آلی به آمونیوم و سپس روش رنگ‌سنجی نسلی، وزن‌سنجی، کدورت‌سنجی، روش بروسین و تیتراسیون اندازه‌گیری گردید. برای خواندن غلظت پارامترهای NO_3 , COD , PO_4 , NH_4 از دستگاه اسپکتروفتومتر $HACH$. DR ۵۰۰۰ استفاده گردید. بدلیل غلظت متغیر پارامترهای خروجی، نمودارها و نتایج براساس داده‌های شرایط پایدار هر مرحله رسم شده‌اند و نتایج براساس آنها تحلیل شده است. بدلیل ماهیت کار و واقعی بودن فاضلاب و معیار رسیدن به استانداردهای تخلیه پساب نیاز به آنالیز و مقایسه آماری تخصصی داده‌ها نبود و داده‌ها با نرم افزار اکسل ۲۰۱۳ مورد سنجش قرار گرفت.

یافته‌ها

۱- راه‌اندازی سامانه و رسیدن به شرایط پایدار

تغییرات مشخص دوره راه‌اندازی با اندازه‌گیری پارامترهای $SCOD$, TSS , pH و قلیائیت در ورودی و خروجی راکتور پایش گردید. در اوایل این دوره پساب خروجی راکتور بدلیل شسته شدن ذرات معلق سبک و بیومس غیرزنده لجن کدر بود، طوریکه غلظت TSS و $SCOD$ خروجی دارای نوسان زیاد بود. تغییرات pH ورودی و خروجی راکتور در گستره ۷/۷-۷/۲ و ۸-۷/۳ بود. بدلیل بالا بودن قلیائیت فاضلاب ورودی و افزایش ۱۱ درصدی آن در خروجی، pH خروجی برابر یا بالاتر از ورودی بود. با توجه به نمودار ۱ بعد از گذشت ۱۰۳ روز غلظت $SCOD$ خروجی به مقدار تقریباً ثابت 68 mg/L و کارایی حذف ۸۸ درصد و کارایی حذف TSS نیز به مقدار تقریباً ثابت ۹۳ درصد رسید. این دوره مدت ۱۰۷ روز طول کشید.

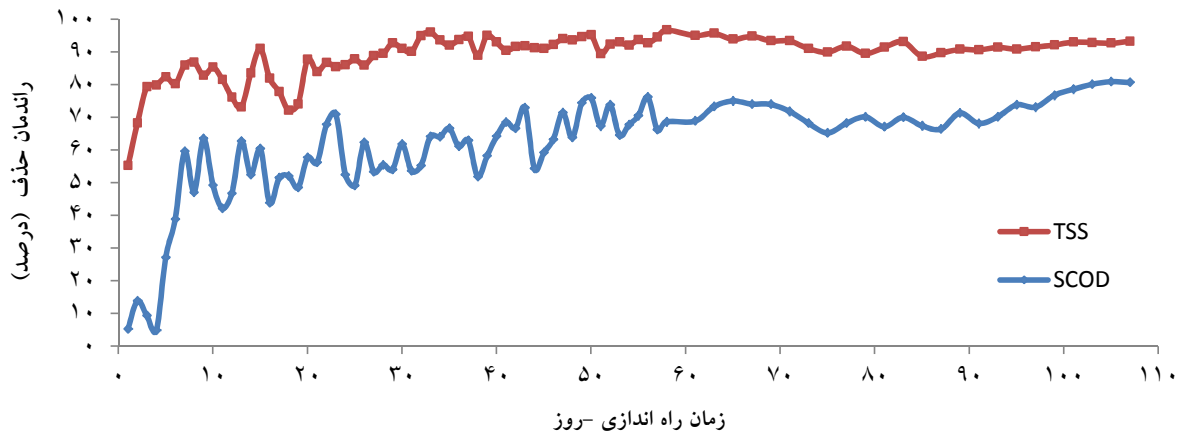
لجن همه بخش‌ها به هم زده شد و از هریک از بخش‌ها نمونه‌برداری شد و غلظت آن اندازه‌گیری گردید. بیشترین غلظت $33/9 \text{ g VSS/L}$ در بخش اول بود و بقیه بخش‌ها غلظت تقریباً یکسان $26/6 \text{ g VSS/L}$ داشتند. همچنین از مدیای داخل $RABR$ نیز نمونه‌برداری شد و جرم لجن روی مدیا $1/18 \text{ mg VSS/cm}^2$ اندازه‌گیری گردید.

جدول ۲- مشخصات فاضلاب شهری وارده به پایلوت در طول تحقیق

مقدار	واحد	پارامتر
۳۶۱	mg/L	BOD
۵۷۵	mg/L	COD
۲۷۷	mg/L	SCOD
۲۵۸	mg/L	TSS
۱۵۲	mg/L	VSS
۲۲/۶	mg/L	TP-PO _۴
۷/۵۵		pH
۶۹/۵	mg/L	TKN-N
۲/۶	mg/L	NO _۳ -N
۵۱۳	mg/L	Alkalinity
۷۵/۳	mg/L	SO _۴
۲۵-۱۷	°C	Temperature

۳- نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌ها

نمونه‌ها به تعداد ۴۴۸ عدد و بصورت یک روز در میان از ورودی و خروجی پایلوت و ۳ روز متوالی در پایان هر دوره از تغییرات HRT از همه بخش‌های راکتورها برداشته شد. به دلیل نوسان کیفی و لحظه‌ای فاضلاب ورودی و خروجی سامانه، نمونه‌برداری به صورت مرکب ۲۴ ساعته انجام گردید. آنالیز نمونه‌های خروجی برای تعیین کارایی کلی سامانه و نمونه‌های خروجی هر بخش برای تعیین عملکرد هر



نمودار ۱- عملکرد راکتور FABR در دوره راه اندازی

BOD را نسبت به HRT نشان می دهد. کارایی حذف این پارامترها نسبت به کاهش HRT روند نزولی داشت، طوری که حذف COD در عملکرد پایدار سامانه FABR که در پایان دوره ها روی داد در زمان ماند ۴۸، ۳۶، ۲۴ و ۱۸ h به ترتیب ۹۳، ۹۱، ۸۶ و ۸۰ درصد رسید. راکتور فقط در زمان ماند ۴۸ و ۳۶ h توانست به استاندارد خروجی COD و BOD برسد که ۳۶ h زمان ماند بهینه بود. در RABR این مقدار در دوره های ۱۰ تا ۳۰ rpm تقریباً ثابت و برابر ۸۷ درصد، در دور ۴۰ rpm، ۸۹ درصد و در دور ۵۰ rpm به ۹۰ درصد رسید و سامانه در دور ۵۰ rpm با غلظت خروجی COD ۵۶ mg/L و BOD ۲۶ mg/L به استاندارد خروجی دست یافت. نمودار ۳ کارایی RABR را نشان می دهد.

۴- عملکرد طولی یا بخشی راکتور FABR

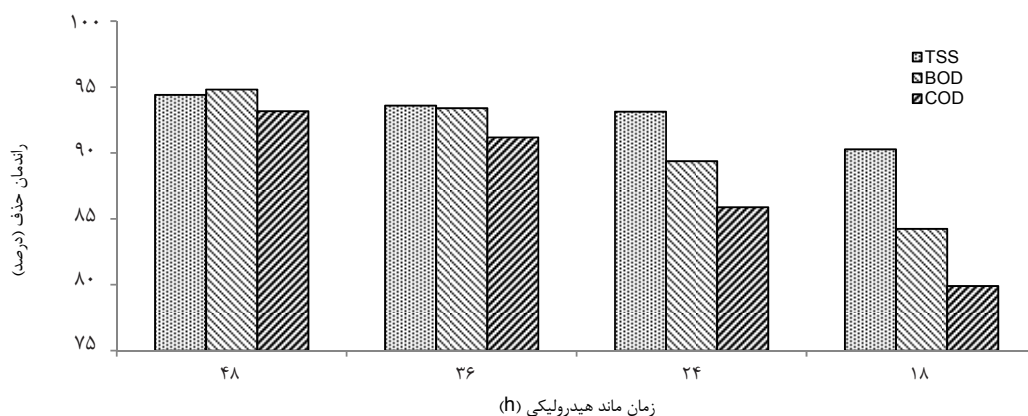
در پایان هر دوره از تغییرات HRT بمدت ۳ روز متوالی عملکرد همه بخش های راکتور FABR با نمونه برداری از شیر برداشت آنها و انجام آزمایش های روتین ارزیابی گردید تا نقش هر یک از بخش ها در کارایی کلی راکتور تعیین گردد. با توجه به نمودار ۴ عمده حذف بار آلی در بخش های اول تا سوم انجام شد، طوری که کارایی حذف تجمعی COD تا بخش ۳ در زمان ماند ۴۸، ۳۶ و ۲۴ h به ترتیب ۸۶/۴، ۸۴ و ۸۰ درصد بود. با کاهش زمان ماند سهم سایر بخش ها به تدریج افزایش یافت،

۲- کارایی سامانه ها در حذف TSS

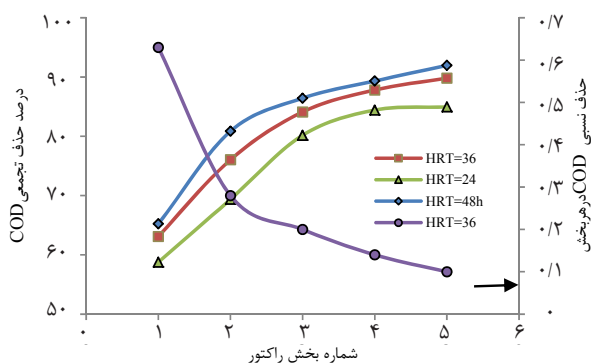
نمودارهای ۲ و ۳ کارایی حذف TSS را در شرایط پایدار هر دو سامانه نشان می دهد. در سامانه FABR کاهش زمان ماند کارایی حذف TSS را کاهش داد اما بازده تغییرات معنادار و قابل توجهی در طول پژوهش نداشت و در هر دوره از تغییرات HRT با رسیدن سامانه به کارایی پایدار تقریباً ثابت ماند. در این سامانه در شرایط پایدار در HRT ۴۸، ۳۶، ۲۴ و ۱۸ h به ترتیب برابر با ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۲۴ mg/L بود. بیشترین حذف آن در زمان ماند ۴۸ h و به مقدار ۹۴/۶ درصد بود. در سامانه RABR این بازده در شرایط پایدار با افزایش جزئی از مقدار ۹۳/۱ در دور ۱۰ به ۹۴/۲ درصد در دور ۵۰ رسید. غلظت TSS خروجی در دوره های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ به ترتیب ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶ و ۱۶ mg/L بود. در اوایل دور ۱۰ بدلیل تلاطم ناشی از چرخش بستر مدیا خروج TSS بیشتر بود اما بتدریج کاهش یافت و تقریباً ثابت گردید.

۳- کارایی راکتورها در حذف COD و BOD

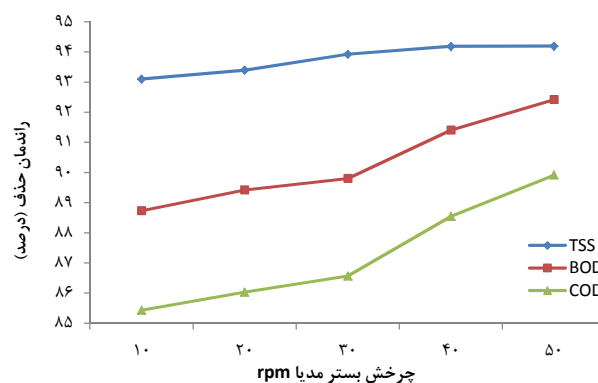
هر ۴ مرحله HRT تا رسیدن به بازده ثابت و حداکثری حذف COD انجام شد و ادامه یافت. راکتور ۶۳ روز در زمان ماند ۴۸ h، ۵۵ روز در ۳۶ h، ۴۰ روز در ۲۴ h و ۱۷ روز در ۱۸ h راهبری شد و پس از نوسانات زیاد به عملکرد بهینه و تقریباً ثابت در هر دوره رسید. نمودار ۲ تغییرات حذف COD و



نمودار ۲- کارایی FABR در حذف COD, BOD, TSS در شرایط پایدار پایانی هر دوره



نمودار ۴- عملکرد طولی راکتور FABR در عملکرد پایدار هر HRT



نمودار ۳- کارایی RABR در حذف COD, BOD, TSS در شرایط پایدار پایانی هر دور

می‌دهد. با وجود نوسان غلظت خروجی ازت و فسفر در هر دو راکتور در عملکرد پایدار سامانه FABR کارایی حذف TKN در HRT ۴۸، ۳۶، ۲۴ و ۱۸ h به ترتیب ۲۱، ۱۶/۶، ۱۴/۹ و ۹/۳ درصد و فسفر به ترتیب ۲۹/۹، ۲۸/۱، ۲۶/۶ و ۲۱ درصد بود. غلظت خروجی TKN و فسفر در HRT بهینه ۳۶ h برابر ۶۱/۲ و ۱۵/۹ mg/L بود. کارایی حذف این مواد در سامانه RABR مطابق با افزایش حذف COD افزایش داشت، طوریکه حذف TKN و فسفر کل از ۱۰/۷ و ۲۵/۴ درصد در دور ۱۰ rpm به ۱۶/۸ و ۲۸/۸ درصد و به غلظت خروجی ۵۲ و ۱۵/۹ mg/L در دور بهینه ۵۰ rpm رسید که نمودارهای ۶ و ۷ آن را نشان می‌دهد.

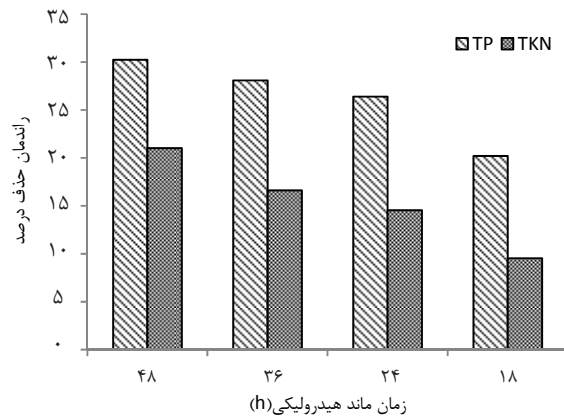
طوری‌که سهم دو بخش دارای مدیا روی هم در حذف COD ۸، ۵/۶ و ۱۰/۹ درصد بصورت تجمعی به ترتیب در HRT ۴۸، ۳۶ و ۲۴ h بود، یعنی با کاهش HRT نقش بخش دارای مدیا هم بیشتر شد. در HRT بهینه ۳۶ h حذف جزئی و مستقل COD در بخش اول ۰/۶۳، در بخش دوم ۰/۲۸، در بخش سوم و چهارم (دارای مدیا) ۰/۲ و ۰/۱۴ و بخش پنجم ۰/۱ بود. بازده بالا در بخش اول مربوط به حذف ۵۳ درصدی TSS است که بخش زیادی از آنرا COD ذره‌ای تشکیل می‌دهد. کارایی حذف تجمعی COD نیز در همین HRT از بخش اول تا پنجم به ترتیب ۶۳، ۷۶، ۸۴، ۸۸ و ۸۹/۸ درصد بود.

۵- کارایی راکتورها در حذف TKN و فسفر کل (PO₄)
نمودار ۵ کارایی حذف TKN و TP را نسبت به HRT نشان

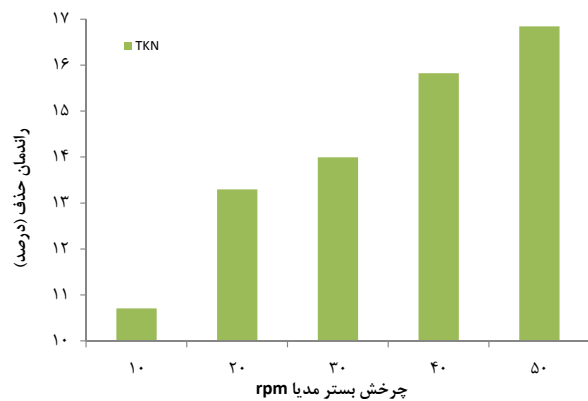
بحث

در مقایسه با تحقیقات مشابه، بسته به نوع فاضلاب، شرایط آب و هوایی، کیفیت لجن اولیه و دمای فاضلاب که زمان راه‌اندازی را از ۵۷ تا ۱۲۸ روز گزارش کرده‌اند (۱، ۸)، زمان نسبتاً طولانی راه‌اندازی در این پژوهش ناشی از تغییرات کیفی ساعتی و روزانه فاضلاب ورودی و همچنین خوگرفتن لجن هوازی با شرایط بی‌هوازی و افت جزئی فصلی دمای فاضلاب بود. علاوه بر این فاضلاب رقیق مانند نوع بهداشتی ذاتا نیروی انتقال جرم پایین بین سوبسترا و بیومس ایجاد می‌کند و باعث القای رشد و تکثیر باکتری‌های کند رشد مانند متانوسنتا در مرحله متان‌سازی که تعیین‌کننده‌ترین مرحله تصفیه بی‌هوازی است، می‌شود (۹). نمودار ۲ نشان می‌دهد که راندمان حذف TSS دارای کمترین شدت همبستگی ($R^2=0/85$) به HRT هست، یعنی با رسیدن به بیشترین بازده (بازده ثابت) مستقل از غلظت ورودی بوده و در همه زمان‌های ماند تغییرات معناداری نداشت. مکانیسم اصلی حذف TSS در این سامانه‌ها به‌دام افتادن آن در بستر لجن یا پتوی لجن شناور در هر بخش از راکتور هست (۱۰). علت خروج جزئی TSS هم تولید بیوگاز و بالا آمدن این مواد به همراه آن و شسته شدن بیومس در بخش آخر به دلیل فشر غذایی بیومس بود که نسبت ۵۸ درصدی VSS/TSS در خروجی راکتورها گواه علت آخر است. البته با توجه به ساختار سامانه نقش بخش آخر در زلال‌سازی نهایی پساب خروجی مهم‌تر است و می‌توان تأمین استاندارد خروجی TSS را در همه زمان‌های ماند بویژه در ۱۸ h به نقش فیلتری مدیا نسبت داد.

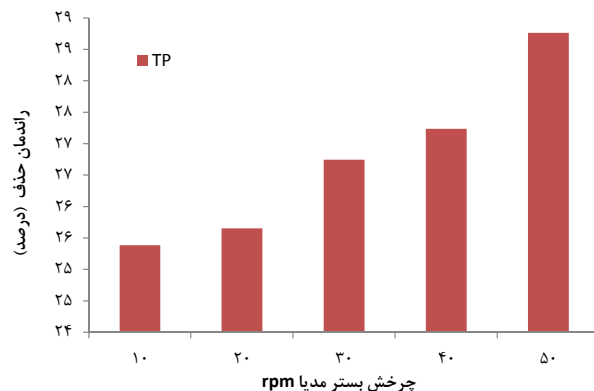
کارایی راکتورها تا رسیدن تدریجی به بازده تقریباً ثابت از نظر همه پارامترها نوسان داشت. محققین در سال ۱۹۸۲ هم حذف نامنظم مواد آلی را در فاضلاب بهداشتی در زمان ماند بالا در راکتور بافل‌دار بی‌هوازی گزارش کرده‌اند (۱۰). با توجه به نمودار ۲ کارایی حذف BOD, COD نسبت به کاهش HRT روند نزولی دارد و شدت همبستگی آنها به HRT



نمودار ۵- کارایی راکتور FABR در حذف TP و TKN در شرایط پایدار هر HRT



نمودار ۶- کارایی راکتور RABR در حذف TKN در شرایط پایدار هر دور



نمودار ۷- کارایی راکتور RABR در حذف TP در شرایط پایدار هر دور

درصد COD خروجی را SCOD تشکیل می‌داد که مهمترین علت آن حذف بالای TSS است. SCOD خروجی می‌تواند ناشی از عدم تجزیه و یا حذف برخی ترکیبات آلی محلول مقاوم مانند لیگنین، تانین، سورفاکتانت و اسیدهای هیومیک و محصولات متابولیسی میکروبی باشد. رابطه زیر موازنه جرمی COD را در یک سامانه بی‌هوازی نشان می‌دهد (۱۷). مکانیسم حذف مواد آلی در این سامانه‌ها حذف تقریباً کامل COD ذره‌ای در بستر لجن، مصرف بخشی از COD برای احیای سولفات و نیترات و تبدیل بخش دیگر به متان بوده است.

$$TCOD_{in} = TCOD_{out} (COD_{particle,out} + COD_{soluble,out} + COD_{CH_4,g} + COD_{CH_4,aq} + COD_{biomass} + COD_{SO_4})$$

با توجه به نمودار ۳ کارایی RABR فقط در دور ۴۰ و rpm ۵۰ نسبت به FABR با زمان ماند ۲۴ h افزایش قابل توجه داشت و راکتور توانست در دور rpm ۵۰ به استاندارد خروجی COD و BOD برسد. افزایش ۴، ۳ و ۲ درصدی کارایی حذف COD، فسفر و ازت نسبت به راکتور قبلی ناشی از اختلاط فاضلاب، چرخش بستر مدیا و انبساط مدیا، کاهش ضخامت لایه مرزی (لایه انتشاری سوبسترا به بیومس) و در نتیجه افزایش انتقال جرم به بیومس و دفع سریعتر متابولیت‌های سمی میکروبی از محیط است (۱۸). Moussavi و همکاران نیز در دور rpm ۲۰ با سامانه سیکلی با بستر مدیای چرخان موفق به افزایش ۲۰ درصدی حذف COD نسبت به بستر ثابت در فاضلاب سنتتیک شده بودند. مهمترین تاثیر تحرک مدیا یا ایجاد اختلاط در لجن افزایش میزان و سرعت انتقال جرم به بیومس است (۱۹).

حضور O_2 ، NO_3 و SO_4 در فاضلاب شهری می‌تواند فرایند تصفیه بی‌هوازی را به تاخیر انداخته یا کارایی آن را کاهش دهد، چرا که این مواد پتانسیل اکسیداسیون فاضلاب را بالا نگه می‌دارند، بنابراین باکتری‌های متان‌ساز نیازمندند تا شرایط احیایی با حذف این مواد توسط سایر باکتری‌ها در بخش‌های نخست سامانه رخ دهد و با کاهش تدریجی این پتانسیل در طول راکتور شرایط متان‌سازی فراهم شود. از طرفی

یکسان و برابر ۰/۹۵ است. دلیل کاهش کارایی سامانه نسبت به کاهش HRT را این‌گونه می‌توان تحلیل کرد که: (۱) مدل سینتیکی حاکم بر رشد چسبیده و بستر لجن بیوفیلمی است، و در فرایندهای بیوفیلمی مرحله محدودکننده کارایی سیستم، معمولاً کاهش نرخ انتقال سوبسترا به بیوفیلیم بوده و کارایی تصفیه عمدتاً بستگی به زمان ماند هیدرولیکی و گرادیان غلظت سوبسترا دارد (۱۱)، بنابراین با کاهش زمان تماس و گرادیان غلظت در طول سامانه میزان برخورد و نفوذ سوبسترا در بیوفیلیم کاهش می‌یابد. (۲) کاهش زمان ماند باعث افزایش فضای مرده هیدرولیکی و به تبع آن فضای مرده زیستی بعنوان بخش غیرفعال بیومس می‌شود. (۳) با توجه به کندی متابولیسم باکتری‌های متان‌ساز کاهش زمان ماند تعادل دینامیک فعالیت آنها را با باکتری‌های اسیدساز از نظر مصرف پیوسته اسیدهای آلی که در مرحله اسیدسازی تولید شده، بهم می‌زند (۱۲). (۴) با کاهش HRT به دلیل محدودیت سوبسترا بویژه در بخش‌های پایانی سامانه عمده مواد آلی برای کسب انرژی بکار رفته و سنتز سلولی کاهش می‌یابد (۱۳). با توجه به تحقیقات مشابه قبلی که با راکتور بافل‌دار بی‌هوازی روی فاضلاب شهری یا بهداشتی کار کرده‌اند (۱۰، ۱۳، ۱۴) راندمان حذف COD در این تحقیق نسبت به برخی از آنها که به کارایی حذف ۶۸ تا ۷۹ درصدی COD رسیده بودند، بیشتر بود که علت آن را به HRT بالا، راه‌اندازی بلندمدت و موفق، غلظت بالای لجن و نهایتاً کاربرد مدیا در بخش مناسب سامانه می‌توان نسبت داد. مدیا باکتری‌های هم‌زیست را کنار هم نگه داشته و سطح تماس بیومس با سوبسترا را افزایش می‌دهد و توزیع سوبسترا و بیومس را در کل محیط یکنواخت می‌کند و لذا میزان حذف مواد آلی تا حد قابل توجهی نسبت به لجن معلق افزایش می‌یابد (۱۵). در مجموع سرعت خطی فاضلاب در راکتور، ارتفاع لجن، مشخصات لجن اولیه و نوع آن، توزیع گونه‌های میکروبی و هیدرولیک جریان و نحوه راه‌اندازی بر عملکرد راکتور مؤثر بوده و در مقادیر بهینه آنها میزان حذف مواد آلی تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد (۱۶). به‌طور میانگین ۸۵

حد ۲ درصد بوده و از آن سنتز سلولی بیشترین مقدار است. با توجه به حذف ازت بیشتر از مورد نیاز سنتز سلولی، ممکن است مکانیسم‌های دیگر حذف چون اکسیداسیون بی‌هوازی آمونیوم (آناماکس) نیز روی داده باشد (۲۱). جذب سطحی و متابولیسم سلولی هم دو راه عمده برای حذف فسفر است (۲۲). با توجه به نمودار ۵ کارایی حذف ازت و فسفر با زمان ماند رابطه مستقیم دارد و شدت همبستگی آنها به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹ است که نشان می‌دهد تاثیر کاهش زمان ماند بر حذف ازت مؤثرتر از فسفر بوده است. حذف بیشتر فسفر نسبت به ازت منطبق با نتایج مطالعه Dongshen است، که به حذف ۱۹ و ۳۰ درصدی ازت و فسفر در راکتور بافل‌دار بی‌هوازی رسیده بود (۱۱) نسبت N/P در ورودی ۹/۲ و در خروجی برابر ۳/۵ بود که نشان می‌دهد فسفر به نسبت بیشتر مصرف شده است که می‌توان دلیل آن را حذف اضافی فسفر بصورت جذب سطحی لخته‌ها و ترسیب آن به شکل فسفات کلسیم، منیزیم و یا ترکیبات آلی دانست (۲۳). ضعف این سامانه همانند برخی روش‌های رایج تصفیه فاضلاب (۲۴)، عدم تامین استاندارد خروجی مواد مغذی و نیاز به تصفیه تکمیلی در فاضلاب شهری است، به همین خاطر این سامانه در جوامع کوچک و یا مناطقی که زمین کافی برای تصفیه طبیعی دارند مناسب است. با وجود این می‌توان این سامانه را با فرایندهای تلفیقی کم هزینه مانند انعقاد الکتریکی تا حد تصفیه هوازی ارتقا داد (۲۵). از کاستی این پژوهش نیز می‌توان به بررسی عملکرد سامانه و پایداری آن در دبی‌های متغیر که عملاً در تصفیه فاضلاب شهری وجود دارد، اشاره کرد. همچنین با پیش پتانسیل اکسیداسیون و احیا و میزان متان تولیدی می‌توان کنترل بیشتری بر فرایند داشت که در این تحقیق بدلیل نبود امکانات میسر نشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به عملکرد FABR در رسیدن به استاندارد خروجی COD, BOD و TSS در HRT ۳۶ h و مزیت آن در

با وجود سولفات باکتری‌های احیاکننده سولفات به‌عنوان رقیب باکتری‌های متان‌زا عمل کرده و بخشی از استات را که خوراک اصلی باکتری‌های متان‌زاست، مصرف می‌کنند (۲۰). براین اساس غلظت سولفات و نیترات در طول تحقیق پایش گردید که به‌طور میانگین سولفات ۶۵/۷ درصد در FABR حذف شد و بیشترین حذف یعنی ۷۵ درصد در زمان ماند ۴۸ h بود. نیترات نیز بطور میانگین ۳۹/۳ درصد حذف شد که مجدداً بیشترین حذف در ۴۸ h بود. روند حذف سولفات و نیترات در طول راکتورها نزولی بود و حذف آنها عمدتاً در بخش‌های دوم و سوم روی داد. غلظت سولفات و نیترات خروجی ۲۹/۶ و ۱/۵۹ mg/L بطور میانگین در طول تحقیق بود یعنی اینکه باکتری‌های بی‌هوازی اختیاری که از سولفات و نیترات به‌عنوان الکترون‌گیرنده استفاده می‌کنند در همه بخش‌ها وجود دارند و امکان جدایی مکانی و زمانی کامل فاز متان‌زایی از اسیدزایی در فاضلاب شهری وجود ندارد. با مقایسه روند حذف COD در نمودار ۴ این نکته تایید می‌شود که راهبری این نوع راکتور در زمان‌های ماند بالا مانند ۲۴ h و بالاتر تا حد زیادی مستقل از خاصیت بافل‌بندی آن است و به دلیل اینکه جدایی فاز اسید و متان‌سازی به‌طور کامل اتفاق نمی‌افتد، در بخش‌های اولیه بیشتر مواد آلی و حتی مواد مغذی حذف شده و کارآمدی سامانه تفاوت چندانی در طول خود نمی‌کند، لذا عملاً سامانه از تمام توانایی خود استفاده نمی‌کند، و بایستی بافل‌بندی و طراحی آن با توجه به نوع کاربری بهینه گردد (۴). اگر این سامانه برای تصفیه متمرکز فاضلاب شهری بکار رود بایستی بنابر HRT مناسب هر فاز تصفیه بی‌هوازی یعنی با اندازه متناسب بخش‌ها طراحی گردد. مثلاً بخش‌های آخر آن به دلیل کندی متابولیسم باکتری‌های متان‌ساز بزرگ‌تر از بقیه باشد و سامانه با تعداد بافل‌های بیشتر اما HRT پایین‌تر کار کند.

در شرایط بی‌هوازی سه مسیر برای حذف ازت وجود دارد، فرارسازی آمونیاک، احیای نیترات و سنتز سلولی. در pH زیر ۸ در راکتور کمتر از ۵ درصد ازت آمونیاکی به فرم آمونیاک است و بقیه به فرم یون آمونیوم است لذا سهم فرارسازی در

تشکر و قدردانی

این پژوهش حاصل بخشی از پایان‌نامه مقطع دکترای مهندسی بهداشت محیط در دانشگاه تربیت مدرس با عنوان "بررسی کارایی راکتورهای بافل‌دار بی‌هوازی با بسترمدیای ثابت و چرخان برای تصفیه فاضلاب شهری" است که در سال ۹۳-۹۴ اجرا شده است. نویسندگان این مقاله از حمایت دانشگاه تربیت مدرس و نیز شرکت آب و فاضلاب آذربایجان غربی و مسئولان تصفیه‌خانه فاضلاب خوی در فراهم آوردن امکانات لازم جهت انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

1. Reynaud N, Buckley C. The anaerobic baffled reactor (ABR) treating communal wastewater under mesophilic conditions: a review. *Water Science and Technology*. 2016;73(3):463-78.
2. Zhu G, Zou R, Jha AK, Huang X, Liu L, Liu C. Recent developments and future perspectives of anaerobic baffled bioreactor for wastewater treatment and energy recovery. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2015;45(12):1243-76.
3. Ji G, Sun T, Ni J, Tong J. Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient. *Bioresource Technology*. 2009;100(3):1108-14.
4. Hahn MJ, Figueroa LA. Pilot scale application of anaerobic baffled reactor for biologically enhanced primary treatment of raw municipal wastewater. *Water Research*. 2015;87:494-502.
5. Foresti E, Zaiat M, Vallero M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2006;5(1):3-19.
6. Safoniuk M. Wastewater engineering: Treatment and reuse. *Chemical Engineering*. 2004;111(7):10-12.
7. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association; 2005.
8. 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):1319-26.
9. Elyasi S, Amani T, Dastyar W. A Comprehensive Evaluation of Parameters Affecting Treating High-Strength Compost Leachate in Anaerobic Baffled Reactor Followed by Electrocoagulation-Flotation Process. *Water, Air and Soil Pollution*. 2015;226(4):1-14.
10. Bodkhe S. A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 2009;90(8):2488-93.
11. Ødegaard H. Innovations in wastewater treatment:—the moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*. 2006;53(9):17-33.
12. Ghaniyari-Benis S, Martín A, Borja R. Kinetic modelling and performance prediction of a hybrid anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater at mesophilic temperature. *Process Biochemistry*. 2010;45(10):1616-23.
13. Feng H, Hu L, Mahmood Q, Qiu C, Fang C, Shen D. Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2008;62(3):232-38.
14. Foxon K, Pillay S, Lalbahadur T, Rodda N, Holder F, Buckley C. The anaerobic baffled reactor (ABR):

- an appropriate technology for on-site sanitation. *Water SA*. 2007;30(5):44-50.
15. Del Pozo R, Diez V. Organic matter removal in combined anaerobic-aerobic fixed-film bioreactors. *Water Research*. 2003;37(15):3561-68.
16. Wang J, Huang Y, Zhao X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor. *Biore-source Technology*. 2004;93(2):205-208.
17. Nachaiyasit S, Stuckey DC. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 2. Step and transient hydraulic shocks at constant feed strength. *Water Research*. 1997;31(11):2747-54.
18. Aghapour AA, Moussavi G, Yaghmaeian K. Investigating the performance of a novel cyclic rotating-bed biological reactor compared with a sequencing continuous-inflow reactor for biodegradation of catechol in wastewater. *Bioresource Technology*. 2013;138:369-72.
19. Aghapour AA, Moussavi G, Yaghmaeian K. Degradation and COD removal of catechol in wastewater using the catalytic ozonation process combined with the cyclic rotating-bed biological reactor. *Journal of Environmental Management*. 2015;157:262-66.
20. Bayrakdar A, Sahinkaya E, Gungor M, Uyanik S, Atasoy AD. Performance of sulfidogenic anaerobic baffled reactor (ABR) treating acidic and zinc-containing wastewater. *Bioresource Technology*. 2009;100(19):4354-60.
21. Hajsardar M, Borghei SM, Hassani AH, Takdastan A. Optimization of nitrogen removal from synthetic wastewater by eliminating nitrification step of a fixed-film bed reactor. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;9(1):69-80 (in Persian).
22. Lu J, Gavala HN, Skiadas IV, Mladenovska Z, Ahring BK. Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyper-thermophilic prehydrolysis step. *Journal of Environmental Management*. 2008;88(4):881-89.
23. Wu P, Ji X, Song X, Shen Y. Nutrient removal performance and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process. *Chemical Engineering Journal*. 2013;232:273-79.
24. Azhdarpoor Efsanabadi A, Mohammadi P, Dehghani M. Evaluation of modified anoxic/aerobic sequencing batch reactor (SBR) performance for the removal of organic matter and nitrogen from wastewater. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2015;7(4):531-40.
25. Gholikandi GB, Jamshidi S, Hazrati H. Optimization of anaerobic baffled reactor (ABR) using artificial neural network in municipal wastewater treatment. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014;13(1):95-104.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Performance Evaluation of Fixed and Rotating Bed Anaerobic Baffled Reactors for Municipal Wastewater Treatment

M Aqanaghad¹, G Moussavi^{2,*}

1. Ph.D Student, Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 9 May 2016
Revised: 18 July 2016
Accepted: 26 July 2016
Published: 20 December 2016

Key words: Anaerobic baffled reactor, Fixed bed, Rotating bed, Municipal wastewater treatment, Khoy City

***Corresponding Author:**
moussavi@modares.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Being low cost of building and operation, anaerobic baffled reactor is considered superior to aerobic methods of wastewater treatment, especially for small communities. However, it needs to be studied for upgrade and overcome of its limitations. The purpose of this study was to evaluate the performance of FABR and RABR reactors for the municipal wastewater treatment at laboratory scale and in field conditions to determine their optimum conditions in reaching effluent discharge standards.

Materials and Methods: This study was conducted in Khoy wastewater treatment plant. FABR was operated for 267 days with hydraulic retention time of 18-48 h and RABR was operated for 90 days with media bed rotation of 10-50 rpm. The reactors were fed in line from the wastewater canal. Using composite sampling, 224 samples were taken from the inflow and outflow of the reactors and each sample was analyzed for parameters of COD, BOD, TSS, VSS, TKN, and TP.

Results: The reactor startup took about 107 days. FABR removal efficiency was 93-80, 21-10, and 30-21% for COD, TKN, and PO₄ respectively at HRT of 48-18 h. FABR reached effluent disposal standard of TSS, COD, and BOD in all conditions and optimum HRT of 36 h. RABR reached to these standards at HRT 24 h and 50 rpm. However, none of them could meet the nutrient effluent standards.

Conclusion: FABR is an appropriate system for municipal wastewater treatment but for reaching N and P effluent standard, it should be combined with aerobic post-treatment. Moreover, in order to reuse the reactor's nutrient-rich effluent for irrigation; it can be reused as subsurface irrigation.

Please cite this article as: Aqanaghad M, Moussavi G. Performance evaluation of fixed and rotating bed anaerobic baffled reactors for municipal wastewater treatment. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2016;9(3):421-32.