

تأثیر زمان ماند لجن بر روی کاهش گرفتگی غشایی در سامانه‌های بیوراکتور غشایی برای تصفیه فاضلاب سنتزی

حسین حضرتی^{۱*}، محمد آتش‌زر^۲ و محمد رستمی‌زاده^۳

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ عضو مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۹۶/۹/۲۳، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیده

سامانه بیوراکتور غشایی یکی از سامانه‌های نوین در تصفیه فاضلاب است. یکی از محدودیت‌های این سامانه گرفتگی غشا می‌باشد. از آنجایی که زمان ماند لجن (SRT) در این سامانه‌ها مهم می‌باشد لذا در این مطالعه، تأثیر پارامتر SRT در گرفتگی غشا بررسی شد. برای رسیدن به این هدف یک بیوراکتور غشایی طراحی و ساخته شد و برای سه زمان ماند لجن ۱۲، ۲۴ و ۳۶ روز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با توجه به این که غلظت مخلوط جامد معلق (MLSS) با افزایش زمان ماند لجن افزایش یافت اما میزان فعالیت میکروبی کمی کاهش یافت. با این حال بازدهی حذف خواست اکسیژن شیمیایی (COD) تقریباً در تمامی زمان ماندها یکسان بود. تغییرات فشار مکشی نشان داد برای زمان ماند لجن ۱۲ روز گرفتگی غشا بیشتر از ۲۴ و ۳۶ روز می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد توزیع اندازه ذرات لجن برای زمان ماند لجن ۳۶ روز بیشتر از حالت‌های دیگر است. علاوه بر آن مشخص گردید میزان محصولات میکروبی محلول (SMP) و مواد پلیمری خارج سلولی (EPS) با افزایش زمان ماند کاهش می‌یابد. آنالیز شمارش ریزاندام‌ها نیز نشان داد افزایش گرفتگی غشا مربوط به باکتری‌های رشته‌ای و با دیگر جمعیت میکروبی نمی‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بیوراکتور غشایی، تصفیه فاضلاب، گرفتگی غشا، زمان ماند لجن، باکتری رشته‌ای.

۱- مقدمه

یکی از راه‌های اساسی تأمین آب برای مقابله با کمبود آن در کشور و حتی در دنیا، تصفیه فاضلاب می‌باشد. روش‌های مختلفی مانند بستر متحرک بیوراکتور و لجن فعال متعارف برای تصفیه فاضلاب‌ها استفاده شده است (پژوم شریعتی و همکاران، ۱۳۹۷؛ قادری و آیتی، ۱۳۹۳). در طی چند دهه اخیر بیوراکتورهای غشایی^۱ به دلیل عملکرد مناسب در تصفیه فاضلاب و حذف مؤثر آلاینده‌ها، می‌توانند در بازچرخانی آب سهم عمده‌ای داشته باشند. علاوه بر این منجر به کاهش مصرف انرژی نسبت به سامانه‌های متعارف خواهد شد. اما با این حال بیوراکتورهای غشایی فاقد معایب نمی‌باشند. یک محدودیت عمده برای بیوراکتورهای غشایی هزینه غشای آن است هزینه‌های غشاء شامل خرید اولیه، تمیز کردن غشا و مهم‌تر از همه این‌ها تعویض غشاهایی که دچار گرفتگی شدید یا خرابی شده‌اند، است. اخیراً برخی از

پژوهشگران گزارش کرده‌اند که می‌توان مشخصه‌های لجن مانند اندازه لخته، محصولات میکروبی محلول (SMP)، مواد پلیمری خارج سلولی (EPS)، گرانروی لجن و توزیع اندازه ذرات را با افزودن مواد شیمیایی مانند کربن فعال گرانوله شده و ژئولیت و یا ایجاد میدان الکتریکی به بیوراکتور غشایی بهبود بخشید (Hazrati و Shayegan، ۲۰۱۶؛ Hazrati و همکاران، ۲۰۱۶؛ Taghipour و همکاران، ۲۰۱۶؛ Alighardashi و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع با افزودن این مواد، اندازه لخته‌ها افزایش می‌یابد درحالی‌که مواد محلول آلی در لجن کاهش می‌یابد (Koseoglu و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین در مطالعه دیگر با افزودن آکنه به داخل راکتور و جذب مواد آلی محلول، گرفتگی غشا را کاهش داده‌اند (Jin و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر این، پارامترهای عملیاتی از قبیل زمان ماند لجن (SRT)^۲، زمان ماند

نتیجه فعالیت میکروبی کاهش می‌یابد (Junxin و Ouyang، ۲۰۰۹).

در حالت کلی اثر زمان ماند لجن بر روی خواص لجن و گرفتگی غشا از مطالعه‌ای به مطالعه دیگر خیلی متفاوت می‌باشد. این تفاوت‌ها به عوامل متعددی مانند نوع خوراک، محدوده SRT (خیلی پایین یا خیلی بالا)، دما و غیره وابسته است. از این رو در این مقاله هدف بررسی اثر سه زمان ماند لجن ۱۲، ۲۴ و ۳۶ روز بر روی برخی از خواص لجن مانند محصولات میکروبی محلول، پلیمرهای خارج سلولی، توزیع اندازه ذرات و فعالیت میکروبی می‌باشد. در زمان ماندهای لجن خیلی بالا احتمال افزایش گرفتگی بیشتر می‌باشد لذا در این پروژه سه زمان ماند لجن متوسط انتخاب شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شرح پابلوت

همان‌طور که در شکل (۱)، مشاهده می‌شود بیوراکتور غشایی در ابعاد $70 \times 22 \times 6/5$ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. غشاء استفاده شده در بیوراکتور غشایی از نوع غشاء میکروفیلتراسیون^۷، با سطح مؤثر $0/1$ مترمربع، قطر اسمی منافذ $0/1$ میکرومتر، اندازه کاغذ A4 و ساخت شرکت سیناپ^۸ است. این غشاء از جنس پلی-وینیلیدین دی‌فلوراید^۹ ساخته شده است. در بیوراکتور غشایی هوادهی علاوه بر تأمین اکسیژن مورد نیاز برای فعالیت زیستی ریزاندام‌ها، به منظور جداسازی مواد چسبیده به سطح غشا نیز استفاده می‌شود.

لوله هوادهی در زیر غشا نصب شد و بر روی آن ۲۰ عدد سوراخ به قطر ۱ میلی‌متر و با فواصل ۱ سانتی‌متر از یکدیگر ایجاد شد. یک حسگر بالای راکتور نصب شد تا محلی که بیانگر حجم ۷ لیتر است مشخص گردد. یک فشارسنج خلأ در خروجی غشا نصب شد و به صورت روزانه مقدار آن به عنوان فشار مکشی غشا قرائت و ثبت گردید.

جدول ۱- مشخصات فاضلاب ورودی به سیستم

پارامتر/ ترکیب	واحد	مقدار
PH		۷-۸
COD کل	میلی گرم بر لیتر	۹۰۰
نیترژن کل	میلی گرم بر لیتر	۶۷-۸۰
فسفر کل	میلی گرم بر لیتر	۱۵-۲۵
بی‌کربنات سدیم	میلی گرم بر لیتر	۵۰۰
دما	درجه سلسیوس	۲۷-۳۰

هیدرولیکی (HRT)^۳، نسبت خوراک به ریزاندام، اثر مستقیمی بر روی گرفتگی غشا ندارند، اما با توجه به این که بر روی مشخصات لجن مانند SMP^۴، EPS^۵، گرانروی و غیره تأثیر چشمگیری دارند لذا به صورت غیرمستقیم بر روی گرفتگی غشا تأثیر دارند و بهینه کردن آن‌ها می‌تواند عملکرد لجن فعال را بهبود بخشد (Jin و همکاران، ۲۰۱۳). در حالت کلی پارامترهای HRT و SRT، پارامترهای مربوط به نسبت خوراک به ریزاندام هستند. برخی محققان نشان داده‌اند که نسبت خوراک به ریزاندام بر روی اندازه متوسط ذرات تأثیر می‌گذارد (Leu و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعاتی دیگر هم در مورد ارتباط بین SRT و تشکیل SMP و EPS انجام شده است و بیان شده است افزایش SRT موجب کاهش SMP و EPS خواهد شد که به موجب آن زیست توده در راکتور ماندگاری طولانی‌تری خواهد داشت و همچنین افزایش مواد معدنی در سامانه نیز بیشتر شده و فعالیت زیستی کاهش می‌یابد. درواقع می‌توان گفت با توجه به این که میزان ترکیبات معدنی همراه خوراک ورودی ثابت است ولی میزان خروج آن از طریق لجن کاهش می‌یابد لذا انباشت ترکیبات معدنی در سامانه افزایش می‌یابد. در غیر این صورت، اگر SRT پایین‌تر باشد، میزان SMP و میزان گرفتگی را افزایش خواهد داد (Liang و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات دیگر عکس این مطلب را نشان می‌دهند (Han و همکاران، ۲۰۰۵؛ Massé و همکاران، ۲۰۰۶). Huang و همکاران (۲۰۰۱) نیز بیان کردند که بازدهی حذف در SRT های پایین (۵ تا ۴۰ روز) تقریباً مستقل از SRT می‌باشد اما غلظت مخلوط جامد معلق (MLSS)^۶، افزایش و پارامترهای سنتیک رشد، کاهش می‌یابد. در حالت کلی، SRT رابطه پیچیده‌ای با تولید EPS و SMP در بیوراکتورهای غشایی دارد.

Meng و همکاران (۲۰۰۹) اثر SRT روی تولید EPS در مطالعات دیگران بررسی کردند و نتیجه گرفتند که SRT بهینه برای تولید EPS و کنترل گرفتگی غشایی در حدود ۳۰ روز می‌باشد. با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت SRT یکی از مهم‌ترین پارامترها در سامانه بیوراکتور غشایی است و تأثیر زیادی بر روی خواص زیست توده دارد. SRT بالا، یک مزیت مهم برای این سامانه‌ها است زیرا میزان لجن مازاد که باید از سامانه خارج شود، کم‌تر می‌باشد و هزینه‌های مربوط به مدیریت لجن را کاهش می‌دهد. اما در عوض زمان ماند لجن و غلظت زیست توده بالا، دو مشکل عمده دارد: اول این که منجر به افزایش گرفتگی غشا شده و دوم این که ریزاندام‌های غیرفعال، در سامانه افزایش یافته و در

7. Microfiltration

8. Sinap

9. PVDF

3. Hydraulic Retention Time

4. Soluble Microbial Products

5. Extracellular Polymeric Substances

6. Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS)

۲-۴- آنالیزها

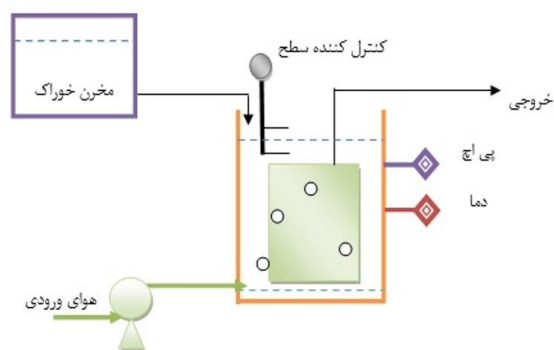
مقادیر غلظت مخلوط جامد معلق، غلظت مخلوط جامد معلق فرار (MLVSS)^{۱۵}، نرخ مصرف اکسیژن ویژه^{۱۶}، نیتروژن، فسفر، COD^{۱۷} خروجی براساس روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Association و Federation، ۲۰۰۵). همچنین PH به‌صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شد. توانایی لخته‌سازی لجن نیز با استفاده از روش توصیف‌شده توسط Jorand و همکاران تخمین زده شد (Jorand، و همکاران ۱۹۹۴). مقادیر SMP و EPS با استفاده از روش توضیح داده شده توسط Chang تعیین گردید (Chang و همکاران، ۱۹۹۹). مقادیر پروتئین در آن‌ها با استفاده از روش فولین تخمین زده شد (Zhang و همکاران، ۱۹۹۹). درحالی‌که جز پلی‌سارکارید^{۱۸} محصولات میکروبی و پلیمرهای خارج سلولی با روش فنول^{۱۹} و اسید سولفوریک تعیین گردید (Zhang و همکاران، ۱۹۹۹).

آزمایش‌های شمارش ریزاندام‌های شاخص و باکتری‌های رشته‌ای بر اساس روش‌های موجود در این رفرنس‌ها (Jenkins و همکاران، ۱۹۹۳؛ Ebrahimi و همکاران، ۲۰۱۸) و با میکروسکوپ Yu JIE، XSP21-01T انجام گرفته است. شمارش باکتری‌ها به صورت روزانه انجام شده و محدوده تعداد باکتری‌های رشته‌ای و ریزاندام‌ها که در حالت پایا (تغییر خواست اکسیژن شیمیایی خروجی به صفر نزدیک باشد) به‌دست آمده و در نتایج گزارش شده است. برای اندازه‌گیری گرانیوی لجن از دستگاه شرکت بروکفیلد^{۲۰} با مدل LVD^{۲۱} ۲۳۰ استفاده شده است. همچنین ساینز اندازه ذرات با استفاده از دستگاه فریتش آنالیز ۲۲^{۲۲} با محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- فعالیت میکروبی و بازدهی حذف COD

به‌منظور ارزیابی انتقال اکسیژن در داخل راکتور و بررسی تأثیر زمان ماند لجن در فعالیت میکروبی، نسبت MLVSS به MLSS^{۲۳} و پارامتر نرخ ویژه مصرف اکسیژن به عنوان فعالیت میکروبی برای لجن فعال داخل راکتورها اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- شماتیک بیوراکتور غشایی

پمپ پریستالتیک^{۱۰} ساخت کشور آلمان شرکت هایدولف^{۱۱} برای ورودی و خروجی راکتور استفاده شد. برای هوادهی از پمپ آکواریوم ساخت کشور چین شرکت هایلا^{۱۲} استفاده شد. همچنین از دستگاه PH متر شرکت هانا^{۱۳} جهت اندازه‌گیری PH استفاده شد.

۲-۲- خوراک ورودی و لجن اولیه

اتانول به عنوان منبع کربن، آمونیوم کلراید به عنوان منبع نیتروژن و پتاسیم دی هیدروژن فسفات و دی پتاسیم هیدروژن فسفات به عنوان منبع فسفر استفاده شد. مشخصات کلی خوراک ورودی به راکتور دارای مشخصات جدول (۱) می‌باشد که به‌صورت سنتزی تهیه می‌شد. مواد شیمیایی مورد استفاده در این کار برای شرکت مرک آلمان بود. لجن اولیه از تصفیه‌خانه فاضلاب پتروشیمی تبریز تهیه گردید و به مدت یک ماه با فاضلاب سنتزی به‌صورت ناپیوسته سازگار گردید. غلظت اولیه آن ۲۷۳۵ میلی گرم برلیتر بود.

۳-۲- شرایط عملیاتی سامانه

عملکرد سامانه برای زمان ماند لجن ۱۲، ۲۴ و ۳۶ روز مورد بررسی قرار گرفت. مقدار هوای ورودی به سامانه برای راکتور در تمامی شرایط، حدود ۵ لیتر بر دقیقه می‌باشد میزان اکسیژن محلول^{۱۴} (DO) در داخل راکتور در محدوده ۳ تا ۵ میلی گرم بر لیتر بود. شرایط عملیاتی در بیوراکتور غشایی در جدول (۲) آورده شده است.

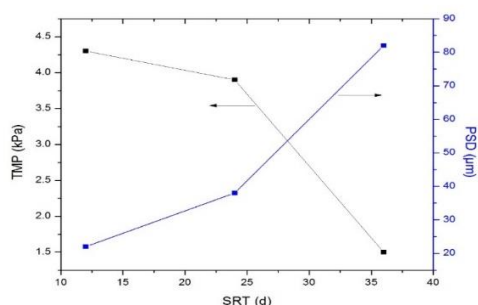
18. Polysaccharide
19. Phenol
20. Brookfield
21. LVDE230
22. Fritsch "analysette 22"
23. MLVSS/MLSS

10. Peristaltic
11. Heidolph
12. Hailea
13. Hana
14. Dissolved Oxygen
15. Mixed Liquor Volatile Suspended Solid
16. Specific Oxygen Uptake Rate
17. Chemical Oxygen Demand

احتمال دارد با افزایش سن لجن و پیر شدن آن فعالیت میکروبی کاهش یافته است. مطالعات دیگری نیز نشان داده است که با افزایش SRT تا مقدار معین، بازدهی حذف افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر از حد معین باعث کاهش بازدهی می‌شود و دلیل آن را کاهش نسبت غلظت مخلوط جامد معلق فرار به مخلوط جامد معلق کل و همچنین کاهش فعالیت میکروبی بیان کرده‌اند (Han و همکاران، ۲۰۰۵؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Annop و همکاران، ۲۰۱۴). اما نتایج متناقضی نیز به دست آمده است. برای مثال Pollice و همکارانش، ۲۰۰۸ گزارش داده‌اند که بیوراکتور غشایی می‌تواند در زمان ماند لجن بالاتر بدون اشکالات مربوط به فعالیت‌های زیست تخریب‌پذیری عمل نماید. دلایل نتایج متفاوت می‌تواند به خاطر شرایط متفاوت مانند نوع خوراک و دما باشد. شایان ذکر است بازدهی حذف COD در حالت پایا برای همه زمان ماند های لجن ۱۲، ۲۴ و ۳۶ روز تقریباً یکسان و برابر ۹۸٪ بود و تفاوتی نداشت.

۳-۲- تغییرات فشار مکشی غشاء (TMP) و توزیع اندازه ذرات

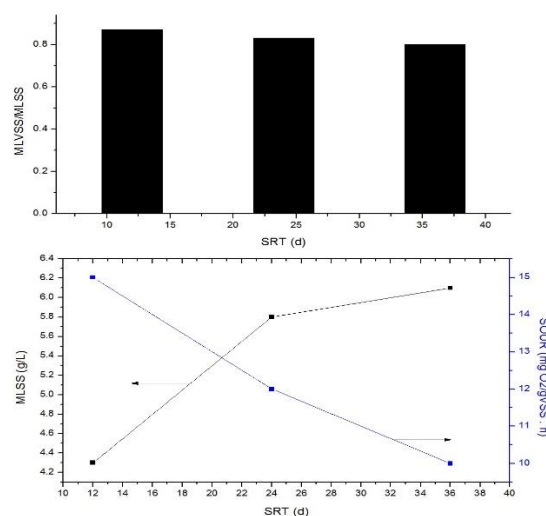
برای مقایسه تغییرات فشار مکشی غشاء که در واقع بیانگر نرخ گرفتگی است، شیب متوسط تغییرات فشار مکشی غشاء با زمان در نظر گرفته شد و نتایج آن در شکل (۳) آورده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شیب تغییرات فشار مکشی به زمان (شدت) گرفتگی غشاء، زمانی که SRT، ۱۲ و ۲۴ روز می‌باشد نسبت به SRT ۳۶ روز افزایش قابل ملاحظه‌ای دارند. برای تحلیل این نتایج به دست آمده، می‌توان از متوسط اندازه ذرات در زمان ماند های مختلف بهره گرفت. نتایج نشان می‌دهد در حالت کلی اندازه متوسط ذرات برای زمان ماند لجن ۳۶ روز خیلی بیشتر از ۱۲ و ۲۴ می‌باشد. لذا احتمال دارد کیک تشکیل شده در زمان ماند لجن بالاتر تراکم‌پذیری کم‌تری داشته و میزان گرفتگی آن کم‌تر است. اما در مقابل آن نشان داده شده است که توزیع اندازه ذرات با کاهش زمان ماند لجن، افزایش یافته است و دلیل آن را افزایش EPS بیان کردند.



شکل ۳- تغییرات فشار مکشی غشاء و متوسط سایز ذرات در زمان‌های ماند لجن مختلف

جدول ۲- شرایط عملیاتی بیوراکتور غشایی

SRT (روز)	واحد	۱۲	۲۴	۳۶
مدت انجام (روز)	روز	۵۰	۵۰	۶۰
HRT	ساعت	۸	۸	۸
هوای ورودی	لیتر بر دقیقه بر حجم راکتور بر حسب لیتر	۱	۱	۱
DO	میلی گرم بر لیتر	۳	۴	۵
شار خروجی	لیتر به ازای مترمربع ساعت	۸/۷۵	۸/۷۵	۸/۷۵
ریزاندام / خوراک	گرم MLSS / زمان گرم COD	۰/۷۵	۰/۵۱	۰/۴۸



شکل ۲- تغییرات MLSS و فعالیت میکروبی در زمان ماند های لجن مختلف

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد، با افزایش SRT از ۱۲ تا ۳۶ روز، MLSS افزایش اما نسبت MLVSS به MLSS از ۰/۸۶ به ۰/۸ کاهش می‌یابد (شکل (۲)). می‌توان گفت با تزریق خوراک ترکیبات معدنی افزوده می‌شود و از طرفی چون زمان ماند لجن از ۱۲ به ۳۶ روز افزایش می‌یابد لذا دبی خروجی لجن کاهش می‌یابد و ترکیبات معدنی افزایش می‌یابد در نتیجه میزان نسبت MLVSS به MLSS کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگری نیز مشاهده شده است با افزایش SRT، غلظت زیست توده افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت خوراک به ریزاندام و فعالیت میکروبی کاهش می‌یابد. همچنین بیان شده است با افزایش زمان ماند لجن نسبت MLVSS به MLSS کاهش می‌یابد (Meng و همکاران، ۲۰۰۹). در این تحقیق نیز با افزایش زمان ماند لجن، فعالیت میکروبی کاهش یافته است. با وجود این که میزان غلظت زیست توده با افزایش زمان ماند لجن تا حدودی افزایش یافته است اما فعالیت میکروبی آن کاهش یافته است یکی از دلایل مهم این است که افزایش غلظت زیست توده به خاطر افزایش ترکیبات معدنی بوده است و دیگر این که

غلظت‌های بالای محصولات میکروبی منجر به فیلتراسیون کم و باعث گرفتگی شدید غشایی می‌شود. در تحقیقی بیان شده است با افزایش زمان ماند لجن غلظت محصولات میکروبی افزایش می‌یابد دلیل آن این‌طور بیان شده است که محصولات میکروبی همان ترکیبات آلی است که از سوخت‌وساز رشد مایه و تجزیه زیست توده تولید می‌شود، لذا با افزایش زمان ماند لجن احتمال تولید محصولات دیر تجزیه‌پذیر بیشتر می‌باشد. اما در این مقاله میزان SMP در زمان ماند لجن ۱۲ روز بیشتر از ۳۶ روز می‌باشد. دلیل آن شاید به‌خاطر این است شرایط عملیاتی مانند دما و PH و نوع خوراک در این تحقیق با تحقیق Meng و همکاران (۲۰۰۹) متفاوت بود. علاوه بر این شکل (۴) نشان می‌دهد SMP_c با افزایش زمان ماند لجن کاهش بیشتری نسبت به بخش SMP_p داشته است و از آنجایی که SMP_c طبق نتایج به‌دست آمده از تحقیق Yuniarto و همکاران (۲۰۱۳) یکی دلایل اصلی گرفتگی غشا می‌باشد لذا می‌توان گفت یکی از دلایل کاهش گرفتگی غشا در زمان ماند لجن ۳۶ روز کاهش زیاد SMP_c می‌باشد.

تغییرات EPS و اجزای آن (EPS_p و EPS_c) در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش زمان ماند لجن از ۱۲ تا ۲۴ روز و همچنین از ۲۴ تا ۳۶ روز، غلظت پلیمرهای خارج سلولی کاهش می‌یابد. در تحقیقات دیگری نیز بیان شده است که با افزایش زمان ماند لجن غلظت پلیمرهای خارج سلولی کاهش یافته است (Chang، ۲۰۱۱).

کاهش آن را می‌توان به تولید کم آن در زمان‌های ماند لجن بالاتر نسبت داد و یا حتی می‌توان گفت در زمان ماند لجن بالاتر نرخ تجزیه زیستی بیشتری دارد (Skouteris و همکاران، ۲۰۱۵). بیان شده است غلظت‌های بیشتر پلیمرهای خارج سلولی منجر به فلاکه شدن لجن می‌گردد و احتمال دارد باعث کاهش گرفتگی غشا گردد (Kimura و همکاران، ۲۰۰۹). اما نتیجه به‌دست آمده در این مقاله متناقض با نتایج Kimura و همکاران (۲۰۰۹) بوده است. اما با این حال نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با مطالعه انجام شده توسط Yuniarto و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. آن‌ها نیز گزارش کرده‌اند مواد پلیمری خارج سلولی کم‌تر باشد گرفتگی غشا کاهش می‌یابد. از طرفی نتایج نشان می‌دهد میزان پروتئین در مواد پلیمری خارج سلولی با افزایش زمان ماند لجن افزایش می‌یابد و از آنجایی‌که بیشتر بودن پروتئین بیانگر آب‌گریزی است (Ji و همکاران، ۲۰۱۰)، لذا می‌توان گفت آب‌گریزی لجن افزایش یافته و کم‌تر به غشا می‌چسبد و در نتیجه گرفتگی غشا کاهش می‌یابد.

درواقع پلیمرهای خارج سلولی زیاد باعث شده است ذرات لجن به هم بچسبند و به‌صورت فلاک^{۲۴} درآیند (Junxin و Ouyang، ۲۰۰۹). همچنین Junxin و Ouyang گزارش کرده‌اند با کاهش زمان ماند لجن گرفتگی غشا افزایش می‌یابد. اما در تحقیق دیگر بیان شده است با افزایش زمان ماند لجن گرفتگی غشاء افزایش می‌یابد و دلیل آن را بیان کردند که در زمان ماند لجن بالاتر میزان ته‌نشینی ذرات روی سطح غشا افزایش می‌یابد (Ng و همکاران، ۲۰۰۶). البته قابل ذکر است که در تحقیق آن‌ها مقدار SRT بین ۳۰ تا ۷۰ روز بررسی شده است درحالی‌که محدوده بررسی SRT در این تحقیق از ۱۲ تا ۳۶ روز می‌باشد.

۳-۳- تغییرات EPS و SMP

سوخت‌وساز ریزاندام‌ها، مانند تولید محصولات میکروبی محلول و مواد پلیمری خارج سلولی بر روی گرفتگی غشا تأثیر بسزایی دارد. لذا فهم دقیق اثرات آن ضروری می‌باشد (Zhu و همکاران، ۲۰۱۲؛ Meng و همکاران، ۲۰۱۶؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه محصولات میکروبی و پلیمرهای خارج سلولی را به صورت مجموع پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها^{۲۵} در نظر گرفته شده و با نمادهای SMP_c^{۲۶}، SMP_p^{۲۷}، EPS_c^{۲۸} و EPS_p^{۲۹} نشان داده شده است.

Arabi و Nakhla (۲۰۰۸) گزارش کردند که غلظت‌های بالاتر محصولات میکروبی محلول به دلیل مسدود کردن حفره‌ها و کاهش دادن تخلخل یک منجر به گرفتگی بیشتر غشا می‌گردد. علاوه بر این Kimura و همکاران (۲۰۰۹) طی تحقیقاتی که در مورد محصولات میکروبی محلول در زمان‌های ماند لجن مختلف و ارتباط آن با گرفتگی غشا انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که میان کربوهیدرات و گرفتگی غشا ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. همچنین بیان شده است غلظت‌های بیشتر پلیمرهای خارج سلولی می‌تواند باعث فلوکه شدن زیست‌توده و منجر به تشکیل فلاک‌های بزرگ شده و در نهایت باعث کاهش گرفتگی غشا شود.

غلظت‌های SMP و اجزای آن برای SRT های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، SMP با افزایش زمان ماند لجن از ۱۲ تا ۲۴ روز و همچنین از ۲۴ به ۳۶ روز کاهش می‌یابد. کاهش این محصولات به‌طور خوبی با کاهش گرفتگی غشا نسبت مستقیم دارد. این به چند دلیل می‌تواند رخ بدهد: ممکن هست از طریق فرآیند جذب به لجن باشد، و یا در طی سنتز به‌وسیله زیست توده از بین برود و یا از حفره‌های غشا به بیرون تخلیه شود. همچنین برخی تحقیقات دیگر (Meng و همکاران، ۲۰۰۹؛ Lin و همکاران، ۲۰۱۱) مشخص کرده است

27. SMP_p
28. EPS_c
29. EPS_p

24. Floc
25. Polysaccharides
26. SMP_c

۳-۵- مقایسه ریزاندام‌های شاخص و باکتری‌های رشته‌ای

در جدول (۴) برای سه زمان ماند لجن متوسط ریزاندام‌های شاخص و تعداد باکتری‌های رشته‌ای آورده شده است. عموماً انواع مختلف ریزاندام‌های شاخص بر روی کیفیت خروجی و همچنین بر روی عملکرد سامانه تصفیه تأثیر فراوانی دارد و با توجه این که در این مقاله از بیوراکتور غشایی استفاده شده لذا بررسی ریزاندام‌های شاخص فقط به خاطر کیفیت خروجی نمی‌باشد بلکه از نظر تأثیر بر روی گرفتگی غشا مدنظر می‌باشد. عموماً افزایش بیش-ازحد باکتری‌های رشته‌ای منجر به افزایش گرفتگی غشا می‌شود (Shayegan و Hazrati, ۲۰۱۳).

جدول (۴) نشان می‌دهد میزان باکتری‌های رشته‌ای در سه زمان ماند لجن تفاوت چشمگیری ندارند و همچنین دیگر ریزاندام‌ها تفاوت‌های خیلی بیشتری ندارند و تنها مؤکداران کلنی برای زمان ماند لجن ۳۶ روز کمی بیشتر از دو زمان ماند لجن ۱۲ و ۲۴ روز می‌باشد که این مورد نیز به خاطر این است که مؤکداران کلنی در زمان ماند‌های لجن بالا در سامانه افزایش می‌یابد (Skouteris و همکاران، ۲۰۱۵). لذا می‌توان نتیجه گرفت در این تحقیق افزایش گرفتگی غشا در زمان ماند لجن ۱۲ روز به دلیل وجود باکتری‌های رشته‌ای و یا دیگر ریزاندام‌ها نمی‌باشد و افزایش آن می‌تواند به عوامل دیگری مانند محصولات میکروبی محلول، پلیمرهای خارج سلولی و توزیع اندازه ذرات که در بالا بحث شد ارتباط داد.

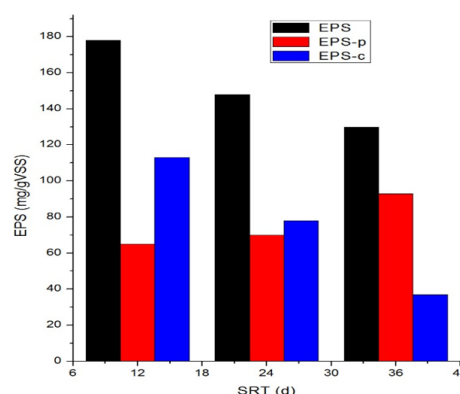
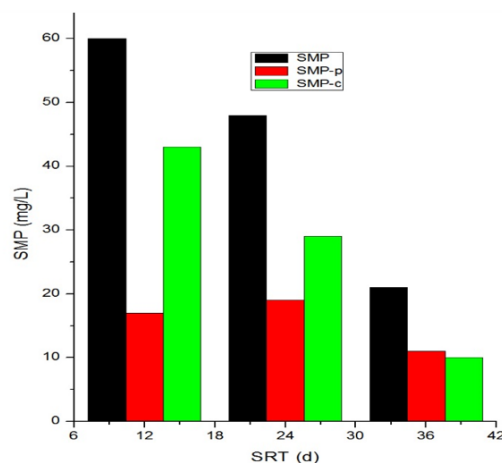
جدول ۳- گرانروی ظاهری لجن برای سه زمان ماند لجن

۳۶	۲۴	۱۲	SRT (روز)
۱/۹	۳/۲	۴/۳	ویسکوزیته ظاهری در تنش برشی (ثانیه/۱) ۴۰ (میلی پاسکال ثانیه)

جدول ۴- تغییرات ریزاندام‌های شاخص و باکتری‌های رشته‌ای در زمان ماند‌های لجن مختلف (تعداد نمونه: ۶ بار)

۳۶ SRT	۲۴ SRT	۱۲ SRT	ریزاندامگان
۴۰-۱۲۰	۴۰-۱۲۰	۴۰-۱۲۰	منفرد
۳۰-۹۰	۱۰-۴۰	۵-۳۰	ساقه‌دار
۲۰-۱۰۰	۲۰-۷۲	۱۵-۶۷	مؤکداران کلنی
۲-۲۰	۴-۲۰	۱-۲۵	آزاد شناور
۲-۲۰	۲-۲۵	۱-۲۵	آمیب‌ها
۴-۱۲	۲-۹	۰-۹	تازک‌داران بزرگ
۳-۱۴	۴-۱۱	۲-۱۱	روتیفرها ^{۳۱}
			باکتری‌های رشته‌ای بزرگ

توجه: برای هر زمان ماند لجن شش نمونه در طی فرآیند اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴- تغییرات محصولات میکروبی و مواد پلیمری خارج سلولی

۳-۴- تغییرات گرانروی لجن

یکی از پارامترهای مهم که خواص لجن را تحت تأثیر قرار می‌دهد گرانروی است. به منظور مقایسه اثر زمان ماند لجن بر روی رفتار رئولوژی^{۳۰} لجن، این پارامتر در هر سه زمان ماند لجن اندازه‌گیری شد. جدول (۳) گرانروی ظاهری لجن در تنش برشی (ثانیه/۱) ۴۰ در سه زمان ماند لجن نشان می‌دهد. برخلاف انتظار میزان گرانروی ظاهری باید به دلیل افزایش غلظت زیست توده، افزایش می‌یافت اما مقدار آن کمی کاهش یافته است. دلیل اصلی آن را می‌توان به غلظت محصولات میکروبی محلول و پلیمرهای خارج سلولی ارتباط داد (Yuniarto و همکاران، ۲۰۰۸؛ Lin و همکاران ۲۰۱۴) از آنجایی که غلظت این دو پارامتر کاهش یافته است لذا میزان گرانروی ظاهری کاهش یافته است. از طرف دیگر Pollice و همکاران نیز رابطه گرانروی با MLSS مختلف را به دست آورد و در نهایت نشان دادند گرانروی به غلظت مخلوط جامد معلق وابسته نیست. اما با این حال نشان داده شده است در غلظت‌های بالاتر مخلوط جامد معلق (بالای ۱۰ گرم بر لیتر) گرانروی رابطه مستقیمی با آن دارد.

- membrane bioreactor with the addition of calcium ion", Separation and Purification Technology, 2011, 82, 148-155.
- Ebrahimi M, Gholikandi GB, Jamshidi S, Ezzo H, "Dolomite Reactor, a Retrofitting Approach for Activated Sludge Against Bulking", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 2018, 42 (3), 1215-1221.
- Federation WE, Association APH, "Standard methods for the examination of water and wastewater", American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 2005.
- Han S-S, Bae T-H, Jang G-G, Tak T-M, "Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system", Process Biochemistry, 2005, 40 (7), 2393-2400.
- Hazrati H, Shayegan J, "Effective Parameters on Increasing Filamentous Bacteria and Their Effects on Membrane Fouling in MBR", 2013.
- Hazrati H, Shayegan J, "Influence of suspended carrier on membrane fouling and biological removal of styrene and ethylbenzene in MBR", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 64 59-68.
- Hazrati H, Shayegan J, Mojtaba Seyedi S, "The effect of HRT and carriers on the sludge specifications in MBR to remove VOCs from petrochemical wastewater", Desalination and Water Treatment, 2016, 57 (46), 21730-21742.
- Huang X, Gui P, Qian Y, "Effect of sludge retention time on microbial behaviour in a submerged membrane bioreactor", Process Biochemistry, 2001, 36 (10), 1001-1006.
- Jenkins D, Richard MG, Daigger GT. 1993. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming. 2. In: Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming. 2. ed: Lewis.
- Ji J, Qiu J, Wai N, Wong F-S, Li Y, "Influence of organic and inorganic flocculants on physical-chemical properties of biomass and membrane-fouling rate", Water research, 2010, 44 (5), 1627-1635.
- Jin L, Ong SL, Ng HY, "Fouling control mechanism by suspended biofilm carriers addition in submerged ceramic membrane bioreactors", Journal of membrane science, 2013, 427, 250-258.
- Jorand F, Guicherd P, Urbain V, Manem J, Block J, "Hydrophobicity of activated sludge flocs and laboratory-grown bacteria", Water Science and Technology, 1994, 30 (11), 211-218.
- Kimura K, Naruse T, Watanabe Y, "Changes in characteristics of soluble microbial products in membrane bioreactors associated with different solid retention times: Relation to membrane fouling", Water research, 2009, 43 (4), 1033-1039.
- Koseoglu H, Yigit N, Iversen V, Drews A, Kitis M, Lesjean B, Kraume M, "Effects of several different flux enhancing chemicals on filterability and fouling reduction of membrane bioreactor (MBR) mixed liquors", Journal of Membrane Science, 2008, 320 (1), 57-64.
- Leu S-Y, Chan L, Stenstrom MK, "Toward long solids retention time of activated sludge processes: benefits in energy saving, effluent quality, and stability", Water Environment Research, 2012, 84

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه از یک بیوراکتور غشایی جهت تصفیه فاضلاب سنتزی در زمان ماند های مختلف لجن استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد، هرچند با افزایش زمان ماند لجن، فعالیت میکروبی کمی کاهش داشت اما تأثیر خاصی بر روی بازدهی حذف خواست اکسیژن شیمیایی نداشت و میزان حذف آن برای تمام موارد مناسب بود. اما زمان ماند لجن ۳۶ روز از نظر کاهش گرفتگی غشا نسبت به ۲۴ و ۱۲ روز مناسب می باشد. علت کاهش گرفتگی مربوط به بهبود مشخصات لجن در زمان ماند ۳۶ روز می باشد. برای مثال توزیع اندازه ذرات با افزایش زمان ماند لجن افزایش یافت و برعکس میزان محصولات میکروبی با افزایش زمان ماند لجن کاهش یافت. میزان مواد پلیمرهای خارج سلولی نیز با افزایش زمان ماند لجن کاهش یافت. همچنین در این مطالعه مشاهدات میکروسکوپی و شمارش ریزاندامها تأیید کرد که افزایش گرفتگی غشا در این پروژه مربوط به باکتری های رشته ای و ریزاندام های دیگر نیست.

۵- مراجع

- قادری ف، آیتی ب، "بررسی کارایی سیستم های MBBR و SBAR در تصفیه فاضلاب سمی فرمالدئید"، نشریه عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳، ۷۴، ۹۹-۱۰۶.
- پژوم شریعتی ف، قادری ف، حائری ح، "استفاده از راکتور بیولوژیکی MBBR حاوی مدیای Kaldness در تصفیه فاضلاب حاوی برش های نفتی سبک"، نشریه عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، آماده انتشار.
- Alighardashi A, Pakan1a M, Jamshidi2b S, Shariati3c FP, "Performance evaluation of membrane bioreactor (MBR) coupled with activated carbon on tannery wastewater treatment", Membrane Water Treatment, 2017, 8 (6), 517-528.
- Annop S, Sridang P, Puetpaiboon U, Grasmick A, "Effect of solids retention time on membrane fouling intensity in two-stage submerged anaerobic membrane bioreactors treating palm oil mill effluent", Environmental technology, 2014, 35 (20), 2634-2642.
- Arabi S, Nakhla G, "Impact of protein/carbohydrate ratio in the feed wastewater on the membrane fouling in membrane bioreactors", Journal of Membrane Science, 2008, 324 (1), 142-150.
- Chang I, Lee C, Ahn K, "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system: The effect of floc structure on membrane fouling", Separation science and technology, 1999, 34 (9), 1743-1758.
- Chang S, "Application of submerged hollow fiber membrane in membrane bioreactors: Filtration principles, operation, and membrane fouling", Desalination, 2011, 283, 31-39.
- Chen K, Wang X, Li X, Qian J, Xiao X, "Impacts of sludge retention time on the performance of submerged

- fouling reduction", *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2016, jwrd2016063.
- Yuniarto A, Noor ZZ, Ujang Z, Olsson G, Aris A, Hadibarata T, "Bio-fouling reducers for improving the performance of an aerobic submerged membrane bioreactor treating palm oil mill effluent", *Desalination*, 2013, 316 146-153.
- Yuniarto A, Ujang Z, Noor ZZ, "Performance of bio-fouling reducers in aerobic submerged membrane bioreactor for palm oil mill effluent treatment", *Journal of Technology UTM*, 2008, 49, 555-566.
- Zhang X, Bishop PL, Kinkle BK, "Comparison of extraction methods for quantifying extracellular polymers in biofilms", *Water science and technology*, 1999, 39 (7), 211-218.
- Zhu L, Qi H-y, Kong Y, Yu Y-w, Xu X-y, "Component analysis of extracellular polymeric substances (EPS) during aerobic sludge granulation using FTIR and 3D-EEM technologies", *Bioresource technology*, 2012, 124, 455-459.
- (1), 42-53.
- Liang S, Liu C, Song L, "Soluble microbial products in membrane bioreactor operation: behaviors, characteristics, and fouling potential", *Water Research*, 2007, 41 (1), 95-101.
- Lin H, Liao B-Q, Chen J, Gao W, Wang L, Wang F, Lu X, "New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge", *Bioresource technology*, 2011, 102 (3), 2373-2379.
- Lin H, Zhang M, Wang F, Meng F, Liao B-Q, Hong H, Chen J, Gao W, "A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: characteristics, roles in membrane fouling and control strategies", *Journal of Membrane Science*, 2014, 460, 110-125.
- Liu Y, Liu Q, Li J, Ngo HH, Guo W, Hu J, Gao M-t, Wang Q, Hou Y, "Effect of magnetic powder on membrane fouling mitigation and microbial community/composition in membrane bioreactors (MBRs) for municipal wastewater treatment", *Bioresource Technology*, 2018, 249 (Supplement C), 377-385.
- Massé A, Spérandio M, Cabassud C, "Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time", *Water Research*, 2006, 40 (12), 2405-2415.
- Meng F, Chae S-R, Drews A, Kraume M, Shin H-S, Yang F, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material", *Water research*, 2009, 43 (6), 1489-1512.
- Meng L, Xi J, Yeung M, "Degradation of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludge by low-concentration ozonation", *Chemosphere*, 2016, 147, 248-255.
- Ng HY, Tan TW, Ong SL, "Membrane fouling of submerged membrane bioreactors: impact of mean cell residence time and the contributing factors", *Environmental science & technology*, 2006, 40 (8), 2706-2713.
- Ouyang K, Junxin L, "Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor", *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21 (10), 1329-1335.
- Pollice A, Giordano C, Laera G, Saturno D, Mininni G, "Rheology of sludge in a complete retention membrane bioreactor", *Environmental technology*, 2006, 27 (7), 723-732.
- Pollice A, Laera G, Saturno D, Giordano C, "Effects of sludge retention time on the performance of a membrane bioreactor treating municipal sewage", *Journal of membrane science*, 2008, 317 (1), 65-70.
- Skouteris G, Saroj D, Melidis P, Hai FI, Ouki S, "The effect of activated carbon addition on membrane bioreactor processes for wastewater treatment and reclamation-A critical review", *Bioresource technology*, 2015, 185, 399-410.
- Taghipour N, Mosaferi M, Shakerkhatibi M, Jaafarzadeh N, Dehghanzadeh R, Hosseinia H, "Optimized coupling of a submerged membrane electro-bioreactor with pre-anaerobic reactors containing anode electrodes for wastewater treatment and

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Solid Retention Time on Membrane Fouling In the Membrane Bioreactor Systems for Treating Synthetic Wastewater

Hossein Hazrati^{a,b,*}, Mohammad Atashzar^a, Mohammad Rostamizadeh^{a,b}

^a Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^b Environmental Engineering Research Center, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 15 December 2017; **Accepted:** 25 April 2017

Keywords:

MBR, Wastewater treatment, Membrane fouling, SRT, Filamentous bacteria.

1. Introduction

In current years, the application of membrane bioreactor (MBR) instead of the conventional activated sludge process (CASP) is becoming more common. MBR has many advantages over the CASP such as high removal efficiency and the flexibility of operations. However, the major obstacle for MBRs is membrane fouling. Previous works showed that membrane fouling is related to the operating parameters such as HRT (Hazrati et al., 2016), sludge retention time (SRT), and sludge specifications (e.g. floc size, extracellular polymeric substance (EPS), soluble microbial product (SMP) and sludge viscosity) (Hazrati and Shayegan, 2016). It is well known that SRT is one of the important factors, which can change the state of biomass in an activated sludge system. Considering the aspects mentioned above, SRTs have significant effects on biological activity and membrane performance in MBR systems. In this study, a system was operated with synthetic wastewater. The main purpose of this study was to investigate the effect of SRT on specific biological activity and membrane fouling in a membrane bioreactor.

2. Methodology

2.1. Set up

In this study, an identical lab-scale MBRs was manufactured. The effective volume in each reactor was 7 l and they were composed of four main sections which will be discussed in the following sentences: (1) Sides: the designed MBRs were made of two layers: the inner part that forms the main reactor's basin in which the biological reactions occur, and the outer part through which the warm/cold water can flow during the temperature flow. Since the temperature variations were not studied in this paper, all the biological processes were performed at 25 °C. (2) Membrane: the employed membrane in this study was a micro-filtration (MF) type with an effective area of 0.1 m² and pore nominal diameter of 0.4 μm.

2.2. Analysis

The MLSS, MLVSS, and COD were estimated according to the standard methods (Federation and Association, 2005). The SMP and EPS concentration were measured utilizing the method described by Chang (Chang et al., 1999). The protein concentration was measured by Bradford's method using Bovine Serum Albumin (BSA) as the standard (Zhang et al., 1999), whereas the corresponding polysaccharide fraction was determined by the phenol-sulfuric acid method. The particles size distribution was determined by the Fritsch "analysette 22" NanoTec laser-particle-sizer with a detection range of 0.01-1000 μm.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.hazrati@sut.ac.ir (Hossein Hazrati), atashzar.mohammad76@gmail.com (Mohammad Atashzar), roostamizadeh@sut.ac.ir (Mohammad Rostamizadeh).

3. Results and discussion

3.1. Microbial activity, TMP and PSD

The microbial activity was a measurement for three SRT. The results show that MLVSS/MLSS ratio in SRT of 36 days is lightly lower than SRT of 12 days which indicates that there is neglect accumulation of inorganic compounds in the condition of SRT of 36 days.

One of the major limitations of membrane bioreactors is membrane fouling (Ouyang and Junxin, 2009). Thus to evaluate this parameter the trans membrane-pressure (TMP) variation was measured continuously. The TMP variation during operation for three SRT has been shown in Fig. 1. As it can be seen in Fig. 1 during the SRT of 36 days the fouling rates for reactors were less accelerated compared with the SRT of 12 and 24 days.

The particle size distribution of sludge for the SRT of 12, 24, and 36 days has been shown in Fig. 1. The average particle size for sludge at the end of the operation with SRT of 36 days (82 μ m) is more than the SRT of 12 and 24 days (22 and 38 μ m, respectively). It is understandable that the bigger particle in SRT of 36days creates higher porosity and lower compressibility which cause less membrane fouling.

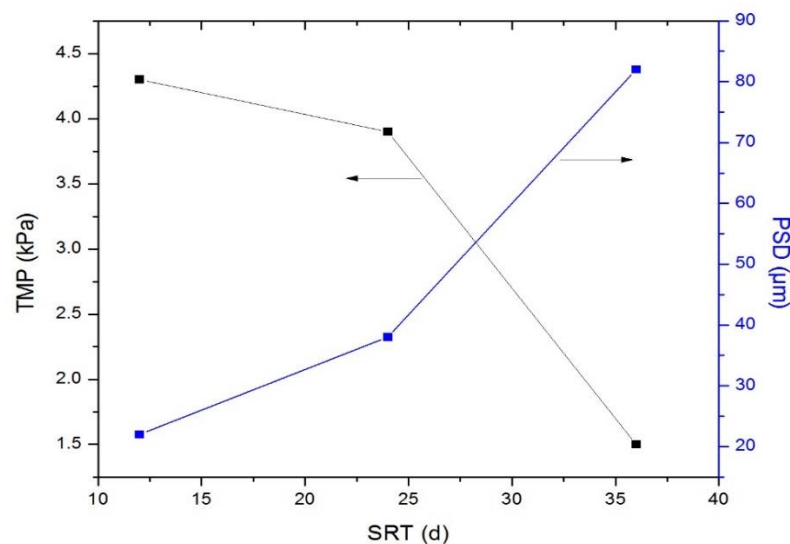


Fig. 1. TMP and PSD for three SRT

3.2. Variation of EPS and SMP and filamentous bacteria

Fig. 2 depicts that, the total SMP concentration was decreased by the increasing of SRT. This could be the result of the absorption by biomass, and/or clinging to the membrane as a cake, and/or SMP discharging through the membrane pores (Yuniarto et al., 2013). Also EPS were decreased by the increasing of SRT. Reducing EPS can be attributed to its low production at higher SRTs, or it can be assumed that higher SRTs increase the bio-degradation rate of EPS. Further, the variation of the main microorganisms and filamentous bacteria was determined by SRT. It can be seen, the increase in SRT caused the number of main microorganisms and filamentous bacteria did not significantly change.

4. Conclusions

In this study, a membrane bioreactor was used to treat synthetic wastewater during different SRTs. The obtained results show that MLSS concentration increases with increasing SRT but microbial activity slightly decreased. However, the removal efficiency of COD was same in the all three SRT. The variation of trans membrane pressure detected that the SRT of 36 days membrane fouling is more than other conditions. Furthermore, was determined the SMP and EPS concentration decreased by increasing SRT. Microorganism counting analysis was also shown that increasing of membrane fouling don't depend to filamentous bacteria and other microbial population.

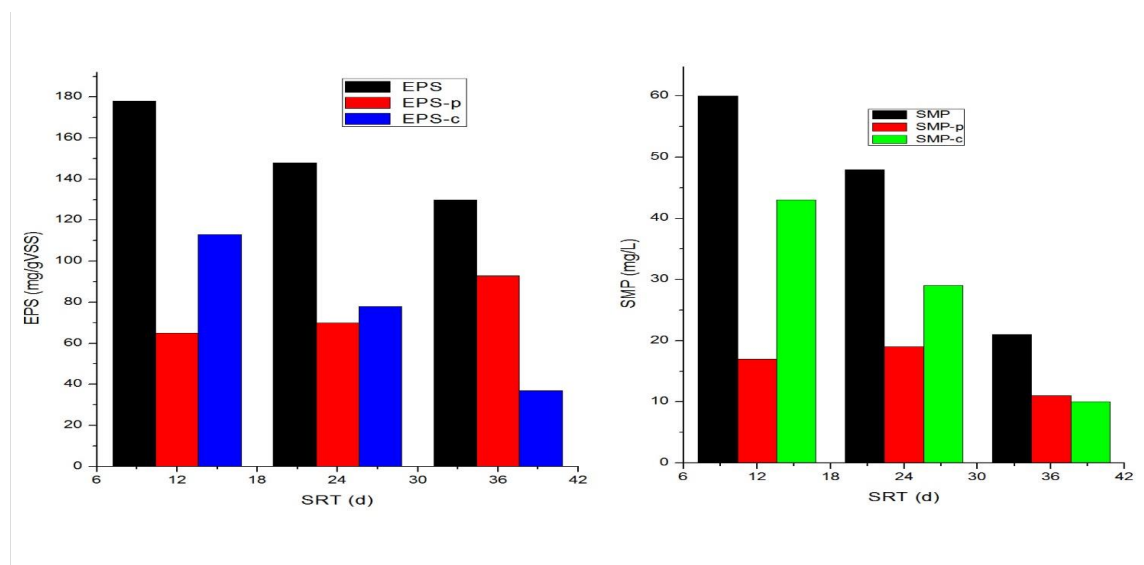


Fig. 2. Variation of SMP and EPS with SRTs

5. References

- Chang I, Lee C, Ahn K, "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system: The effect of floc structure on membrane fouling", *Separation science and technology*, 1999, 34 (9), 1743-1758.
- Federation WE, Association APH, "Standard methods for the examination of water and wastewater", American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 2005.
- Hazrati H, Shayegan J, "Influence of suspended carrier on membrane fouling and biological removal of styrene and ethylbenzene in MBR", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 64, 59-68.
- Hazrati H, Shayegan J, Mojtaba Seyedi S, "The effect of HRT and carriers on the sludge specifications in MBR to remove VOCs from petrochemical wastewater", *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57 (46), 21730-21742.
- Ouyang K, Junxin L, "Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor", *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21 (10), 1329-1335.
- Yuniarto A, Noor ZZ, Ujang Z, Olsson G, Aris A, Hadibarata T, "Bio-fouling reducers for improving the performance of an aerobic submerged membrane bioreactor treating palm oil mill effluent", *Desalination*, 2013, 316, 146-153.
- Zhang X, Bishop PL, Kinkle BK, "Comparison of extraction methods for quantifying extracellular polymers in biofilms", *Water Science and Technology*, 1999, 39 (7), 211-218.