dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

تأثیر زمان ماند هیدرولیکی بر عملکرد بیوراکتور غشایی در تصفیه فاضلاب شهری

هادی فلاحتی مروست[1]، ایوب کریمی جشنی[2]، غلامرضا رخشنده‌رو[3]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه شیراز
۲- استادیار، بخش عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز
(نویسنده مسئول) ۳۶۱۳۳۵۷۳ (۰۷۱) akarimi@shirazu.ac.ir
۳- استاد، بخش عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز

(دریافت ۹٤/۲/۱۹ پذیرش ۹۵/۱/۳۱)

چکیده

استانداردهای کیفی پساب‌ها نسبت به گذشته سختگیرانه‌تر شده و لذا نیاز به بهبود کیفیت خروجی فاضلاب‌های تصفیه شده روز به روز در حال افزایش است. از طرفی با افزایش فشار بر منابع آب سراسر جهان، لازم است بازیافت و استفاده مجدد از خروجی فاضلاب مورد توجه قرار گیرد. اخیراً بیوراکتورهای غشایی که از محبوبیت و توجه زیادی برخوردارند به عنوان یک فناوری امیدبخش در تصفیه فاضلاب مطرح شده‌اند. در راستای بهبود کیفیت خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شیراز، تصفیه فاضلاب شهری توسط تکنولوژی بیوراکتور غشایی در مقیاس پایلوت میدانی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شیراز به مدت ۹ ماه مورد مطالعه قرار گرفت. پایلوت ساخته شده در این تحقیق از یک راکتور هوادهی به حداکثر حجم مفید ۲۳۰ لیتر و یک حوضچه غشایی به حجم ۱۱۰ لیتر تشکیل شد و یک غشا به فرم الیاف توخالی درون حوضچه غشایی استفاده شد. ۷ زمان ماند هیدرولیکی متفاوت هوادهی از ۲ تا ۱۲ ساعت بر روی این پایلوت مورد آزمایش قرار گرفت و عملکرد سیستم در حذف مواد آلی، نیتروژن آمونیاکی، مواد معلق و کدورت و همچنین ظرفیت غشاء بررسی شد. بازدهی سیستم در حذف مواد آلی در تمام دوره به جز زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت کاملاً پایدار و ثابت بود. به‌طوری که کاهش COD و BOD به ترتیب به بیش از ۹۵ و ۹۹ درصد رسید. نیتریفیکاسیون به‌طور کامل انجام شد و در تمام دوره به‌جز زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت پایدار و ثابت بود. غلظت مواد معلق خروجی سیستم تقریباً برابر صفر و میزان کدورت کمتر از NTU ۱ به‌دست آمد. همچنین بررسی ظرفیت غشا نشان داد که فلاکس متوسط $Lm^{-2}\ h^{-1}$ ۵/۵ در خلا متوسط ۰/۳ اتمسفر قابل دستیابی است. نتایج نشان داد که عملکرد سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه در تصفیه فاضلاب شهری شیراز در مقایسه با سایر سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری رایج خیلی بالاتر بود و بازدهی سیستم تحت تأثیر زمان ماندهای هیدرولیکی ۳ تا ۱۲ ساعت راکتور هوادهی نبود. بنابراین با توجه به کیفیتی که پساب خروجی این سیستم دارد به طور یقین می‌تواند جهت مصارف بسیار زیادی در صنعت و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بیوراکتور غشایی، فاصلاب شهری، زمان ماند هیدرولیکی، COD، نیتروژن آمونیاکی

۱- مقدمه

امروزه با افزایش فشار بر منابع آب در سراسر جهان، به‌طور ویژه ایران لازم است که بازیافت و استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده مورد توجه قرار گیرد و کیفیت خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بهبود یابد. بنابراین روش‌هایی که به‌منظور تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند باید توانایی این را داشته باشند که فاضلاب را تا حدی تصفیه نمایند که قابل استفاده مجدد باشد. از طرفی هزینه فرایند تصفیه، شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جاری، حداقل شود.

یکی از روش‌هایی که در چندین سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است بیوراکتور غشایی[1] است که تلفیقی از فرایندهای بیولوژیکی و غشایی است. عملیات هضم و تجزیه در داخل بیوراکتور انجام می‌گیرد ولی جداسازی فاضلاب تصفیه شده از لجن تولیدی توسط غشا صورت می‌پذیرد. این روش مزایای هر دو سیستم بیوراکتور و غشایی را شامل می‌شود. مهم‌ترین مزیت‌های بیوراکتور غشایی نسبت به سایر روش‌های متداول تصفیه فاضلاب که باعث برتری ارزشمند این روش شده است، در ادامه بیان شده

[1] Membrane Bioreactor

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

است (Mohammed et al. 2008; Wen et al. 2004; Davis et al. 1998; Rosenberger et al. 2002).

• تمام ذرات معلق و برخی از مواد محلول داخل بیوراکتور باقی می‌ماند و خروجی با کیفیت عالی و پایدار تولید می‌کند.

• امکان حذف تمام ویروس‌ها و باکتری‌ها از خروجی بیوراکتور غشایی وجود دارد. بنابراین واحد گندزدایی پرهزینه، و در راستای آن، خطرات ناشی از محصولات تولیدی توسط گندزدایی حذف می‌شود.

• امکان افزایش غلظت بیومس درون بیوراکتور تا مقادیر نزدیک ۳۰گرم در لیتر بدون نیاز به حوضچه ته‌نشینی وجود دارد. بنابراین در این سیستم‌ها فاضلاب‌های داری آلودگی بالا با نرخ تولید لجن کم قادر به تصفیه می‌باشند.

• سیستم‌های بیوراکتور غشایی نسبت به سیستم‌های تصفیه رایج متراکم‌تر هستند و حجم کمتری اشغال می‌کنند، همچنین مصرف انرژی کمتری دارند و سازگار با اهداف بازیافت آب می‌باشند.

• دوره راه‌اندازی بیوراکتورهای غشایی خیلی سریع‌تر به پایداری می‌رسد و بهره‌برداری از این سیستم‌ها به‌علت اتوماتیک بودن بیشتر مراحل فرایند، آسان است.

مهم‌ترین معایب بیوراکتورهای غشایی بیستر مربوط به هزینه‌های بالای ساخت سیستم از جمله هزینه‌های خرید واحد غشا و تأمین انرژی لازم برای جبران افت فشار ایجاد شده بر اثر عبور جریان در واحد غشا است. از دیگر معایب این سیستم می‌توان به بحث گرفتگی غشا اشاره نمود که به‌منظور رفع این مشکل نیاز به تمیزسازی شیمیایی و شستشوی معکوس غشا می‌باشد (Mohammed et al. 2008).

بیوراکتورهای غشایی در تصفیه پساب‌های صنایع مختلف مانند پالایشگاه‌ها، پتروشیمی، نساجی، شیرابه لندفیل به‌خصوص فاضلاب‌های شهری به کار برده شده است (Judd & Judd 2006). در سال ۲۰۰۲ عملکرد بیوراکتور غشایی مستغرق در تصفیه هوازی فاضلاب شهری به‌مدت ۵۳۵ روز مورد مطالعه قرار گرفت (Rosenberger et al. 2002). در این تحقیق زمان ماند هیدرولیکی بین ۱۰/۴ تا ۱۵/۶ ساعت تغییر کرد. بازدهی حذف مواد آلاینده توسط سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه توسط این محققان در یک سطح بالا و ثابت، در کل دوره بهره‌برداری به‌دست آمد. به‌طوری که میزان حذف COD به ۹۵ درصد رسید و نیتریفیکاسیون به طور کامل انجام شد (Rosenberger et al. 2002). در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ تأثیر زمان ماند هیدرولیکی بر روی تصفیه‌پذیری فاضلاب هضم شده[1] توسط سیستم AO/MBR[2] به‌مدت ۲۱۸ روز مورد مطالعه قرار گرفت و زمان ماند هیدرولیکی کل سیستم تحت آزمایش خود از ۸ ساعت به ۲/۵ ساعت کاهش یافت. این محققان مشاهده کردند که کاهش زمان ماند هیدرولیکی درحالی که اثرات جزئی و محدودی بر روی حذف COD دارد باعث تقویت حذف آمونیوم نیز می‌شود (Gao et al. 2012). در پژوهش دیگری اثرات زمان ماند هیدرولیکی بر گرفتگی غشا و نرخ تولید لجن در یک سیستم بیوراکتور غشایی در مقیاس آزمایشگاهی برای تصفیه پساب فنل‌دار مورد مطالعه قرار گرفت (Hemmati et al. 2012). نتایج این محققان نشان داد که افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۸ ساعت به ۱۲ ساعت باعث کاهش گرفتگی غشا و کاهش غلظت لجن موجود در بیوراکتور می‌گردد. اگرچه بازدهی حذف COD و فنل در هر سه زمان ماند هیدرولیکی ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت به‌ترتیب بالای ۹۶ و ۹۹ درصد به‌دست آمد (Hemmati et al. 2012).

در سال ۲۰۱۳، عملکرد یک سیستم بیوراکتور غشایی در مقیاس آزمایشگاهی برای تصفیه پساب بیمارستانی و خانگی مورد بررسی قرار گرفت (Jadhao & Dawande 2013). در این مطالعه از غشا به شکل الیاف توخالی استفاده شد و نتایج نشان داد که با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۴ به ۸ ساعت، بازدهی حذف COD، BOD و نیتروژن آمونیاکی کاهش پیدا می‌کند. در حالی که افزایش سن لجن از ۱۰ روز به ۳۰ روز باعث بهبود عملکرد سیستم مورد مطالعه شد (Jadhao & Dawande 2013).

تأثیر زمان ماند هیدرولیکی بر بازدهی حذف COD و نیتروژن در یک سیستم ترکیبی SBR[3] و غشا توسط Xu et al. در سال ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که در سن لجن ۱۰ روز، با کاهش زمان ماند هیدرولیکی از ۲۴ به ۱۲ ساعت و در نهایت به ۶ ساعت غلظت بیومس افزایش پیدا می‌کند و حداکثر بازدهی حذف COD در زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت به میزان ۹۷ درصد گزارش شد. نتایج این محققین همچنین نشان داد که با کاهش زمان ماند هیدرولیکی از ۲۴ ساعت به ۱۲ ساعت، بازدهی

[1] Digested Sewage
[2] Anoxic-Oxic Membrane Bioreactor
[3] Sequencing Batch Reactor (SBR)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

حذف نیتروژن از ۶۸ درصد به ۸۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی که کاهش زمان ماند هیدرولیکی به ۶ ساعت، تغییری در بازدهی حذف نیتروژن به وجود نمی‌آورد (Xu et al. 2014).

با در نظر گرفتن مزایای بی‌شمار بیوراکتورهای غشایی به‌ویژه خروجی با کیفیت عالی، نسبت به سایر روش‌های تصفیه فاضلاب، به‌منظور بومی‌سازی این فناوری نوین در استان فارس و بهینه‌سازی زمان ماند هیدرولیکی این سیستم با هدف استفاده مجدد از پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شیراز، در این تحقیق تصفیه فیزیکی و بیولوژیکی فاضلاب شهری شیراز با استفاده از روش بیوراکتور غشایی مستغرق در مدت زمان طولانی ۲۶۹ روز در مقیاس پایلوت نیمه صنعتی به‌منظور الگوبرداری در مقیاس صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت. این تحقیق با اهداف زیر انجام شد:

۱- بررسی تاثیر زمان ماند هیدرولیکی در یک بازه زمانی گسترده (۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت) به‌ویژه در زمان‌های کم که قبلاً کمتر به بررسی آن پرداخته شده، بر راندمان نیتریفیکاسیون و راندمان حذف BOD_5،COD، کدرورت و مواد معلق کل (TSS).

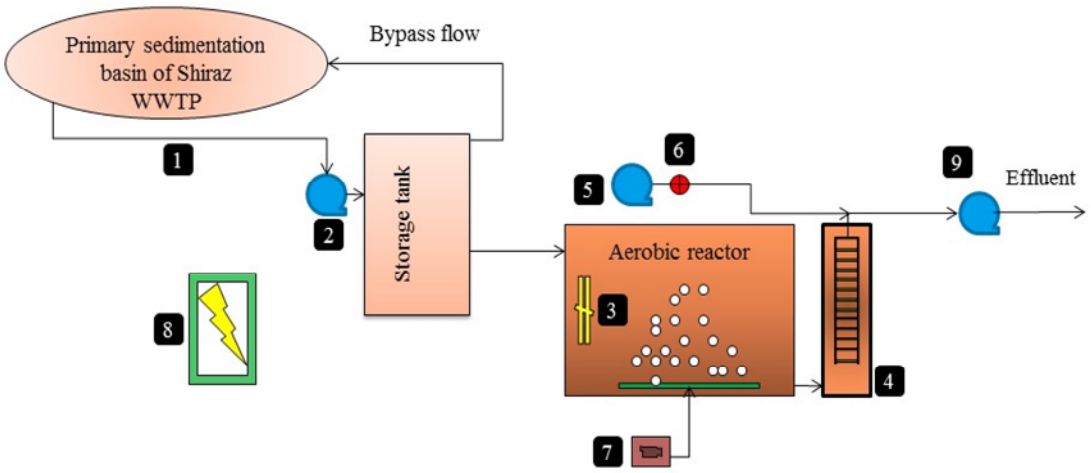
۲- تعیین اثر میزان نفوذپذیری و فلاکس عبوری از غشا در طول دوره بهره‌برداری پایلوت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت دستگاه بیوراکتور غشایی در مقیاس پایلوت میدانی

پایلوت بیوراکتور غشایی مورد نظر در این تحقیق مطابق فلوچارت شکل ۱ طراحی و ساخته شد و سپس در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شماره یک شیراز نصب شد. همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است، این پایلوت شامل یک بیوراکتور هوادهی و یک حوضچه غشایی بود که فاضلاب ورودی از حوضچه ته‌نشینی اولیه تصفیه‌خانه، توسط یک پمپ به تانک متعادل‌ساز و چربی‌گیر پایلوت وارد می‌شد و سپس به‌صورت پیوسته و ثقلی با دبی مورد نظر در هر مرحله از دوره بهره‌برداری، وارد بیوراکتور هوادهی می‌شد در بیوراکتور هوادهی از دمنده هوای دفیوزری استفاده شد تا حباب‌های هوای کافی به‌منظور اکسیداسیون مواد آلی و ترکیبات آمونیاک فراهم آورد و همچنین شرایط اختلاط کامل در راکتور ایجاد شود.

زمان برای هر سیکل فیلتراسیون و شستشوی معکوس ۱۰ دقیقه با ۹ دقیقه و ۴۲ ثانیه فیلتراسیون و ۱۸ ثانیه شستشوی معکوس طراحی و تنظیم شد. به‌منظور شستشوی معکوس از کمپرسور هوا با فشار هوای ۱۵۰ کیلوپاسکال استفاده شد تا



1: Feed, 2: Influent pump, 3: Heating element, 4: Membrane tank, 5: Air backwash pump, 6: Pressure gage, 7: Blower pump, 8: Electrical board, 9: Effluent pump

Fig. 1. Flowchart of the designed pilot-scale membrane bioreactor

شکل ۱- فلوچارت پایلوت بیوراکتورغشایی طراحی شده در این تحقیق (واحدها و تجهیزات شماره‌گذاری شده در شکل عبارتند از : ۱: ورودی از حوضچه ته‌نشینی اولیه تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شماره یک شیراز، ۲: پمپ تغذیه به تانک ذخیره‌سازی و چربی‌گیر، ۳: هیتر برقی، ۴: تانک ممبراین، ۵: کمپرسور هوا، ۶: فشار سنج، ۷: دمنده‌های هوا، ۸: تابلو برق، ۹: پمپ تخلیه).

جدول ۱- خصوصیات غشاء مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. Specifications of the membrane used

Membrane configuration	Membrane material	Pore size (µm)	Inside diameter (µm)	Outside diameter (µm)	Pressure (kpa)	pH	Temperature (°C)
Hollow fiber	Polypropylene	0.1-0.2	320-350	400-450	10-30	0-14	4-45

گرفتگی غشا به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. همچنین به‌منظور جلوگیری از افت قابل توجه فلاکس غشا در هر سیکل اختلاف فشار بهره‌برداری از غشا بر روی حدود ۳۰ کیلوپاسکال تنظیم شد. غشا مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر داخلی ۳۵۰-۳۲۰ میکرومتر با اندازه حفرات ۰/۱-۰/۲ میکرومتر بود که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- راه‌اندازی پایلوت و شرایط بهره‌برداری از پایلوت

پس از ساخت دستگاه بیوراکتور غشایی مورد نظر مطابق الگوی شکل ۱، از لجن برگشتی تصفیه‌خانه فاضلاب شماره یک شهر شیراز به‌منظور راه‌اندازی و پایداری سریع‌تر سیستم استفاده شد به طوری که حدود نصف حجم مفید بیوراکتور هوادهی با لجن به غلظت حدود $mgMLSS\ L^{-1}$ ۴۹۰۰ پر شد و سیستم با زمان ماند هوادهی ۱۲ ساعت راه‌اندازی شد که پس از مدت چند روز سیستم به حالت پایدار درآمد و طی ۸ سری از شرایط مختلف بهره‌برداری مطابق جدول ۲ به‌مدت ۲۶۹ روز مورد بهره‌برداری قرار گرفت. سن لجن مورد نظر در این تحقیق ۶۰ روز بود که بر اساس دور ریز روزانه از بیوراکتور هوادهی تنظیم شد. حجم حوضچه غشا ۱۱۰ لیتر در نظر گرفته شد. در دوره اول بهره‌برداری، دما کنترل نشد و در محدوده ۱۴ تا ۲۸ درجه سلسیوس متغیر بود، در حالی که در دوره بهره‌برداری مرحله دوم تا هشتم، دمای راکتور هوادهی توسط هیتر برقی در محدوده ۲۷ تا ۳۰ درجه سلسیوس کنترل شد. غلظت اکسیژن محلول در راکتور هوادهی در کل دوره بهره‌برداری بالای ۳ میلی‌گرم در لیتر حفظ شد.

جدول ۲- شرایط بهره‌برداری از سیستم در طول کل دوره تحقیق

Table 2. Operation conditions during the study

Run	Operation period (d)	HRT of aerobic (h)	Influent flow rate ($L\ h^{-1}$)	Aerobic volume (L)
1	38	12	19.1	230
2	17	12	19.1	230
3	41	10	23	230
4	38	8	21.1	170
5	13	6	24.6	148
6	46	4	28	112
7	43	3	33	100
8	33	2	50	100

۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش COD، BOD، نیتروژن آمونیاکی، TSS، کدورت، دما، pH، DO در این تحقیق انجام شد. تمامی این آزمایش‌ها طبق دستورالعمل استاندارد آزمایش‌ها آب و فاضلاب ویرایش ۲۱ و دستورالعمل کمپانی هچ[1] انجام گرفت (APHA. 2005; Hach Company 2005).

تواتر نمونه‌گیری برای انجام هر آزمایش در ۱۶۰ روز ابتدیی تقریباً ۴ تا ۵ بار در هفته انجام شد و از روز ۱۶۰ تا ۲۶۹ تقریباً هر هفته یک نمونه گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف BOD

در شکل ۲ عملکرد سیستم در حذف BOD_5 در طول کل دوره بهره‌برداری، در زمان ماندهای هیدرولیکی حوضچه هوادهی از ۲ تا ۱۲ ساعت نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است در کل آزمایش‌های انجام شده حداقل، حداکثر و متوسط BOD_5 ورودی به‌ترتیب برابر با ۱۵۷، ۲۴۱ و ۱۹۹ میلی‌گرم در لیتر و BOD_5 خروجی به جز در آزمایش زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت برابر با صفر بود. بنابراین در تمام دوره بهره‌برداری به جز دوره بهره‌برداری با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت، سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه ۱۰۰ درصد BOD_5 را حذف می‌کند. کاهش زمان ماند هیدرولیکی بیوراکتور هوادهی از ۱۲ ساعت به ۳ ساعت بر روی کارایی سیستم در حذف BOD_5 بی‌تأثیر بود و تنها در زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت بازدهی حذف BOD_5 به ۹۸

[1] Hach

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

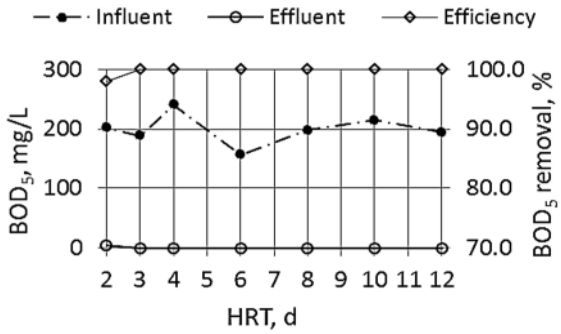


Fig. 2. System performance in BOD removal over various hydraulic retention times

شکل ۲- عملکرد سیستم در حذف BOD در زمان ماندهای هیدرولیکی مختلف

درصد کاهش یافت. کارایی بالای سیستم بیوراکتور غشایی در حذف BOD_5 را می‌توان به حذف کامل مواد معلق توسط غشا و تولید خروجی با کدورت کمتر از 1NTU ارتباط داد. همچنین با وجود غلظت بالای بیومس و سن لجن بالا در بیوراکتور غشایی (SRT=60 d)، نرخ تجزیه مواد بیولوژیکی به‌شدت بالا رفت و حتی در زمان ماند هیدرولیکی کم تمام BOD_5 موجود در ورودی سیستم توسط بیومس درون بیوراکتور حذف شد. در تحقیقات مشابه انجام شده برروی فاضلاب خانگی تفکیک‌شده شامل آب سیاه[1] (فاضلاب توالت) و آب خاکستری[2] (فاضلاب حمام و آشپزخانه) توسط بیوراکتور غشایی راندمان حذف BOD_5 به‌ترتیب ۹۵ و ۹۸ درصد به دست آمده است (Atasay et al. 2007; Merz et al. 2007).

۳-۲- بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف COD

بازدهی تخریب و حذف مواد آلی فاضلاب در پایلوت مورد مطالعه با اندازه‌گیری پارامتر COD مورد بررسی و بازبینی قرار گرفت. در شکل ۳ نمودار تغییرات COD در ورودی و خروجی سیستم مورد مطالعه، در کل ۸ مرحله راهبری پایلوت به‌مدت ۲۶۹ روز را نشان می‌دهد. در این نمودار همچنین ساعات نمونه‌گیری برروی محور عمودی سمت راست مشاهده می‌شود. مقادیر حداقل COD ورودی در ساعات ابتدایی روز بین ساعت ۷ تا ۱۰ و مقادیر حداکثر COD ورودی در حدود ساعت ۱۴ تا ۱۷ اندازه‌گیری شد. همان‌طور که بر روی نمودار مشخص است، مقادیر COD ورودی سیستم دارای نوسانات شدید است به‌طوری که در کل نمونه‌های اندازه‌گیری شده مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط COD به‌ترتیب برابر با ۴۶۸، ۱۷۰/۳ و ۲۷۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. برخلاف ورودی پایلوت، خروجی پایلوت در تمامی ۷ مرحله ابتدایی راهبری سیستم از زمان ماند هیدرولیکی ۱۲ ساعت در مرحله اول تا زمان ماند ۳ ساعت در مرحله راهبری هفتم پایدار می‌باشد و مقادیر آن پس از سازگاری در هر مرحله کمتر از ۱۵ میلی گرم در لیتر اندازه‌گیری شد. تنها در روز ۶۷ به‌علت خرابی در سیستم کنترل دمای بیوراکتور و کاهش دمای بیوراکتور از ۲۸ درجه، به ۲۰ درجه مقدار خروجی سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه به ۲۸ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا کرد.

مقادیر بازدهی حذف COD پس از پایدار شدن سیستم در هر مرحله بهره‌برداری در کل دوره مطالعه به جز زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت، بالاتر از ۹۵ درصد اندازه‌گیری شد و کاهش زمان ماند هیدرولیکی حوضچه هوادهی از ۱۲ به ۳ ساعت نه تنها بر روی عملکرد حذف COD سیستم تأثیر منفی نداشت بلکه تا حدودی نیز باعث بهبود عملکرد سیستم و کاهش زمان پایداری سیستم در شروع هر مرحله از دوره بهره‌برداری شد.

اما در دوره بهره‌برداری با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت راکتور هوادهی، مقادیر خروجی COD پایلوت از ۱۰ میلی‌گرم در لیتر به مقدار ۲۷ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا کرد و بازدهی حذف COD از ۹۶/۴ درصد به‌مقدار ۹۰/۲ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش زمان ماند هیدرولیکی از ۳ ساعت به ۲ ساعت بیش از ۵ درصد باعث کاهش بازدهی پایلوت در حذف پارامتر COD می‌شود.

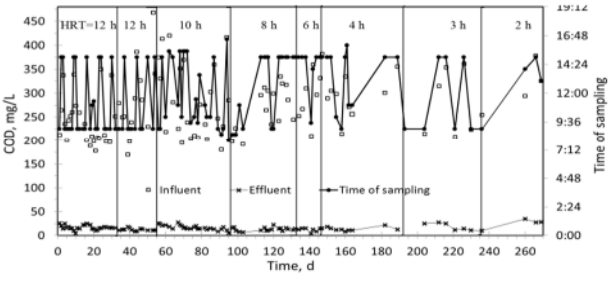


Fig. 3. COD variations at the system inlet and outlet during the whole pilot system operation

شکل ۳- تغییرات COD در ورودی و خروجی سیستم در طول دوره راهبری پایلوت

[1] Black Water
[2] Grey Water

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

حداکثر بازدهی سیستم در زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت راکتور هوادهی برابر با ۹۸/۴ درصد به‌دست آمد. اما افزایشی نسبت به سایر زمان ماندهای هیدرولیکی از ۱۲ ساعت تا ۳ ساعت مشاهده نشد. بنابراین در پایلوت بیوراکتور غشایی مورد مطالعه زمان ماند هیدرولیکی ۳ ساعت برای حوضچه هوادهی ایده‌آل به نظر می‌رسد. بازدهی حذف بین ۸۵ تا ۹۸ درصد توسط سایر محققان نیز گزارش شده است که یکی از مزیت‌های اصلی بیوراکتور غشایی محسوب می‌شود (Cao et al. 2005; Lyko et al. 2008; Chiemchaisri & Yamamoto 1994; Holler & Trosch 2001; Diyaynas & Diamdopoulos 2009).

کاهش بیش از ۹۵ درصد حذف COD در بیوراکتور غشایی مورد مطالعه در مقایسه با کاهش ۷۵ درصدی حذف COD در سیستم‌های تصفیه فاضلاب مرسوم بسیار بالا و ایده‌آل است. بازدهی بالای حذف COD در سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

۱- خروجی سیستم بیوراکتور غشایی فاقد COD معلق می‌باشد زیرا کاملاً توسط غشا گرفته می‌شود.

۲- سن لجن ۶۰ روز در سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه در مقایسه با سن لجن ۷ روز در سایر سیستم‌های لجن فعال مرسوم بسیار بالا است. در نتیجه بیومس مدت زمان بیشتری در تماس با فاضلاب است و سازگاری بهتری با آن ایجاد می‌کند. همچنین از تولید سریع بیومس و خروج سریع بیومس از سیستم جلوگیری می‌شود. در چنین شرایطی میکروارگانیسم‌های خاصی رشد خواهند نمود که قادرند ترکیبات سخت تجزیه‌پذیر را حذف نمایند (Chae et al. 2007; Gia et al. 2008; Xing et al. 2001; Naghizadeh et al. 2011; WEF., 2006; Tchobanoglous et al. 2003).

۳-۳- بررسی اثر عملکرد سیستم بر راندمان نیتریفیکاسیون در زمان ماندهای هیدرولیکی مختلف

شکل ۴ تغییرات نیتروژن آمونیاکی در ورودی و خروجی سیستم در طول کل دوره راهبری پایلوت به همراه بازدهی حذف را نشان می‌دهد. نیتروژن آمونیاکی ورودی سیستم به‌صورت ساعتی و روزانه دارای نوسانات شدیدی است به‌طوری که در کل آزمایش‌های انجام شده حداقل و حداکثر و متوسط نیتروژن آمونیاکی ورودی به سیستم به‌ترتیب برابر با ۲۵/۲، ۵۹/۲ و ۳۹/۳ $mgl^{-1}as\ N$ اندازه‌گیری شد. برخلاف ورودی سیستم، نیتروژن آمونیاکی خروجی سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه در کل دوره به‌جز بهره‌برداری با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت، پس از پایداری در هر مرحله از راهبری سیستم کمتر از ۰/۴ $mgl^{-1}as\ N$ اندازه‌گیری شد و کاملاً پایدار بود. به‌طوری که بازدهی حذف نیتروژن آمونیاکی سیستم بیش از ۹۹ درصد به‌دست آمد. در طول دوره راهبری اول تا هشتم، تنها در روز ۶۷ به‌علت خرابی در سیستم کنترل دمای بیوراکتور و کاهش دمای بیوراکتور از ۲۸ درجه به ۲۰ درجه مقدار خروجی راکتور به ۱/۵ $mgl^{-1}as\ N$ افزایش پیدا کرد.

اما در دوره بهره‌برداری با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت، راکتور هوادهی مقادیر نیتروژن آمونیاکی خروجی پایلوت از ۰/۴ $mgl^{-1}as\ N$ به ۲ $mgl^{-1}\ as\ N$ افزایش پیدا کرد و بازدهی حذف نیتروژن آمونیاکی از ۹۹ درصد به مقدار ۹۴/۹ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش زمان ماند هیدرولیکی از ۳ ساعت به ۲ ساعت بیش از ۴ درصد باعث کاهش بازدهی پایلوت در حذف نیتروژن آمونیاکی می‌شود. اگرچه کاهش زمان ماند هوادهی از ۱۲ به ۳ ساعت برروی عملکرد نیتریفیکاسیون پایلوت بی‌تأثیر می‌باشد. بنابراین در پایلوت بیوراکتور غشایی مورد مطالعه زمان ماند هیدرولیکی ۳ ساعت برای حذف نیتروژن آمونیاکی ایده‌آل به نظر می‌آید. بازدهی حذف بالای ۹۵ درصد توسط محققان زیادی گزارش شده است و به‌نظر می‌رسد که این نتایج فوق نشان می‌دهد که پتانسیل سیستم بیوراکتور غشایی در

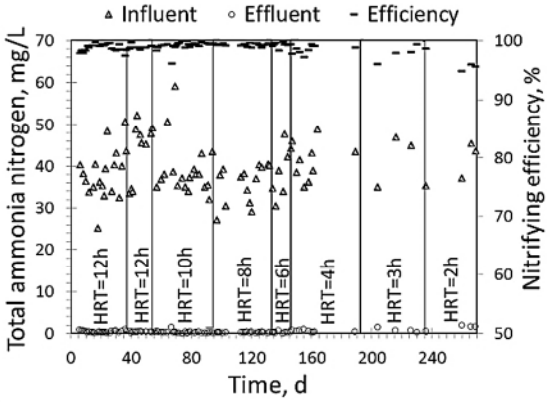


Fig. 4. Ammonia nitrogen variations at the system inlet and outlet and ammonia nitrogen removal efficiency

شکل ۴- تغییرات نیتروژن آمونیاکی در ورودی و خروجی سیستم به همراه بازدهی حذف نیتروژن آمونیاکی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

یکی از مزیت‌های اصلی بیوراکتور غشایی محسوب می‌شود (Chae et al. 2007; Gia et al. 2008; Xing et al. 2001). حذف آمونیاک کل (آمونیاک آزاد و آمونیاک یونیزه شده) خیلی بالا بود، به‌طوری که در زمان ماند هیدرولیکی ۳ تا ۱۲ ساعت راکتور هوادهی، نیتریفیکاسیون تقریباً به‌طور کامل انجام می‌گیرد. نیتریفیکایسون کامل در بیوراکتور غشایی در مقایسه با سیستم‌های لجن فعال رایج را می‌توان به موارد زیر ارتباط داد:

جداسازی لجن از خروجی سیستم توسط غشا باعث می‌شود که تمام باکتری‌های نیتریفیکاسیون بسته به میزان غلظت، داخل بیوراکتور باقی بمانند و در حضور مواد مغذی، این باکتری‌های نیتریفیکاسیون (اورتوتورف) که سرعت تولید خیلی کمی دارند به جای خروج از سیستم مجبور به باز تولید با سرعت بالا شوند که منجر به افزایش غلظت باکتری‌های نیتریفیکاسیون در بیوراکتور غشایی می‌شود. در حالی که در سایر سیستم‌های لجن فعال مرسوم، باکتری‌های نیتریفیکاسیون به ناچار، به ویژه وقتی که سن لجن خیلی کم باشد از سیستم خارج می‌شوند (Mohammed et al. 2008). بنابراین در سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه با سن لجن ۶۰ روز غلظت باکتری‌های نیتریفیکاسیون در مقایسه با سایر سیستم‌های لجن فعال رایج خیلی بیشتر می‌باشد.

نرخ تولید لجن در سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه با توجه به سن بالای لجن (۶۰ روز) خیلی کمتر از سایر سیستم‌های لجن فعال مرسوم می‌باشد بنابراین باکتری‌های نیتریفیکاسیون سازگاری نسبتاً خوبی با دیگر باکتری‌های هتروتروفیک فعال در مصرف نیتروژن آمونیاکی دارند.

۳-۴- بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان حذف کدورت و مواد معلق

در شکل ۵ نمودار تغییرات مواد معلق کل در ورودی و خروجی سیستم به همراه بازدهی حذف در طول ۶ دوره اولیه بهره‌برداری از سیستم در زمان‌های هیدرولیکی ۴ تا ۱۲ ساعت نشان داده شده است. تا قبل از روز ۸۳ که مخزن متعادل‌ساز و چربی‌گیر در ورودی سیستم قرار نداشت مواد معلق کل در ورودی سیستم در محدوده ۱۳۶ تا ۳۸۸ میلی‌گرم در لیتر تغییر کرد در حالی که پس از نصب مخزن متعادل‌ساز مواد معلق ورودی سیستم تا حدودی کاهش پیدا کرد و به مقدار ۱۲۰ تا ۲۸۴ میلی‌گرم در لیتر رسید. با استفاده از تکنولوژی غشایی در پایلوت مورد مطالعه خروجی سیستم در کل دوره تقریباً فاقد مواد معلق و همواره کمتر از ۲ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شد. در مواردی که غشا در اثر برخود با جسم سخت دچار پارگی می‌شد، مواد معلق به ۴ میلی‌گرم در لیتر افزایش پیدا می‌کرد که پس از رفع نقص و تعمیر محل پارگی مشکل برطرف می‌شد. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است تغییر زمان ماند هیدرولیکی از ۱۲ به ۴ ساعت عملا برروی عملکرد سیستم در حذف مواد معلق بی‌تأثیر است زیرا بیشترین عامل تأثیرگذار بر روی میزان مواد معلق خروجی سیستم، اندازه حفرات غشا مورد استفاده و جنس غشا (مقاومت ممبراین در برابر پارگی) است.

شکل ۶ کدروت خروجی پایلوت مورد مطالعه در ۸ دوره راهبری، از زمان ماند هیدرولیکی ۱۲ تا ۲ ساعت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، متوسط کدورت اندازه‌گیری شده در هر دوره از راهبری سیستم پس از پایدار شدن سیستم کمتر از ۰/۸ NTU است و تنها در مرحله بهره‌برداری از سیستم با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت، میزان کدورت به ۰/۹۹ NTU افزایش پیدا کرد. در تحقیق مشابه بر روی فاضلاب شهری به‌وسیله بیوراکتور غشایی با غشاهای به شکل الیاف توخالی در مقیاس آزمایشگاهی، نتایج مشابهی به‌دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان مواد معلق کل و کدورت در تمام زمان ماندهای هیدرولیکی آزمایش شده (۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت) به‌ترتیب کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر و ۰/۳ NTU به‌دست آمده است (Naghizadeh et al. 2011).

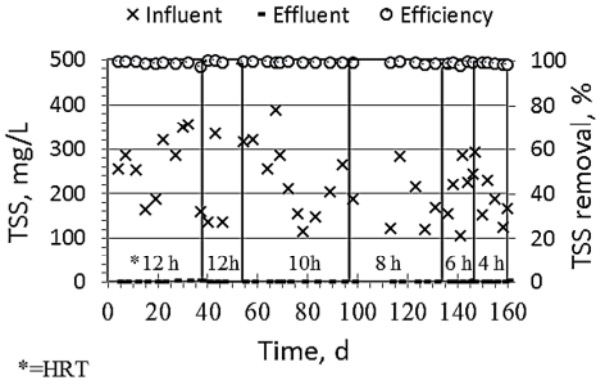


Fig. 5. TSS variations at the system inlet and outlet and TSS removal effciency

شکل۵- تغییرات مواد معلق کل در ورودی و خروجی سیستم به همراه بازدهی حذف

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

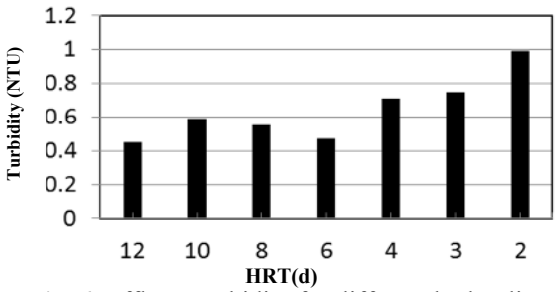


Fig. 6. Effluent turbidity for different hydraulic retention times

شکل ۶- کدورت خروجی سیستم در زمان ماندهای هیدرولیکی مختلف

دو عاملی که بر میزان کدروت خروجی سیستم بیشترین تأثیر را دارد، میزان مواد معلق موجود در خروجی سیستم و میزان تخریب و حذف کربن در بیوراکتور هوازی است. همان‌طور که قبلاً بیان شد تغییر زمان ماند هیدرولیکی حوضچه هوادهی از ۱۲ ساعت به ۳ ساعت بر روی عملکرد حذف مواد معلق و حذف COD سیستم بی‌تأثیر است، بنابراین تغییرات زمان ماند هیدرولیکی سیستم بر روی میزان کدورت خروجی سیستم نیز بی‌تأثیر است. در دوره راهبری سیستم با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت میزان کدورت خروجی سیستم به ۰/۹۹ NTU افزایش پیدا کرد. این مسئله را می‌توان به کاهش بازدهی حذف COD و افزایش بار آلی خروجی سیستم در زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت نسبت داد.

۳-۵- تعیین اثر میزان نفوذپذیری و شدت جریان عبوری از غشا در طول دوره راهبری پایلوت

شکل ۷ عملکرد غشا در طول دوره راهبری سیستم را نشان می‌دهد. قبل از شروع راهبری پایلوت مورد مطالعه با فاضلاب، غشا به‌مدت چند روز با آب شرب شهری در فلاکس $8/3\ L\ m^{-2}\ h^{-1}$ مورد آزمایش قرار گرفت. خلا نسبی مورد استفاده به‌منظور دستیابی به این فلاکس برابر با ۰/۳۰ بار اندازه‌گیری شد، به‌طوری که نفوذپذیری برابر با $27/7\ L\ m^{-2}h^{-1}\ bar^{-1}$ به‌دست آمد. در تمام مدت زمان راهبری سیستم با آب شرب شهری مقدار نفوذپذیری غشا ثابت بود. در شروع راهبری سیستم با فاضلاب، غشا سیستم در فلاکس $4/9\ L\ m^{-2}\ h^{-1}$ در خلا ۰/۱۸ بار با نفوذپذیری $27/4\ L\ m^{-2}h^{-1}\ bar^{-1}$ مورد بهره‌برداری قرار گرفت. اما به‌منظور ثابت نگه داشتن فلاکس مورد نظر خلا افزایش یافت به‌طوری که نفوذپذیری به مقدار $12/9\ L\ m^{-2}h^{-1}\ bar^{-1}$ در روز ۱۰۳ کاهش یافت. این مقدار نفوذپذیری در خلا ۰/۴۲ بار به‌دست آمد. در طول ۱۰۳ روز ابتدایی راهبری پایلوت مورد مطالعه، تمیزسازی غشا با شستشوی معکوس توسط کمپروسور هوا به‌مدت ۱۸ ثانیه به ازای هر ۱۰ دقیقه راهبری سیستم انجام گرفت. پس از ۱۰۳ روز از بهره‌برداری غشا به‌مدت چند روز سیستم غشا پایلوت از مدار خارج شد و پس از شستشوی شیمیایی غشا با استفاده از محلول هیپوکلریدسدیم به غلظت ۲۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مدت زمان ۱۸ ساعت مجدداً غشا احیا شد و با نفوذپذیری $21/8\ L\ m^{-2}h^{-1}\ bar^{-1}$ در فلاکس $5/4\ L\ m^{-2}\ h^{-1}$ مجدداً راه‌اندازی شد (WEF 2006). نهایتاً با گرفتگی تدریجی سیستم دوباره نفوذپذیری غشا کاهش یافت به‌طوری که در پایان روز ۱۶۰ به‌منظور دستیابی به فلاکس $7/2\ L\ m^{-2}\ h^{-1}$ مقدار خلا به ۰/۴۷ افزایش یافت و نفوذپذیری به $15/7\ Lm^{-2}h^{-1}\ bar^{-1}$ کاهش یافت.

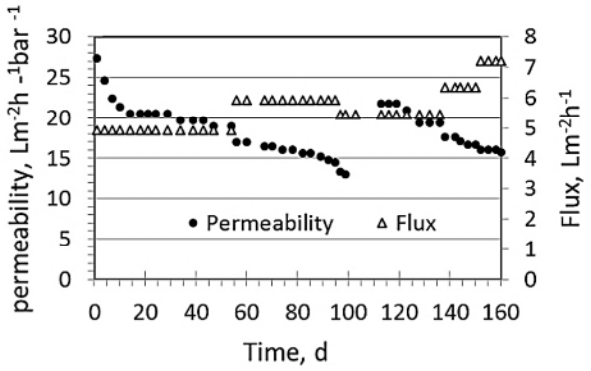


Fig. 7. Membrane performance during the first 160 days of operation

شکل۷- عملکرد غشا در طول ۱۶۰ روز ابتدایی بهره‌برداری از سیستم

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق انجام شده، ۷ زمان ماند هیدرولیکی متفاوت حوضچه هوادهی (۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰، و ۱۲ ساعت) بر روی پایلوت میدانی بیوراکتور غشایی در تصفیه فاضلاب شهری شیراز مورد آزمایش قرار گرفت و عملکرد غشا و بیوراکتور در حذف نیتروژن آمونیاکی، مواد آلی، مواد معلق و کدورت و همچنین گرفتگی غشا مورد پایش قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45876

۱- عملکرد سیستم بیوراکتورغشایی مورد مطالعه در تصفیه فاضلاب شهری شیراز در مقایسه با سایر سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری رایج خیلی بالاتر بود و تحت تأثیر زمان ماندهای هیدرولیکی۳ تا ۱۲ ساعت راکتور هوادهی نبود.

۲- بازدهی حذف COD به بیش از ۹۵ درصد رسید و در تمام دوره کاملاً پایدار و ثابت بود و تنها در دوره بهره‌برداری سیستم با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت بازدهی حذف COD به ۹۰/۲ درصد کاهش یافت.

۳- نیتریفیکاسیون با گذشت ۱۵ روز از شروع راه‌اندازی سیستم به‌طور کامل انجام شد و در کل دوره راهبری سیستم کاملاً پایدار بود و تنها در دوره بهره‌برداری سیستم با زمان ماند هیدرولیکی ۲ ساعت بازدهی حذف نیتروژن آمونیاکی به مقدار ۹۴/۹ درصد کاهش پیدا کرد.

۴- در کل دوره مطالعه کدورت خروجی سیستم کمتر از ۱ NTU مشاهده شد.

۵- مواد معلق خروجی سیستم بیوراکتور غشایی مورد مطالعه تقریباً برابر با صفر مشاهده شد.

۶- به‌وسیله شستشوی معکوس غشا توسط هوا در هر ۱۰ دقیقه به‌مدت ۱۸ ثانیه و شستشوی شیمیایی غشا در هر ۳ ماه یک بار توسط هیپوکلرید سدیم، متوسط فلاکس $5/5\ L\ m^{-2}h^{-1}$ در متوسط خلا ۰/۳ اتمسفر به‌دست آمد.

۵- قدردانی

به این وسیله از حمایت مالی و همکاری بی‌شائبه شرکت آب و فاضلاب شیراز تشکر به عمل می‌آید.

References

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF), 2005, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Washington, DC.

Atasoy, E., Murat, S., Baban, A. & Tiris, M., 2007, "Membrane bioreactor (MBR) treatment of segregated household wastewater for reuse", *Clean*, 35(5), 465-472.

Cao, J. H., Cao, B.-K., Lu, H. & Xu, Y.-Y., 2005, "Study on polypropylene hollow fiber based recirculated membrane bioreactor for treatment of municipal wastewater", *Desalination*, 183, 431-438.

Chae, S. R., Kang, S. T., Lee, S. M., Lee, E. S., Oh, S. E., Watanabe, Y. & Shin, H. S., 2007, "High reuse potential of effluent from an innovative vertical submerged membrane bioreactor treating municipal wastewater", *Desalination*, 202, 83-89.

Chiemchaisri , C. & Yamamoto, K., 1994, "Performance of membrane separation bioreactor at various temperatures for domestic wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, 87, 119-129.

Davies, W. J., Le, M. S. & Health, C. R., 1998, "Intensified activated sludge process with submerged membrane microfiltration", *Water Science and Technology*, 38 (4-5), 421-428.

Dialynas, E. & Diamadopoulos, E., 2009, "Integration of a membrane bioreactor coupled with reverse osmosis for advanced treatment of municipal wastewater", *Desalination*, 238, 302-311.

Gao, D.-W., Tao, Y. & An, R., 2012, "Digested sewage treatment using membrane-based process at different hydraulic", *Desalination*, 286, 187-192.

Hach Company, 2005, *DR5000 spectrophotometer: Procedures manual*, 2nd Ed., Germany.

Hemmati, A., Maghami Dolatabad, M., Naeimpoor, F., Pak, A. & Mohammdi, T., 2012, "Effect of hydraulic retention time and temperature on submerged membrane bioreactor (SMBR) performance", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29(3), 369-376.

Holler, S. & Trosch, W., 2001, "Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates", *Journal of Biotechnology*, 92, 95-101.

Jadhao, R. K., & Dawande, S. D., 2013, "Effect of hydraulic retention time and sludge retention time on performance of membrane bioreactor for wet season", *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2(3), 3, 1-11.

Judd, S. & Judd, C., 2006, *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*, Oxford: Elsevier.

Lyko, S., Wintgens, T., Al-Halbouni, D., Baumgarten, S., Tacke, D., Drensla, K. & Melin, T., 2008, "Long-term monitoring of a full-scale municipal membrane bioreactor—characterisation of foulants and operational performance", *Journal of Membrane Science*, 317, 78-87.

Mohammed, T. A., Birima, A. H., Noor, M. J. M. M., Muyibi, S. A. & Idris, A., 2008, "Evaluation of using membrane bioreactor for treating municipal wastewater at different operating conditions", *Desalination*, 221, 502-510.

Merz, C., Scheumann, R., Hamouri, B. E. & Kraume, M., 2007, "Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club", *Desalination*, 215, 37-43.

Naghizadeh, A., Mahvi, A. H., Mesdaghinia, A. R. & Alimohammadi, M., 2011, "Application of MBR technology in municipal wastewater treatment", *Arabian Journal of Sciences & Engineering*, 36, 3-10.

Rosenberger, S., Kruger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U. & Kraume, M., 2002, "Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater", *Water Research*, 36, 413-420.

Tchobanoglous, G. & Burton, F.L., 2003, *Wastewater engineering: Treatment and reuse*, 4th Ed., Metcalf & Eddy, McGraw-Hill, Inc., NY.

Water Environment Federation (WEF), 2006, *Membrane systems for wastewater treatment*, WEF Press McGraw-Hill, New York.

Wen, X., Ding, H., Huang, X. & Liu, R., 2004, "Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor", *Process Biochemistry*, 39, 1427-1431.

Xia, S., Guo, J. & Wang, R., 2008, "Performance of a pilot scale submerged membrane bioreactor (MBR) in treating bathing waste water", *Bioresour Technology*, 99, 6834-6843.

Xing, C.-H., Qian, Y., Wen, X.-H., Wu, W.-Z. & Sun, D., 2001, "Physical and biological characteristics of a tangential-flow MBR for municipal wastewater treatment", *Journal of Membran Science*, 191, 31-42.

Xu, S., Wub, D. & Zhiqiang Hua, Z., 2014, "Impact of hydraulic retention time on organic and nutrient removal in a membrane coupled sequencing batch reactor", *Water Research*, 55, 12-20.