

بررسی راندمان حذف بیولوژیکی مواد آلی در محیط‌های شور با استفاده از رشد دوگانه میکروارگانیسم‌ها در راکتور ناپیوسته متوالی

علیرضا تقدیسیان^۱ مصطفی تیزقدم^۲*

taghdisian90@gmail.com

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط‌زیست، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

چکیده

در طول چند دهه گذشته، روش راکتور ناپیوسته متوالی SBR^۱ به دلیل مقرون به صرفه بودن و سادگی آن به طور گسترده، روشی کارآمد و عملی برای تصفیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی استفاده شده است. در این مطالعه، راکتور ناپیوسته متوالی در مقیاس آزمایشگاهی با حجم کاری ۶/۴ لیتر به منظور بررسی اثر شوری (سدیم کلرید) در محدوده ۰-۳ درصد (گرم سدیم کلرید در لیتر فاضلاب)، برای تصفیه بیولوژیکی استفاده شده است. طی پژوهش، پارامترهای COD^۲، MLSS^۳، MLVSS^۴ و SVI^۵ اندازه‌گیری شدند. پارامترهای عملیاتی pH، اکسیژن محلول (DO^۶) و دما، به ترتیب ۷/۵-۸/۵ mg/L و ۶/۸-۱/۵ و ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. COD ورودی فاضلاب سنتزی در حدود ۶۵۰ mg/L ثابت نگه داشته شد. مدت زمان چرخه راکتور برای مراحل تزریق، واکنش، ته‌نشینی و تخلیه پساب به ترتیب ۱:۲۰:۱:۱ ساعت بود. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نمک تا ۳ درصد سدیم کلرید، راندمان حذف مواد آلی از ۹۴/۲۲ درصد به ۸۲/۳۶ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، ۳۷ MLSS درصد افزایش یافت، در حالی که MLVSS تقریباً ثابت ماند و SVI ۴۹ درصد افت پیدا کرد. همچنین به نظر می‌رسد رشد معلق و چسبیده میکروارگانیسم‌ها به طور هم‌زمان و افزایش تدریجی شوری فاضلاب، به غلظت بیشتر بیومس و در نهایت افزایش راندمان حذف مواد آلی می‌انجامد.

کلیدواژه

بیوفیلیم، راکتور ناپیوسته متوالی، رشد هیبرید، فرایند بیولوژیکی، فاضلاب شور

۱. مقدمه

(2018). علاوه بر این، نفوذ شوری ناشی از آب دریا به آب زیرزمینی در نواحی ساحلی منبع دیگری برای افزایش جامدات محلول در فاضلاب‌ها هستند (Moussa et al., 2006). در نتیجه، ورود فاضلاب‌های شور و فوق شور به تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب به میزان چشمگیری افزایش یافته و بیش از ۵ درصد مقدار کل ورودی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را به خود اختصاص داده است (Lefebvre et al., 2007).

طبقه‌بندی فاضلاب به فاضلاب‌های شور و فوق شور بر اساس مقدار کل جامدات حل شده موجود در فاضلاب

رشد جمعیت در جهان به پیشرفت و توسعه صنایع (مانند صنایع تولید غذاهای دریایی، کاغذسازی، فرآورده‌های دارویی و پالایشگاه‌های نفت و گاز) انجامیده است. نتیجه استفاده از حجم زیاد نمک‌های معدنی (عمدتاً سدیم کلرید) در صنایع مختلف، افزایش قابل توجه شوری در پساب خروجی از آن‌ها است. از طرف دیگر، کمبود آب و استفاده مستقیم از آب دریا در بسیاری از مناطق، به ویژه در شهرهای ساحلی به تخلیه مقدار زیادی از فاضلاب‌های شور به شبکه فاضلاب منجر شده است (Chen et al.,

تدریجی نمک به سیستم برای سازگار شدن باکتری و افزودن میکروارگانیزم‌های مقاوم به نمک و هالوفیل به فرایند لجن فعال متداول است (Rene et al., 2008; Kulkarni, 2013; Figueroa et al., 2008). راکتور ناپیوسته متوالی هیبرید سیستمی پیشرفته از راکتور ناپیوسته متوالی بوده که در آن دو نوع رشد باکتریایی، یعنی رشد معلق و چسبیده (بیوفیلم) به‌طور هم‌زمان در یک بیوراکتور صورت می‌گیرد (Mielcarek et al., 2015). سیستم راکتورهای ناپیوسته متوالی هیبرید دارای مزایایی از جمله توانایی رشد انواع مختلف باکتری‌ها، مقاومت بهتر به آثار بازدارنده مانند شوری، حفظ بهتر بیومس و حجم پایین‌تر راکتور نسبت به روش راکتور ناپیوسته متوالی مرسوم است (Wang et al., 2016; Yusoff et al., 2016). حامل‌های بیومس به‌عنوان بستری برای رشد چسبیده عمل می‌کنند. این حامل‌ها دارای سطح ویژه بالا و چگالی کمتر نسبت به مایع فاضلاب هستند (Arnaiz et al., 2007). ساختار غیریکنواخت بیوفیلم و مقادیر مختلف اکسیژن درون لایه‌های آن‌ها امکان رشد باکتری‌های مختلف را فراهم می‌آورد. برای مثال، در لایه‌های عمیق‌تر بیوفیلم، شرایط بی‌هوازی موجود است که برای رشد باکتری‌های دنیتریفایر مطلوب است (She et al., 2016). در چنین سیستمی، حذف مواد آلی می‌تواند به واسطه ساختار ساده، انعطاف‌پذیر و پایدار بیوفیلم بهبود یابد (Xia et al., 2008).

اگرچه دو رشد میکروبی ذکر شده در بالا در یک راکتور رخ می‌دهد، اما این دو نوع رشد در حذف مواد آلی از فاضلاب به شکل بسیار متفاوتی عمل می‌کنند. ساختار و نوع جمعیت باکتری موجود در لجن معلق و بیوفیلم چسبیده در شوری‌های مختلف تغییر می‌کند (Wang et al., 2016).

مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد رشد چسبیده می‌تواند عملکرد تصفیه فاضلاب شور را بهبود بخشد (Wang et al., 2016). مقدار مواد پلیمری خارج سلولی (EPS^A) در

است (Shi et al., 2012). از آنجا که سدیم کلرید دارای بیشترین تأثیر در تعیین شوری است، در اکثر مطالعات، شوری فاضلاب بر اساس مقدار سدیم کلرید (درصد وزنی) حل شده در فاضلاب اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی، دو راه حل برای تصفیه فاضلاب‌های شور وجود دارد: ۱. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مانند جذب، سیستم غشایی، تبادل یونی، الکترودیالیز و غیره که این روش‌ها دارای معایبی مانند هزینه‌های بالا، شرایط ویژه برای به کار بردن آنها و آلودگی ثانویه هستند. ۲. روش‌های بیولوژیکی که مقرون به‌صرفه، ساده و انعطاف‌پذیر بوده و راندمان بالایی نیز دارند (Neilly et al., 2009; Fan et al., 2011; Dinçer & Kargi, 2000). سیستم‌های بیولوژیکی می‌توانند به دو دسته اصلی تقسیم شوند: ۱. پیوسته و ۲. ناپیوسته. در مقایسه با سیستم پیوسته، روش‌های ناپیوسته مانند راکتور ناپیوسته متوالی (SBR) دارای راندمان حذف بهتر و انعطاف‌پذیری بیشتر در فرایند هستند. همچنین، استفاده از یک مخزن برای کل فرایند، باعث کاهش آثار جانبی کل سیستم بر محیط‌زیست می‌شود (Tzahi, Y. & Cath et al., 2016).

اگرچه فرایندهای تصفیه بیولوژیکی مزایایی دارند، اما برخی عوامل بازدارنده نیز وجود دارند که باعث کاهش عملکرد این روش‌ها می‌شود. شوری، عمدتاً سدیم کلرید یکی از مهم‌ترین این عوامل است. غلظت‌های بالای شوری در فاضلاب باعث بروز شوک به میکروارگانیزم‌ها، کاهش فعالیت آنزیم‌های سلولی شده و در نهایت پلاسمولیز سلول‌ها شود (Uygun, 2006; He et al., 2017). علاوه بر آثار مضر شوری بر میکروارگانیزم‌ها، شوری به بروز تغییرات فیزیکی و بیولوژیکی در لجن معلق و بیوفیلم از جمله رسوب و لخته‌سازی بیولوژیکی می‌انجامد (Chen et al., 2018).

روش‌هایی وجود دارد که می‌تواند تأثیرات مخرب شوری بر فعالیت میکروارگانیزم‌ها را به حداقل برساند مانند استفاده از رشد ترکیبی (چسبیده و معلق)، افزایش

هم‌چنین در تحقیق دیگری از سیستم متعارف رآکتور ناپیوسته متوالی به‌منظور تصفیه فاضلاب شور استفاده و دیده شد که هنگامی که شوری از صفر به ۲ درصد افزایش می‌یابد، سرعت حذف مواد آلی از ۹۵ درصد به ۵۶ درصد کاهش پیدا می‌کند (Chen et al., 2018).

اهداف اصلی این مطالعه، بررسی آثار شوری (صفر تا ۳۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر) بر عملکرد سیستم راکتورهای ناپیوسته متوالی هیبرید است. بنابراین، $MLSS$ ، COD ، SVI ، $MLVSS$ و سرعت ته‌نشینی برای بررسی آثار نامطلوب شوری بر عملکرد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها، جمعیت میکروبی اندازه‌گیری شد.

۲. مواد و روش‌ها

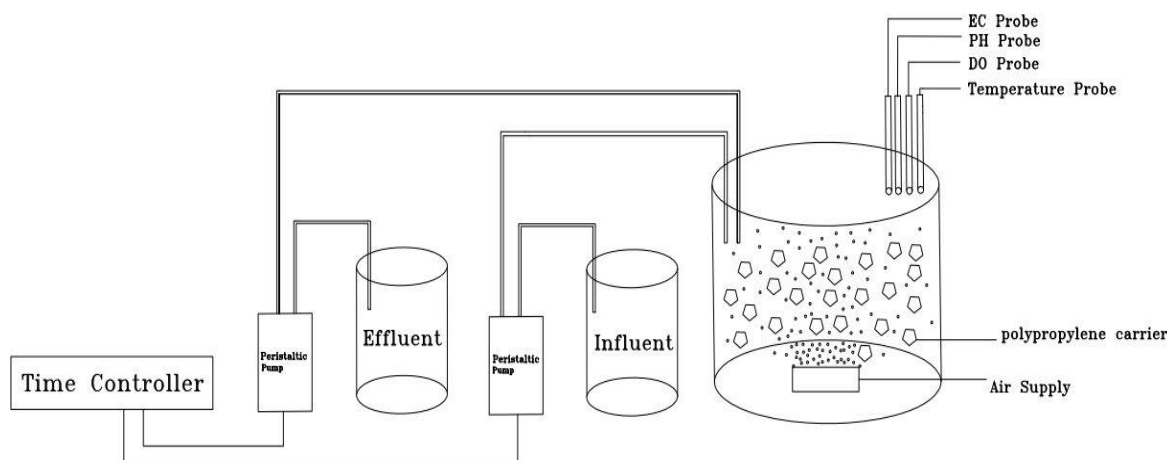
۱.۲. راه‌اندازی رآکتور

یک سیستم راکتورهای ناپیوسته متوالی هیبرید ساخته شده از پلکسی گلاس در مقیاس آزمایشگاهی با سطح مقطع دایره‌ای برای این مطالعه استفاده شد (شکل ۱). رآکتور دارای حجم کاری ۶/۴ لیتر با ابعاد ۱۸ سانتی‌متر قطر و ۳۰ سانتی‌متر ارتفاع است. حامل‌های پلی‌اتیلن با متوسط سطح ویژه $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ و چگالی $95 \text{ kg}/\text{m}^3$ به‌عنوان محیطی برای رشد چسبیده بیوفیلم استفاده شد. دو پمپ پریستالتیک یکسان و سه تایمر آنالوگ ساعتی مشابه برای کنترل ورود و خروج فاضلاب استفاده شد. رآکتور دارای چرخه ۲۴ ساعته شامل ۱ ساعت تزریق فاضلاب ورودی، ۲۰ ساعت زمان واکنش (هوادهی)، ۱ ساعت زمان ته‌نشینی و ۱ ساعت تخلیه است. لجن فعال از تصفیه‌خانه فاضلاب دانشگاه شهید بهشتی واقع در شمال تهران جمع‌آوری شده است. نخست کار $MLSS$ لجن فعال $3250 \text{ mg}/\text{L}$ بوده است. غلظت اکسیژن محلول، pH و دما در سیستم به ترتیب بین $6/6 - 6/8$ ، $7/2 - 8$ و $18 - 26$ درجه سانتی‌گراد در سراسر دوره مطالعه حفظ شد.

بیوفیلم نسبت به لجن معلق بالاتر است. مواد پلیمری خارج سلولی مهم‌ترین ساختار بیوفیلم بوده که به سطح میکروارگانیسم‌ها چسبیده و سپری محافظتی را تشکیل می‌دهند. در نتیجه، بیوفیلم، مقاومت بیشتری به محیط شور نسبت به لجن معلق دارد (Wang et al., 2016). در تحقیق دیگری، محققان آثار شوری‌های مختلف را بر راندمان حذف نیتروژن در سیستم راکتورهای ناپیوسته متوالی هیبرید بررسی کردند و نشان دادند که سیستم هیبرید در ۹/۸ گرم سدیم کلرید در لیتر دارای ۱۰ درصد راندمان بالاتر نسبت به سیستم متعارف رآکتور ناپیوسته متوالی است (She et al., 2016). در بررسی عملکرد دو سیستم رآکتور ناپیوسته متوالی، یکی با رشد معلق و دیگری با رشد هیبرید مشخص شد، سیستمی که به‌طور هم‌زمان از رشد معلق و چسبیده بهره‌برده است دارای ۱۸ درصد راندمان حذف بهتر COD بوده است (Yusoff et al., 2016).

مقدار پایین شوری ممکن است راندمان حذف مواد آلی را افزایش دهد. بررسی‌ها نشان داد راندمان حذف مواد آلی در شوری پایین به دلیل اثر تحریک‌کننده شوری بر عملکرد باکتری‌ها بهبود می‌یابد (Uygur, 2006). همچنین دیده شد، بهترین عملکرد باکتری‌های مقاوم به نمک در شوری ۱ درصد است (Shi et al., 2012).

افزایش شدید شوری، آثار چشمگیری بر عملکرد بیولوژیکی باکتری‌ها دارد. محققان پی بردند که در سیستم رآکتور ناپیوسته متوالی، هنگامی که شوری از صفر به ۶ درصد افزایش می‌یابد، راندمان حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی به‌طور قابل توجهی به ترتیب از ۹۶ درصد به ۳۲ درصد کاهش پیدا می‌کند (Uygur and Kargi, 2004). برخی دیگر نشان دادند که با افزایش شوری از صفر به ۸ درصد، راندمان حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۹۵ درصد به ۳۵ درصد کاهش می‌یابد (Wang et al., 2016).



شکل ۱. نمودار شماتیک از سیستم راکتورهای ناپیوسته متوالی هیبرید

هر چرخه، راکتور با ۳ لیتر فاضلاب تازه تغذیه شده و در انتها ۳ لیتر فاضلاب تصفیه شده خارج شده است. سن لجن در حدود ۲۰ روز بوده که به وسیله مقدار لجن اضافی خارج شده از راکتور در هر دوره ۲۴ ساعته و مقدار بیومس در پساب خروجی ثابت نگه داشته شد.

برای حدود دو ماه، برای تشکیل بیومس چسبیده (بیوفیلم) روی حامل‌های معلق پلی‌پروپیلن، سیستم با غلظت نمک صفر درصد راهبری شد. سپس مقدار غلظت نمک ورودی به ۰/۵ درصد سدیم کلرید برای حدود دو هفته افزایش داده شد. این مرحله با افزایش شوری به صورت پله‌ای به ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرم ادامه یافت. افزایش شوری در هر مرحله با رسیدن به شرایط پایدار در COD و MLSS انجام شد. زمان مورد نیاز برای رسیدن به شرایط حالت پایدار در غلظت‌های مختلف شوری متفاوت بوده است. نمونه‌های فاضلاب ورودی، پساب خروجی و لجن به‌طور مکرر حداقل سه بار در هفته به‌منظور آنالیز پارامترهای COD، MLSS، MLVSS و SVI از راکتور برداشت شد.

۴.۲ روش‌های اندازه‌گیری

پارامترهای COD، MLSS، MLVSS و SVI با استفاده از استاندارد APHA تعیین شد. اسپکتوفوتومتر DR1900

۲.۲ فاضلاب سنتزی

این مطالعه با استفاده از فاضلاب سنتزی انجام شد. ملاس به‌عنوان تنها سوبسترا با غلظت ثابت $750 \pm 10 \text{ mg/L}$ استفاده شد که این غلظت ملاس COD در حدود 650 mg/L تولید کرده است. علاوه بر ملاس چغندر قند، دیگر عناصر مورد نیاز برای تهیه فاضلاب سنتزی ورودی شامل فاضلاب سنتزی شامل KH_2PO_4 و NH_4Cl و سدیم کلرید و دیگر عناصر ضروری برای رشد میکروارگانیسم‌ها به فاضلاب سنتزی اضافه شد (She et al., 2016). نسبت‌های COD/N/P فاضلاب سنتزی برابر با ۱۰۰/۶/۲ بوده است. مقدار ۰-۳۰ گرم سدیم کلرید به‌عنوان منبع شوری به فاضلاب سنتزی در طول آزمایش به صورت پله‌ای اضافه شد. به دلیل آثار ناچیز دیگر مواد معدنی در شوری فاضلاب، مقدار سدیم کلرید ذکر شده در بالا به‌عنوان شوری کل فاضلاب در نظر گرفته شد (Zhou et al., 2012).

۳.۲ روش آزمایش

در شروع آزمایش لجن فعال که از مخزن هوادهی تصفیه‌خانه فاضلاب شهید بهشتی برداشت شده بود، به مخزن اصلی راکتور اضافه شد. لجن فعال اولیه دارای خصوصیات فیزیکی از جمله $\text{MLSS}=3250 \text{ mg/L}$ ، $\text{MLVSS}=2760 \text{ mg/L}$ و $\text{SVI}=156 \text{ mL/g}$ بوده است. در

باکتری‌ها در سطح شوری پایین (کمتر از ۱۰ گرم بر لیتر) قابل تحمل است (Chen et al., 2018). محققان دیگری عملکرد SBBR تحت شرایط شور را ارزیابی کردند و پی بردند که افزایش شوری (تا ۴/۲ گرم سدیم کلرید بر لیتر) باعث افزایش توانایی نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون می‌شود (She et al., 2016). حداکثر راندمان حذف COD در غلظت ۴ گرم بر لیتر سدیم کلرید رخ می‌دهد. این بهبود عملکرد می‌تواند ناشی از سازگاری جمعیت بیولوژیکی به محیط‌های شور باشد که به راندمان بالاتر حذف آلودگی‌ها در سیستم بیولوژیکی می‌انجامد (Amin et al., 2014).

در ادامه، غلظت سدیم کلرید ورودی به ۱۰ گرم بر لیتر افزایش یافت. در انتهای این دوره و بعد از حدود ۱۲ روز تا رسیدن به شرایط حالت پایدار، راندمان حذف COD در سیستم به ۹۱ درصد رسید. به منظور تعیین شرایط حالت پایدار در هر سطح از شوری، عملکرد راکتور از نظر COD و MLSS اندازه‌گیری شد. با افزایش سدیم کلرید به صورت مرحله به مرحله تا ۲۰ و ۳۰ گرم بر لیتر، راندمان حذف COD به ترتیب به ۸۷/۰۱ و ۸۲/۳۶ درصد افت پیدا کرد. شکل ۳ مقادیر راندمان حذف COD در غلظت شوری‌های مختلف را نشان می‌دهد.

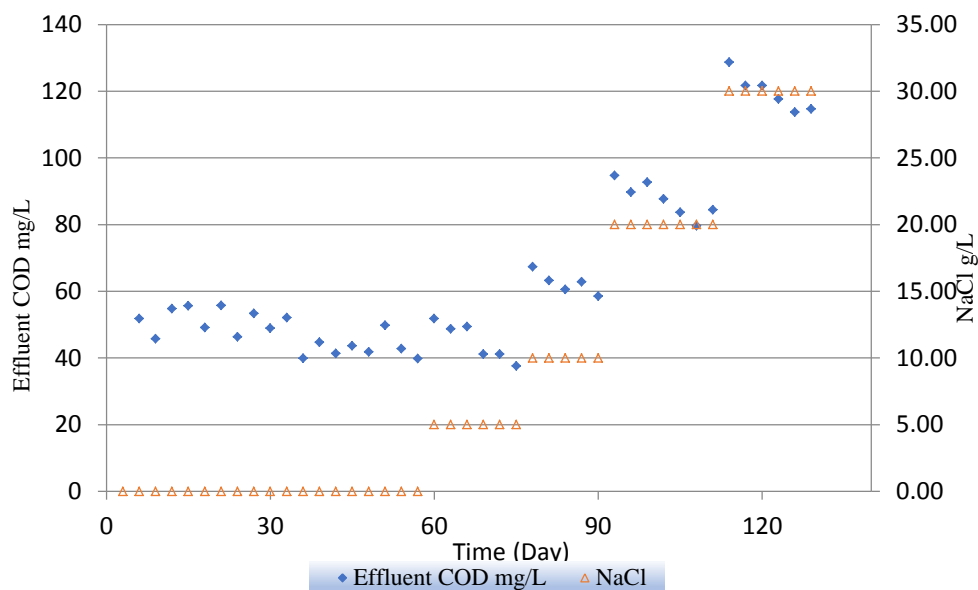
در بیش‌ترین غلظت شوری ۳۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر، بعد از حدود ۲ هفته تا رسیدن به شرایط حالت پایدار، در مقایسه با بالاترین راندمان در ۵ گرم سدیم کلرید بر لیتر، راندمان حذف COD ۱۲/۵۸ درصد کاهش پیدا کرد. غلظت نسبتاً بالای نمک باعث کاهش فعالیت‌های سلولی، از دست رفتن آب سلولی (دی‌هیدراسیون)، پلاسمولیز و در نهایت از بین رفتن فعالیت بسیاری از آنزیم‌های فعال در تصفیه بیولوژیکی می‌شود. با این‌حال، در این مطالعه مشاهده شد که سیستم HSBR عملکرد قابل قبولی را از نظر حذف مواد آلی در مقایسه با سیستم متعارف SBR حتی در شوری ۳ درصد (۳۰ گرم سدیم کلرید در لیتر) از خود نشان می‌دهد.

ساخت شرکت HACH آمریکا برای اندازه‌گیری COD استفاده شد. مقادیر بالای یون کلر به بروز خطای قابل توجه در تعیین مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی می‌انجامد. بنابراین، در این مطالعه روش اصلاحی استاندارد استفاده شد و مقدار کافی سولفات جیوه قبل از آزمایش به نمونه اضافه شد. پارامترهای عملیاتی DO، pH، دما و هدایت الکتریکی^۷ توسط دستگاه مالتی متر دیجیتال SensoDirect ساخت آلمان اندازه‌گیری شد.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۳. راندمان حذف COD

شکل ۲ مقادیر COD خروجی راکتور HSBR طی کل دوره آزمایش در سطوح مختلف شوری را نشان می‌دهد. به منظور تشکیل بیوفیلم روی حامل‌های معلق و رسیدن به شرایط حالت پایدار، فاضلاب ورودی با غلظت نمک صفر درصد برای حدود ۶۰ روز به سیستم تزریق شد. در انتهای این دوره، بهبود جزئی در راندمان حذف مواد آلی مشاهده شد و به ۹۳/۵۸ درصد رسید. در ادامه این دوره، شوری فاضلاب ورودی به ۵ گرم سدیم کلرید بر لیتر و به مدت حدود ۱۵ روز تا رسیدن به شرایط حالت پایدار افزایش داده شد. در نتیجه این افزایش، راندمان حذف COD به ۹۴/۲۲ درصد رسید که بالاترین نرخ حذف مشاهده شده در این مطالعه است. دلیل این بهبود اندک در راندمان حذف، اثر تحریک‌کنندگی نمک بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مقدار پایین نمک (زیر ۱۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر) به نفع رشد و تکثیر باکتری‌ها بوده که این موضوع با یافته‌های مطالعات دیگر نیز سازگار است. در تحقیق در سال ۲۰۱۰ اثر نمک بر عملکرد سیستم SBBR را مطالعه کرده و نشان دادند که حداکثر نرخ حذف مواد آلی هنگامی است که غلظت نمک ادرصد (۱۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر) باشد (Zhang et al., 2010). در مقاله دیگری در سال ۲۰۱۸ اثر نمک بر سیستم SBR را بررسی کرده و نشان دادند که تأثیر شوری بر



شکل ۳. مقادیر COD خروجی بر حسب mg/L در غلظت شوری‌های مختلف

موضوع ممکن است در نتیجه گوناگونی در فرایند تصفیه بیولوژیکی و نوع میکروارگانیسم‌ها فعال در بیومس باشد. علاوه بر این، ساختار سه بعدی ویژه بیوفیلم و قابلیت رشد و تکثیر بسیاری از انواع باکتری‌ها تأثیر بسزایی در افزایش راندمان این سیستم داشته است. رشد چسبیده میکروارگانیسم‌ها دارای مزایای بسیاری نسبت به رشد معلق است. نخست این که، این روش با توجه به دوگانه بودن بستر رشد و تفاوت در مقادیر اکسیژن محلول در لایه‌های مختلف بیوفیلم، می‌تواند بستری برای رشد انواع باکتری‌های را مهیا کند که باعث افزایش غلظت بالای بیومس فعال می‌شود (Yusoff et al., 2016). دوم این که، ساختار منحصر به فرد بیوفیلم می‌تواند سطح تماس و درگیری سوبسترا با میکروارگانیسم‌ها را به واسطه افزایش محل‌های واکنش (site reaction) بهبود بخشد. سوم این که، همان‌طور که در مقاله‌های دیگر بیان شده است، برخی مواد مانند مولکول‌های پلیمری آلی (EPS) که توسط میکروارگانیسم‌ها ترشح می‌شود، می‌تواند به عنوان مکانیزمی دفاعی در محیط‌های شور عمل کند. این مواد به آسانی در بیوفیلم رشد کرده و بنابراین باعث افزایش راندمان می‌شود (Wang et al., 2016, She et al., 2016).

در پژوهشی محققان از دو سیستم مشابه SBR، یکی با رشد چسبیده و معلق به نام رآکتور HSBR و دیگری سیستم SBR با رشد معلق استفاده کردند. دیده شد سیستم دارای رشد هم‌زمان تا ۱۸ درصد راندمان بالاتر داشته است (Yusoff et al., 2016). در مقاله دیگری از سیستم رآکتور HSBR برای بررسی حذف مواد آلی در محیط شور و بسیار شور استفاده و دیده شد با افزایش شوری از ۰-۷۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر، نرخ حذف COD به صورت معناداری از ۹۶ درصد به ۴۲ درصد کاهش می‌یابد (Wang et al., 2016). در مقاله دیگری از سیستم SBR برای بررسی شوری بر عملکرد تصفیه بیولوژیکی استفاده و مشاهده شد که با افزایش شوری از ۰-۲۰ گرم سدیم کلرید، راندمان حذف COD به ترتیب از ۹۵ درصد به ۵۷ درصد کاهش پیدا می‌کند (Chen et al., 2018). در تحقیق دیگری که از سیستم SBR برای بررسی حذف مواد آلی در محیط شور استفاده شد، با افزایش شوری از ۰ تا ۶ درصد، راندمان حذف COD به‌طور چشمگیری از ۹۶ به ۳۲ درصد کاهش یافت (Uygun and Kargi, 2004).

نتایج این مطالعه نشان داد که راندمان حذف مواد آلی کمتر تحت تأثیر افزایش غلظت شوری قرار گرفت. این

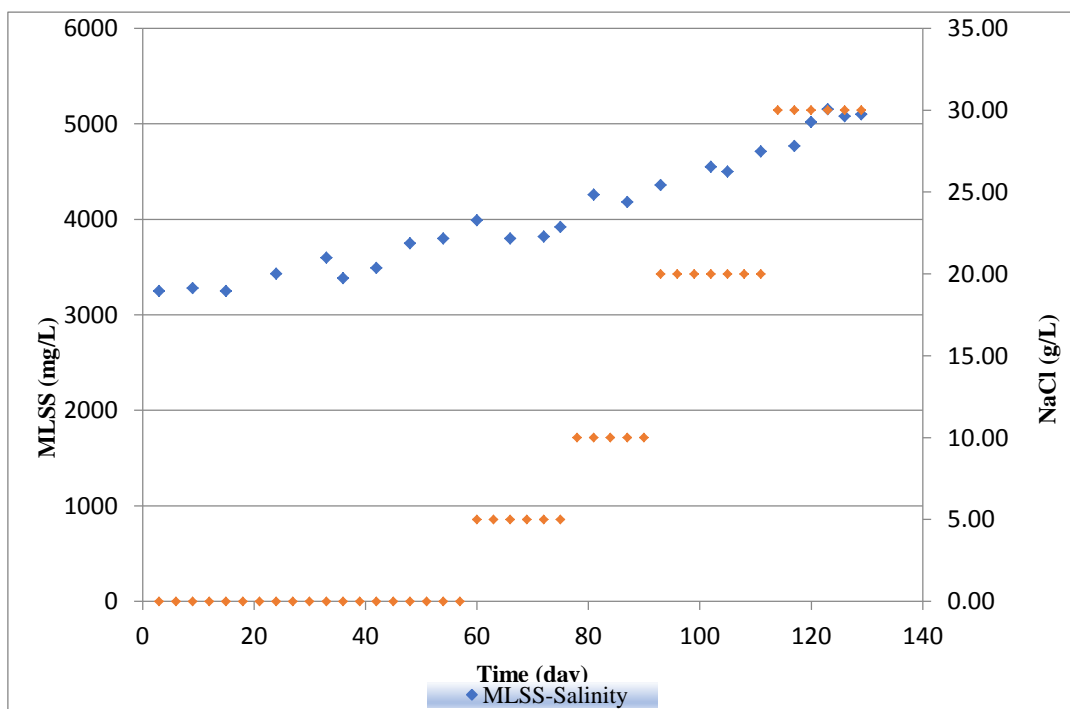
بیوفیلم به عنوان بستر محرک رشد گونه‌های مختلف باعث تسریع رشد بیشتر و بهتر میکروارگانیسم‌ها می‌شود (Wang et al., 2016).

در نتیجه، مقدار کل مواد آلی (MLSS) با افزایش شوری افزایش پیدا می‌کند. در تحقیقی روی تأثیر شوری در عملکرد سیستم SBR با استفاده از رشد دوگانه، محققان افزایش ۵۲ درصد MLSS در راکتور SBR با رشد دوگانه را مشاهده کردند. آن‌ها توضیح دادند که وجود بیوفیلم و لجن معلق می‌تواند رشد و تکثیر باکتری‌ها را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش MLSS شود (Yusoff et al., 2016). در مطالعه دیگری محققان از روش بیولوژیکی با استفاده از هوادهی منقطع همراه با رشد معلق برای تصفیه فاضلاب‌های شور استفاده کردند و پی بردند که مقدار کل جامدات معلق با افزایش شوری افزایش پیدا می‌کند و بیان کردند که تبدیل جامدات محلول به جامدات معلق در نتیجه رسوب بیولوژیکی در محیط‌های دارای نمک بالا می‌تواند باعث افزایش MLSS شود (Alipour et al., 2017).

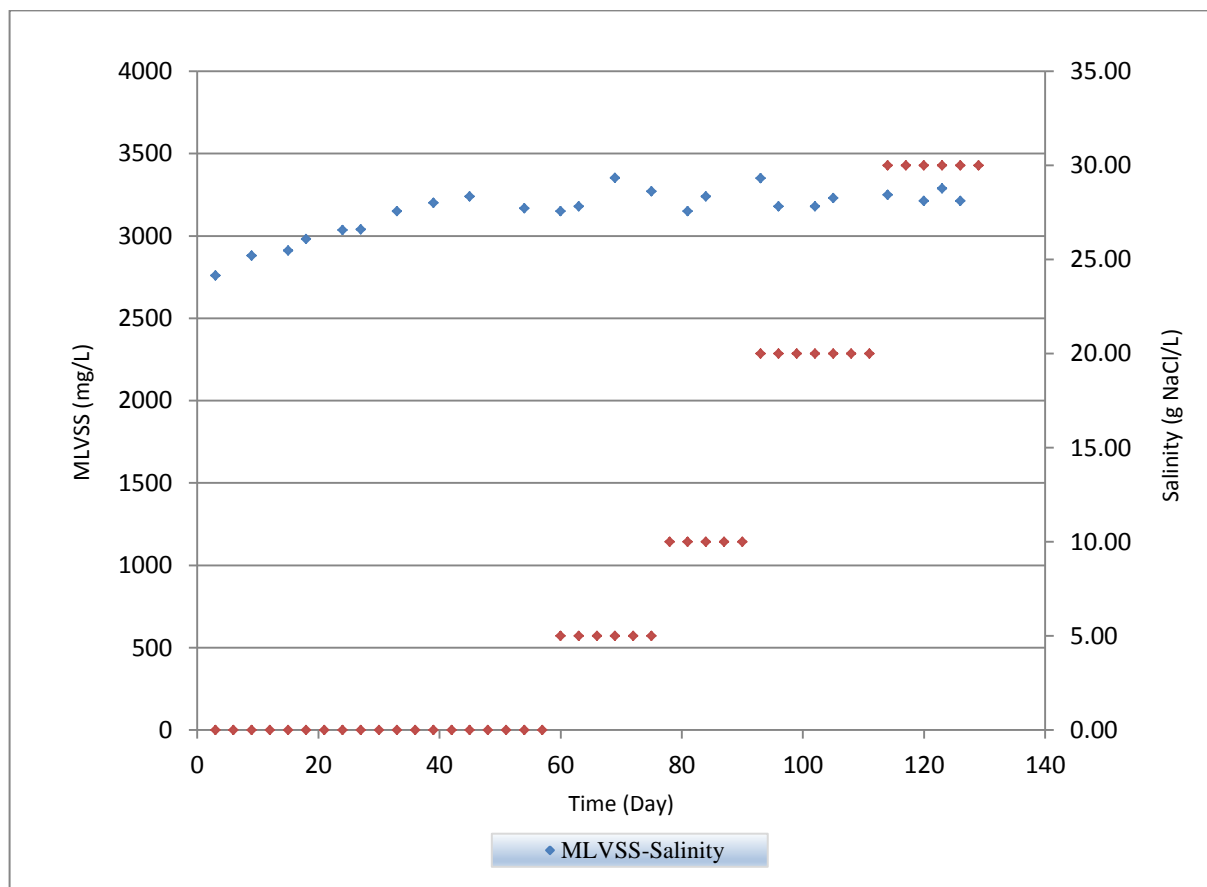
۲.۳. تغییرات MLSS و MLVSS

در این مطالعه، MLSS و MLVSS به منظور نشان دادن مقدار میکروپ‌های فعال و غیرفعال که در بیوراکتور وجود دارند، اندازه‌گیری شد. مقادیر MLSS با افزایش شوری تا قبل از ۲۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر، با شیب کم‌تری افزایش می‌یابد در حالی که در شوری ۲ و ۳ درصد شیب افزایش MLSS بیشتر می‌شود (شکل ۴). با افزایش بیشتر شوری تا ۳۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر، محتوای MLSS به بالاترین سطح خود تا ۵۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد که این بدین معنی است که MLSS حدود ۳۷ درصد افزایش داشته است.

وزن کل بیومس شامل سلول‌های میکروپ‌های زنده، سلول‌های مرده و دیگر مواد آلی است (Frølund et al., 1996). با افزایش شوری، رشد انواع مختلفی از گونه‌ها متوقف می‌شود و در نتیجه، تعداد وزن سلول‌های مرده با سرعت بالا می‌رود. از طرف دیگر، با افزایش شوری میکروارگانیسم‌های مقاوم به شوری و هالوفیل‌ها شانس بیشتری برای رشد و تکثیر پیدا می‌کنند. همچنین وجود



شکل ۴. تغییرات MLSS در طول کل دوره راهبری راکتور بر حسب mg/L



شکل ۵. مقادیر MLVSS بر حسب mg/L در کل دوران آزمایش در غلظت‌های مختلف شوری

حدود ۸۰ درصد افزایش می‌یابد، متفاوت است (Yusoff et al., 2016). اگرچه در مطالعه دیگری محققان به نتایج مشابهی در مقایسه با این مطالعه دست یافتند (Moussa et al., 2006). آن‌ها پی بردند که مقدار MLVSS مستقل از غلظت نمک بوده و در غلظت‌های مختلف نمک مقدار این پارامتر بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین، پژوهشگران در مقاله دیگری بیان کردند که غلظت بالای نمک به کاهش بعضی فعالیت‌های سلولی می‌انجامد، اما مقدار بیومس فعال بدون تغییر باقی می‌ماند (Dincer & Kargi, 2001). مطالعات بسیاری در این زمینه نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نمک، تنوع زیستی لجن فعال تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند (Lefebvre et al., 2006; Wang, 2008; Snaidr et al., 1997). اگرچه تعداد برخی از میکروارگانیسم‌های مقاوم به شوری در سطوح شوری مختلف در لجن فعال افزایش می‌یابد. بنابراین، در

مقادیر MLVSS در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که غلظت جامدات معلق فرار تا ۳۲۴۰ میلی‌گرم بر لیتر در مرحله دوم شوری متناسب با ۵ گرم سدیم کلرید بر لیتر، افزایش یافته و بعد از آن با افزایش شوری روند نسبتاً ثابتی داشته است. صرف‌نظر از جرم کل میکروب‌ها که متشکل از سلول‌های زنده و مرده است، مقدار سلول‌های زنده و فعال یا MLVSS ثابت باقی می‌ماند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برخی میکروارگانیسم‌های مقاوم به شوری که در شرایط با شوری پایین جزو گونه‌های کمیاب‌تر بودند، با افزایش شوری می‌توانند رشد کرده و در محیط‌های با شوری بالا رشد و تکثیر یابند و در نتیجه آن مقدار بیومس زنده بدون تغییر باقی می‌ماند. این نتایج با نتایج تحقیق دیگری در این زمینه که نشان دادند با افزایش شوری در سیستم SBR مقدار MLVSS تا

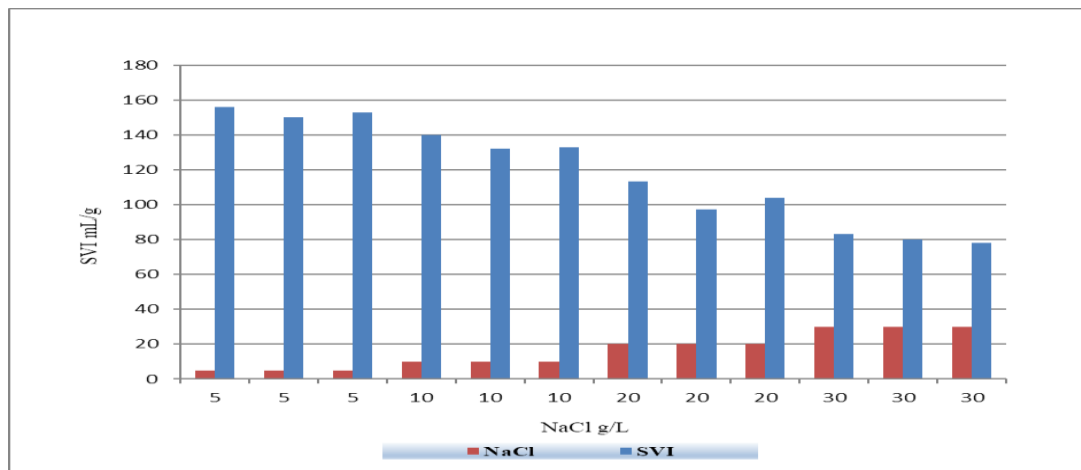
شاخص حجمی لجن از ۱۵۶ به ۷۸ میلی لیتر بر گرم کاهش یافته و این نتیجه نشان دهنده افزایش سرعت ته نشینی لجن با افزایش شوری است.

علاوه بر این، سرعت ته نشینی لجن فعال نیز افزایش یافته است (شکل ۷). با افزایش شوری مقدار اختلاف حجم ته نشین شده در دقایق ۱۰، ۲۰ و ۳۰ آزمایش SVI روند کاهشی پیدا کرده است که این موضوع بدین معنی است که با افزایش شوری نه تنها قدرت ته نشینی لجن افزایش می یابد (SVI کم تر) بلکه عمل ته نشین شدن نیز سریع تر انجام می شود. داده های نشان داده شده در شکل ۷ مربوط به میانگین داده های سه آزمایش است.

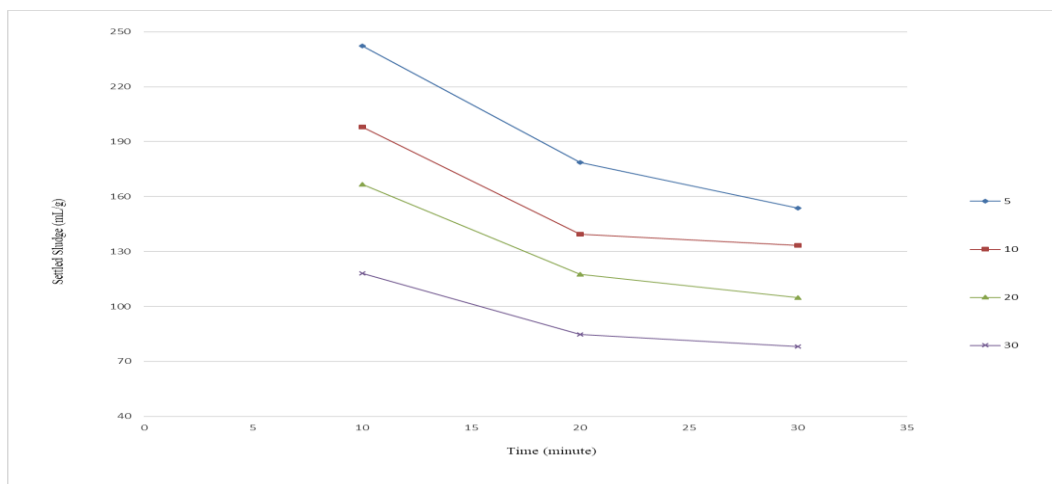
محیط های با شوری بالا، همه انواع باکتری ها روندی کاهشی را طی می کنند. با این حال، با سازگاری تدریجی باکتری ها به شوری، گونه های میکروبی مقاوم به شوری زنده مانده و به تدریج به میکروارگانیسم های غالب تبدیل شده و بنابراین نقش کلیدی را در تجزیه فاضلاب های شور و بسیار شور ایفاء می کنند (He et al., 2017).

۳.۳. تغییرات SVI و سرعت ته نشینی

تغییرات مقادیر شاخص حجمی لجن در شکل ۶ نشان داده شده است. در این مطالعه، مشاهده شد افزایش شوری باعث بهبود کیفیت و سرعت رسوب لجن معلق می شود. با افزایش شوری از ۰-۳۰ گرم سدیم کلرید بر لیتر، مقدار



شکل ۶. تنوع مقادیر شاخص حجمی لجن در شوری های مختلف



شکل ۷. مقادیر مختلف ته نشینی در آزمایش SVI در دقایق ۱۰، ۲۰ و ۳۰

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی اثر فاضلاب شور بر روند تصفیه بیولوژیکی در سیستم HSBR پرداخته شده است. برای این منظور روش متداول SBR با به کارگیری حامل معلق بیوفیلم، عملکردی دو گانه پیدا کرده است. از یک سو رشد معلق بیومس با استفاده از لجن فعال فراهم شده و از سوی دیگر رشد چسبیده به حامل‌های پلی پروپیلن باعث شکل‌گیری بیوفیلم روی آن‌ها می‌شود. مشاهده شد که با افزایش شوری از ۰ تا ۳ درصد متناظر با ۰ و ۳۰ گرم نمک سدیم کلرید بر لیتر، راندمان حذف COD از ۹۴/۲۲ درصد در شوری ۰/۵ درصد به ۹۱ درصد، ۸۷ درصد و ۸۲/۳۶ درصد تناظر با شوری ۱ درصد، ۲ درصد و ۳ درصد می‌رسد. هم‌چنین برای ارزیابی جرم بیومس کل و بیومس فعال پارامترهای MLSS و MLVSS اندازه‌گیری شدند. در حدود ۳۷ درصد افزایش یافت در حالی که MLVSS بعد از کمی افزایش تا ۰/۵ درصد شوری تا انتها روند تقریباً ثابتی داشت. قدرت و سرعت ته‌نشینی با پارامتر SVI بررسی شدند. با افزایش شوری قدرت و سرعت ته‌نشینی لجن معلق افزایش یافت. SVI در شوری صفر درصد برابر با ۱۵۶ mL/g بوده است که در انتها به ۷۸ mL/g رسیده است.

۵. یادداشت

1. SBR: Sequencing Batch Reactor
2. COD: Chemical Oxygen Demand
3. MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids
4. MLVSS: Mixed Liquor Volatile Suspended Solids
5. SVI: Sludge Volume Index
6. DO: Dissolved Oxygen
7. EC: Electric Conductivity
8. HSBR: Hybrid Sequencing Batch Reactor
9. EPS: Extra Polymeric Substance

اثر شوری بر ته‌نشینی لجن فعال در سیستم‌های بیولوژیکی طی چند سال محل بحث و اختلاف بوده است. در این مطالعه، همان‌طور که بیان شد، شوری دارای تأثیر مثبتی بر عملکرد ته‌نشینی لجن معلق است. با این حال، در برخی مطالعات، نتایج متفاوتی به دست آمده است (Amin et al., 2014; She et al., 2016; Uygur & Kargı, 2004; Wang et al., 2016). این محققان عملکرد ته‌نشینی ضعیف لجن فعال در محیط شور را به برخی عوامل از جمله عوامل زیر نسبت دادند:

۱. کاهش مقدار بیومس و تنوع زیستی در محیط‌های با شوری بالا؛
۲. افزایش غلظت فاضلاب در نتیجه شرایط شوری و افزایش مقدار جامدات معلق. (C) افزایش پراکندگی (dispersion) لجن فعال و بنابراین، کاهش ته‌نشینی لجن فعال. با این حال، برخی دیگر نتایج مشابه با این مطالعه را ارائه دادند (Moon et al., 2003; Pronk et al., 2014, Moussa et al., 2006; Bassin et al., 2012; Campos et al., 2002; Zhang et al., 2010). دلایلی که اشاره می‌کنند شامل: ۱. کاهش رشد و تکثیر باکتری‌های فیلامنتوس که عامل مضر در ته‌نشینی هستند؛ ۲. متراکم‌تر شدن لجن فعال در نتیجه واکنش‌های الکترواستاتیک و هیدروفوبیک که به کاهش نیروهای دفعه بین ذرات معلق می‌انجامد؛ ۳. در محیط‌های شور لجن فعال متراکم‌تر و فشرده‌تر و به هم نزدیک‌تر می‌شوند ۴. خروج توده‌های لجن سبک‌تر.

منابع

- Alipour, V., Moein, F. and Rezaei, L. 2017. Determining the salt tolerance threshold for biological treatment of salty wastewater. *Health Scope*, 6.
- Amin, M.M., Khiadani, M.H., Fatehizadeh, A. and Taheri, E. 2014. Validation of linear and non-linear kinetic modeling of saline wastewater treatment by sequencing batch reactor with adapted and non-adapted consortiums. *Desalination*, 344: 228-235.
- Arnaiz, C., Buffiere, P., Lebrato, J. and Moletta, R. 2007. The effect of transient changes in organic load on the performance of an anaerobic inverse turbulent bed reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46: 1349-1356.

- Bassin, J.P., Kleerebezem, R., Muyzer, G., Rosado, A.S., Van loosdrecht, M. C. and Dezotti, M. 2012. Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling of nitrifying sludge in sequencing batch reactors. *Applied microbiology and biotechnology*, 93: 1281-1294.
- Campos, J.L., Mosquera-Corral, A., Sanchez, M., Mendez, R. and Lema, J.M. 2002. Nitrification in saline wastewater with high ammonia concentration in an activated sludge unit. *Water Research*, 36: 2555-2560.
- Chen, Y., He, h., Liu, H., Li, H., Zeng, G., Xia, X. and Yang, C. 2018. Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors. *Bioresource technology*, 249: 890-899.
- Dincer, A. and Kargi, F. 2001. Performance of rotating biological disc system treating saline wastewater. *Process Biochemistry*, 36: 901-906.
- Dincer, A.R. and Kargi, F. 2000. Effects of operating parameters on performances of nitrification and denitrification processes. *Bioprocess Engineering*, 23: 75-80.
- Fan, J., Zhang, J., Zhang, C., Ren, L. and Shi, Q. 2011. Adsorption of 2, 4, 6-trichlorophenol from aqueous solution onto activated carbon derived from loosestrife. *Desalination*, 267: 139-146.
- Figuroa, M., Mosquera-corral, A., Campos, J. and Mendez, R. 2008. Treatment of saline wastewater in SBR aerobic granular reactors. *Water Science and Technology*, 58: 479-485.
- Frølund, B., Palmgren, R., Keiding, K. and Nielsen, P.H. 1996. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. *Water research*, 30: 1749-1758.
- He, H., Chen, Y., Li, X., Cheng, Y., Yang, C. and Zeng, G. 2017. Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119: 520-527.
- Kulkarni, P. 2013. Nitrophenol removal by simultaneous nitrification denitrification (SND) using *T. pantotropha* in sequencing batch reactors (SBR). *Bioresource technology*, 128: 273-280.
- Lefebvre, O., Quentin, S., Torrijos, M., Godon, J., Delgenes, J. and Moletta, R. 2007. Impact of increasing NaCl concentrations on the performance and community composition of two anaerobic reactors. *Applied microbiology and biotechnology*, 75: 61-69.
- Lefebvre, O., Vasudevan, N., Thanasekaran, K., Moletta, R. and Godon, J. 2006. Microbial diversity in hypersaline wastewater: the example of tanneries. *Extremophiles*, 10: 505-513.
- Mielcarek, A., Rodziewicz, J., Janczukowicz, W. and Thornton, A. 2015. The feasibility of citric acid as external carbon source for biological phosphorus removal in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR). *Biochemical engineering journal*, 93: 102-107.
- Moon, B.-H., Seo, G.-T., Lee, T.-S., Kim, S.-S. and Yoon, C.-H. 2003. Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water science and technology*, 47: 65-70.
- Moussa, M., Sumanasekera, D., Ibrahim, S., Lubberding, H., Hooijmans, C., Gijzen, H. and Van Loosdrecht, M. 2006. Long term effects of salt on activity, population structure and floc characteristics in enriched bacterial cultures of nitrifiers. *Water research*, 40: 1377-1388.
- Neilly, A., Jegatheesan, V. and Shu, L. 2009. Evaluating the potential for zero discharge from reverse osmosis desalination using integrated processes—A review. *Desalination and water treatment*, 11: 58-65.
- Pronk, M., Bassin, J., De Kreuk, M., Kleerebezem, R. and Van Loosdrecht, M. 2014. Evaluating the main and side effects of high salinity on aerobic granular sludge. *Applied microbiology and biotechnology*, 98: 1339-1348.
- Rene, E.R., Kim, S.J. and Park, H. S. 2008. Effect of COD/N ratio and salinity on the performance of sequencing batch reactors. *Bioresource technology*, 99: 839-846.
- She, Z.-L., Zhang, X.-L., Gao, M., Guo, Y.-C., Zhao, L.-T. and Zhao, Y.-G. 2016. Effect of salinity on nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch biofilm reactor. *Desalination and Water Treatment*, 57: 7378-7386.
- Shi, K., Zhou, W., Zhao, H. and Zhang, Y. 2012. Performance of halophilic marine bacteria inocula on nutrient removal from hypersaline wastewater in an intermittently aerated biological filter. *Bioresource technology*, 113: 280-287.
- Snaidr, J., Amann, R., Huber, I., Ludwig, W. and Schleifer, K.-H. 1997. Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge. *Appl. Environ. Microbiol.*, 63: 2884-2896.

- Uygun, A. 2006. Specific nutrient removal rates in saline wastewater treatment using sequencing batch reactor. *Process Biochemistry*, 41: 61-66.
- Uygun, A. and Kargı, F. 2004. Salt inhibition on biological nutrient removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor. *Enzyme and Microbial Technology*, 34: 313-318.
- Wang, J.C., Liao, T.T, Zhou, Y.B., Lu, J. 2008. Treatment of saline industrial wastewater in an activated sludge unit by salt-tolerant microorganisms. *The 12th APCCChE Congress, August 4e6, Dalian, China*.
- Wang, Z., Gao, M., Wei, J., Ma, K., Pei, J., Zhang, J., Zhou, Y., Yang, Y. and Yu, S. 2016. Long-term effects of salinity on extracellular polymeric substances, microbial activity and microbial community from biofilm and suspended sludge in an anoxic-aerobic sequencing batch biofilm reactor. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 68: 275-280.
- Xia, S., Li, J. and Wang, R. 2008. Nitrogen removal performance and microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor. *Ecological Engineering*, 32: 256-262.
- Yusoff, N., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Saad, F.N.M., Khalik, W. and Lee, S.-L. 2016. Evaluation of biodegradation process: comparative study between suspended and hybrid microorganism growth system in sequencing batch reactor (SBR) for removal of phenol. *Biochemical engineering journal*, 115: 14-22.
- Zhang, Z., Chen, S., Wu, P., Lin, L. and Luo, H. 2010. Start-up of the Canon process from activated sludge under salt stress in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR). *Bioresour technology*, 101: 6309-6314.