

## مقایسه مشخصات کیفی لجن در فرایند تلفیقی بیوراکتور غشایی رشد چسبیده با بستر شناور و بیوراکتور غشایی متعارف

یوسف رحیمی<sup>۱</sup>، علی ترابیان<sup>۲\*</sup>، ناصر مهرداد<sup>۳</sup>، حسین نایب<sup>۴</sup>

۱، ۲، ۳. تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست  
۴. تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس شهید عباسپور، دانشکده آب و محیط زیست  
(تاریخ تحویل: ۹۳/۰۳/۰۳ - تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۷)

### چکیده

در این تحقیق، مشخصات لجن مازاد حاصل از یک فرایند تلفیقی رشد ثابت با بستر شناور و بیوراکتور غشایی و یک بیوراکتور غشایی متعارف در مقیاس پایلوت بررسی شد و مشخصات کیفی لجن شامل: SVI، غلظت ازت و فسفر در جرم خشک، FI، میزان مصرف پلیمر، درجه تثبیت لجن و غلظت EPS و SMP اندازه‌گیری شد. با در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری مشابه (بار آلی، F/M، HRT، دما و pH) برای راکتورها، تفاوت‌های معناداری در شاخص‌های لجن آن‌ها مشاهده شد. نتایج بیانگر ارتباط مستقیم درجه تثبیت با سن لجن بود و میزان تثبیت لجن فرایند MB-MBR نسبت به فرایند MBR متعارف ۱۵ درصد بیشتر مشاهده شد. بر اساس نتایج، غلظت EPS و SMP در لجن فرایند MB-MBR بالاتر از میزان آن در MBR متعارف بود. همچنین میزان پلی‌الکترولیت مصرفی برای آمایش لجن دو فرایند در محدوده ۴-۵ گرم بر کیلوگرم جامدات لجن بود و تفاوت معناداری میان دو فرایند مشاهده نشد. نتایج این تحقیق نشان داد که تلفیق فرایند رشد چسبیده با بستر شناور و بیوراکتور غشایی، علاوه بر امکان حذف توأم ازت و فسفر، موجب بهبود کیفیت لجن تولیدی از نظر میزان تثبیت و میزان مواد مغذی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بیوراکتور غشایی، رشد چسبیده، شاخص فیلتراسیون، کیفیت لجن، مواد مغذی.

### ۱. مقدمه و هدف

فرایند بیوراکتور غشایی یک فناوری پیشرفته تصفیه فاضلاب است که به صورت موفقیت‌آمیزی در نقاط مختلف جهان استفاده شده است و کاربرد آن رو به گسترش است و دارای مزایای متعددی در مقایسه با روش‌های سنتی تصفیه فاضلاب است [۱]. تعدادی از مزایای این فرایند عبارت است از: کنترل کامل جامدات در راکتور، قابلیت اطمینان، حذف بالاتر مواد آلی و مواد مغذی ازت و فسفر، کیفیت بالای پساب خروجی، بار آلی حجمی بالا، حذف کامل باکتری‌ها و بسیاری از ویروس‌ها، استقلال بیشتر زمان ماند سلولی از زمان ماند هیدرولیکی، تولید لجن کمتر، نیاز به زمین کمتر و ... [۲، ۳،

با توجه به بحران کمبود آب و ضرورت بازیافت پساب و همچنین حفظ محیط زیست، استفاده از فرایندهای پربازده ضروری است. در این راستا، فرایندهای متعددی در حال توسعه‌اند که فرایند بیوراکتور غشایی<sup>۱</sup> مهم‌ترین آن‌هاست. این فرایند ترکیبی از راکتور لجن فعال با فناوری غشا برای جداسازی مواد معلق از آب است. در این فرایند غشا نقش تانک ته‌نشینی ثانویه را بازی می‌کند. با توجه به بازده بسیار زیاد جداسازی توسط غشا، با استفاده از این فناوری عملاً نیازی به واحدهای فیلتراسیون و گندزدایی نخواهد بود.

فرایند MBR حاوی مقادیر بیشتر مواد کلوئیدی، میزان کمتری EPS و مقدار بیشتری میکروارگانیسم‌های رشته‌ای نسبت به لجن فعال متعارف است. به دلیل بالابودن کارایی غشا در تفکیک فاز نسبت به ته‌نشینی، مواد کلوئیدی و همچنین میکروارگانیسم‌های رشته‌ای (اغلب نوع نوکاردیا) بیشتری در راکتور ذخیره می‌شود، اما مواد پلیمری خارج سلولی معمولاً از غشا می‌گذرند. بنابراین غلظت آن در راکتور MBR از راکتور لجن فعال متعارف کمتر است و به دلیل پایین بودن EPS، زمان مکش مویینه در راکتور MBR از راکتور لجن فعال متعارف کمتر است [۱۳].

روزنبرگر و کراوم در سال ۲۰۰۲ خصوصیات فیلترپذیری لجن حاصل از ۸ راکتور MBR و یک راکتور لجن فعال متعارف را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش ویسکوزیته و غلظت EPS لجن، شاخص فیلترپذیری آن کاهش می‌یابد [۱۴].

در این تحقیق، مشخصات لجن مازاد حاصل از یک فرایند تلفیقی رشد ثابت با بستر شناور<sup>۳</sup> و بیوراکتور غشایی متعارف در مقیاس پایلوت بررسی شد و تعدادی از مشخصات لجن شامل: شاخص حجمی لجن، غلظت EPS و SMP<sup>۴</sup> در لجن، شاخص فیلتراسیون، میزان مصرف پلیمر و درجهٔ تثبیت لجن پایش و اندازه‌گیری شد. هدف این تحقیق بررسی میزان فیلترپذیری و مشخصات کیفی لجن برای فراوری در واحدهای بعدی و استفادهٔ مجدد از آن است.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای اجرای این تحقیق دو پایلوت آزمایشگاهی فرایند MBR و MB-MBR از جنس پلکسی گلاس طراحی و ساخته شد (شکل ۱)، همچنین فاضلاب سنتتیک در مخزنی به حجم یک مترمکعب با غلظت معین با افزودن مواد مغذی و ریزمغذی مورد نیاز رشد بیولوژیکی تهیه شد. ترکیب فاضلاب سنتتیک در جدول ۱ ارائه شده است. فاضلاب با استفاده از یک پمپ به راکتور تزریق شده و برای جلوگیری از سرریز و یا کاهش سطح در راکتور، از یک سوئیچ سطح استفاده شد که با کاهش سطح به پمپ فرمان پمپاژ و با افزایش سطح به پمپ فرمان قطع جریان ورودی را می‌داد. محدودهٔ تغییرات سطح جریان در راکتور ۱۰ سانتی‌متر تنظیم شد. ابعاد راکتور ۶۰\*۲۵\*۵۰ سانتی‌متر بود که با ناحیهٔ نصب غشا برای

۴، ۵. همچنین مهم‌ترین محدودیت MBR، کاهش سریع شار خروجی از غشا و گرفتگی آن است.

انسداد در یک غشا عبارت است از: نشست یا تجمع ناخواستهٔ میکروارگانیسم‌ها، کلوئیدها، مواد محلول، ذرات و زائادات سلولی در یا بر غشا [۶]. گرفتگی غشا به صورت افزایش افت فشار در غشا مشاهده می‌شود که متشکل از مقاومت غشا، مقاومت لایهٔ کیک تشکیل‌شده روی غشا و مقاومت در اثر انسداد منافذ است. روش‌های مختلفی برای غلبه بر مشکل گرفتگی مانند استفاده از حباب‌های هوا، شست‌وشوی معکوس و افزودن منعقدکننده‌ها تجربه شده است [۷]، اما این روش‌ها بیشتر بر جلوگیری از نشست لایهٔ کیک یا برداشت از لایهٔ کیک متمرکز شده‌اند، در حالی که راهکار اساسی حذف یا کاهش عامل گرفتگی است [۶]. یکی از راهکارهای کاهش گرفتگی غشا، ایجاد شرایطی برای تغییر مشخصات کیفی لجن برای کاهش پتانسیل انسدادزایی آن است. از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انسداد بیولوژیکی غشا می‌توان به مواردی همچون افزایش میزان پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی<sup>۱</sup> (EPC) [۸]، افزایش نسبت F/M [۹] و ترکیبات حاصل از متابولیسم میکروبی [۱۰] اشاره کرد.

تحقیقات بسیار زیادی بر بحث انسداد غشا انجام گرفته و تعداد زیادی نیز در حال انجام است و تحقیقات فراوانی نیز در خصوص تصفیهٔ فاضلاب و بهینه‌سازی آن در فرایند بیوراکتور غشایی انجام گرفته است، اما مطالعات اندکی بر لجن در این فرایند انجام گرفته است [۱۱].

گوگلیلمی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ درجهٔ فیلترپذیری و آگیری لجن را در یک فرایند بیوراکتور غشایی در مقیاس پایلوت برای تصفیهٔ فاضلاب شهری بررسی کردند و دریافتند که از نظر درجهٔ فیلترپذیری، لجن فرایند MBR با لجن حاصل از فرایند لجن فعال متعارف مشابه است که با استفاده از هاضم هوازی تثبیت شده است [۱۲].

خونگناکرون و همکارانش در سال ۲۰۰۷ اثر مشخصات فیزیکی لجن بر انسداد غشا را بررسی کردند و دریافتند که میزان گرفتگی غشا متأثر از مشخصات لجن از جمله SRT و گرانروی است [۱۱]. مرلو<sup>۲</sup> در رسالهٔ دکتری خود در دانشگاه کالیفرنیا-برکلی مشخصات لجن یک فرایند بیوراکتور غشایی را با فرایند لجن فعال متداول در مقیاس پایلوت بررسی و مقایسه کردند و نتایج این تحقیق بیانگر آن است که لجن

1. Extracellular Polymeric Substances  
3. Moving Bed-Membrane Bioreactor (MB-MBR)

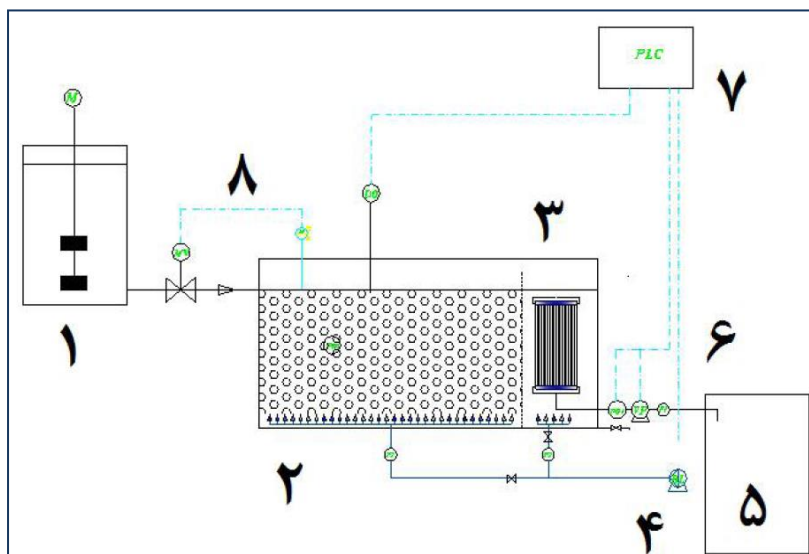
2. Merlo  
4. Soluble Microbial Products

ساعت بر مترمربع بود. برای کاهش انسداد غشا در زیر مدول غشا از یک دیفیوزر هوای طولی به طول ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد که معادل طول غشا بود و هوا به میزان دو مترمکعب در ساعت در زیر غشا تزریق می‌شد. دبی هوا با استفاده از یک فلومتر گاز مدل (AGA, UK) اندازه‌گیری شد. برای جلوگیری از افت شار و انسداد غشا و کاهش تراکم کیک تشکیل‌شده بر سطح غشا، دوره کارکرد آن شامل ۹/۵ دقیقه کارکرد و ۳۰ ثانیه استراحت تنظیم شد. برای تعیین میزان TMP<sup>۲</sup> در غشا در مسیر مکش از یک بارومتر و یک فشارسنج جیوه‌ای برای افزایش دقت استفاده شد که با افزایش میزان TMP تا ۲۵ Kpa غشا از مدار خارج و به روش فیزیکی با فشار آب، لایه کیک لجن تشکیل‌شده از روی غشا تمیز می‌شد و برای حذف انسداد برگشت‌ناپذیر شست‌وشوی شیمیایی با استفاده از خیساندن آن در محلول ۲۰۰ ppm آب ژاول و سپس ۵۰۰۰ ppm محلول اسیداستیک به مدت دو ساعت تمیز کردن شیمیایی غشا صورت می‌گرفت.

جلوگیری از بستر شناور با استفاده از یک صفحه مشبک از راکتور هوادهی جدا شده و عمق جریان در راکتور در محدوده ۳۰-۴۰ سانتی‌متر تنظیم شد.

در یکی از پایلوت‌ها، ۶۰ درصد حجم کل ناحیه راکتور هوادهی با مدیای شناور از جنس پلی پروپیلن و به شکل لانه زنبوری، هریک به قطر ۱۰ میلی‌متر، ارتفاع ۷ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و با سطح ویژه ۳۵۰ مترمربع بر مترمکعب ساخت شرکت جسکو پر شد.

برای جداسازی آب از جامدات معلق مایع مخلوط از یک مدول غشا از نوع لوله توخالی با قطر منافذ ۰/۱ میکرون و از جنس پلی وینیلدن دی فلوراید<sup>۱</sup> و مساحت ۰/۲ مترمربع ساخت شرکت نانوفیلیم استرالیا استفاده شد. به منظور تولید نیروی مکش برای فیلتراسیون جریان، از بین منافذ غشا از هر پایلوت یک دستگاه الکتروپمپ ساخت شرکت Resun مدل 9500A استفاده شد و حداکثر مکش تولیدی برای اجتناب از وارد شدن خسارت به غشا ۳۰ کیلوپاسکال و حداکثر شار عبوری از غشا ۲۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه معادل ۶۰ لیتر بر



شکل ۱. فلودیاگرام پایلوت آزمایشگاهی فرایند MB-MBR

۱. مخزن خوراک، ۲. بخش هوازی MBBR، ۳. بخش غشا، ۴. بلوتر، ۵. مخزن پساب، ۶. پمپ پساب، ۷. تابلو کنترل، ۸. سوئیچ کنترل سطح.

جدول ۱. مشخصات فاضلاب سنتتیک استفاده شده در تحقیق (Guo et al., 2008)

غلظت (mg/L)	فرمول شیمیایی	مواد
		مواد آلی و مغذی:
۵۰-۱۵۰	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	گلوکز
۵۰-۱۵۰	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	ساکاروز
۵۰-۱۵۰	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	نشاسته
۵۰-۱۵۰	NaCOOH	استات سدیم
۵۰-۱۵۰		پودر شیر
۷۲	(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> SO <sub>4</sub>	سولفات آمونیم
۱۳/۲	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	فسفات پتاسیم
		مواد جزئی:
۰/۳۷	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	کلرید کلسیم
۵/۱	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	سولفات منیزیم
۰/۲۷۵	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	کلرید منگنز
۰/۴۵	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	سولفات روی
۱/۴۵	FeCl <sub>3</sub>	فریک کلراید
۰/۴	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	سولفات مس
۰/۴۲	CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	کلرید کبالت
۱/۲۶	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	سدیم مولیبدن دی هیدرات

$Q_w$  = دبی لجن فعال دفعی بر حسب مترمکعب در روز

## ۱.۲. راه اندازی و بهره برداری پایلوت

برای راه اندازی پایلوت از لجن فعال تصفیه خانه فاضلاب شهرک غرب تهران استفاده شد. این لجن شرایط خوبی داشته و حاوی فلوک های درشت لجن و دارای قابلیت ته نشینی مناسب بود. غلظت جامدات معلق لجن ۷۰۰۰ میلی گرم در لیتر و اندیس حجمی آن برابر ۹۴ بود. بهره برداری از راکتور پس از به تعادل رسیدن آن آغاز شد و راکتور پس از هر بار از تغییرات در زمان ماند سلولی، به مدت یک هفته راه اندازی شد. با توجه به اینکه این زمان از حداقل زمان لازم برای دستیابی به شرایط پایدار (یعنی دو برابر سن لجن) کمتر است نتایج گزارش شده مربوط به شرایط پایدار نیستند. در این تحقیق، زمان ماند سلولی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ روز سیستم بهره برداری شد. با توجه به اینکه در راکتور MBR پساب از غشا گذشته و غلظت جامدات معلق در آن تقریباً صفر است و همچنین از آنجا که لجن از محتویات تانک هوادهی حذف می شود، برای محاسبه و ایجاد تغییرات در میزان زمان ماند سلولی از رابطه ۱ استفاده شد:

$$SRT = \frac{V}{Q_w} \quad (1)$$

که در این رابطه:

SRT = زمان ماند سلولی

V = حجم راکتور بر حسب مترمکعب

## ۲.۲. روش اجرای آزمایش ها

آزمایش های MLSS<sup>۱</sup>، MLVSS<sup>۲</sup>، SVI<sup>۳</sup> بر اساس کتاب روش های استاندارد آزمایش های آب و فاضلاب انجام گرفته است [۱۵]. برای تعیین میزان مقاومت در برابر فیلتراسیون، مایع مخلوط در یک قیف بوختر ریخته شد که در کف آن کاغذ صافی (CHMLAB GROUP, Spain F2042 Grade) قرار داشت و توسط یک وکیوم پمپ که در مسیر لوله مکش آن یک بارومتر جیوه ای نصب شده است، عمل جداسازی فاز با نیروی خلأ انجام گرفت. میزان نفوذپذیری<sup>۴</sup> بعد از فیلتراسیون حجم مشخصی از نمونه لجن، زمان مورد نیاز و افت فشار قرائت شد و میزان آن برای آب مقطر نیز اندازه گیری شد و نسبت نفوذپذیری لجن بر آب به عنوان شاخص فیلتراسیون محاسبه شد [۱۶].

فلودیاگرام این سیستم در شکل ۲ ارائه می شود. نفوذپذیری غشا براساس رابطه زیر محاسبه شده است [۱۷]:

$$P = \frac{J}{\Delta P} \quad (2)$$

1. Mixed Liquor Suspended Solids
2. Mixed Liquor Volatile Suspended Solids
3. Sludge Volume Index
4. Permeability

برای اندازه‌گیری میزان EPS ابتدا استخراج به روش فرمالدئید و سود انجام گرفت. به این ترتیب که ابتدا جامدات معلق ۵۰۰ میکرولیتر نمونه لجن توسط سانتریفیوژ RPM ۳۵۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه جداسازی شد و ذرات جداسازی شده در ۵۰۰ میکرولیتر محلول ۸/۵ درصد نمک طعام و ۰/۲۲ درصد فرمالدئید تعلیق شد و به مدت یک دقیقه به شدت مخلوط شد. سپس به این مخلوط ۵۰۰ میکرولیتر، ۰/۵ درصد سود اضافه شد و به مدت یک دقیقه به شدت مخلوط شد. سپس دوباره با RPM ۳۵۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه جداسازی ذرات صورت گرفت و جداسازی جامدات معلق مایع رویی که حاوی SMP بود با مایع رویی مرحله قبل (حاوی SMP) توسط سانتریفیوژ RPM ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. بعد از آن، نمونه‌ها فیلتر شدند که مجموع کربوهیدرات و پروتئین موجود در مایع صاف‌شده برای تعیین میزان EPS لجن در نظر گرفته شد [۱۷، ۱۸]. برای اندازه‌گیری بخش پروتئین از روش بردفورد [۱۹] و برای اندازه‌گیری بخش کربوهیدرات از روش DNS [۲۰] استفاده شد. در این تحقیق، بخش معلق به عنوان EPS گزارش شده است.

### ۳.۲. آنالیز آماری

برای تعیین نحوه ارتباط یا نداشتن رابطه معنی‌دار بین مشخصه‌های کیفی مربوط به شرایط مختلف هر راکتور از ضریب همبستگی پیرسون و برای مقایسه بین دو راکتور با توجه به اینکه دو راکتور از هم مستقل هستند، از آزمون (Mann-Whitney U test) استفاده شده است [۲۱]. همچنین برای تعیین میزان وابستگی و ارتباط بین این مشخصه‌ها از آزمون مربع کای برای نیکویی برازش استفاده شد. خلاصه نتایج آنالیزهای آماری در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

که در این رابطه:

P: نفوذپذیری بر حسب  $L.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$

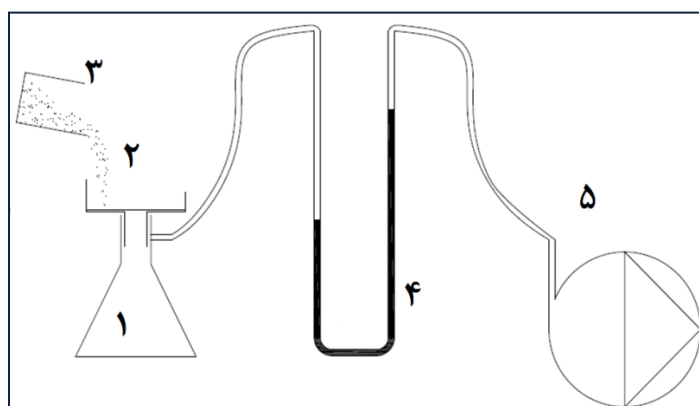
J: شار جریان بر حسب  $L.m^{-2}.h^{-1}$

$\Delta P$ : افت فشار در خط مکش بر حسب bar

آزمایش‌های TN، PO4، TP و COD با استفاده از ویال‌های مخصوص و اسپکتروفوتومتر DR-5000 ساخت شرکت HACH آلمان اندازه‌گیری شد. تعیین میزان اکسیژن محلول به روش الکترودی با استفاده از دستگاه DO متر مدل (MI-65 Martini Instruments) و pH با استفاده از دستگاه (pH meter HACH-Germany) انجام گرفت.

برای تعیین میزان مصرف پلی‌الکترولیت از پلیمر ساخت شرکت (Pro-equipementing CK 4265-USA) استفاده شده است، به این صورت که در غلظت‌های مختلف با استفاده از دستگاه جارست غلظت بهینه تعیین شد.

برای اندازه‌گیری میزان ماده مغذی در ماده خشک لجن، ابتدا برای به دست آوردن مقدار کافی لجن خشک ۲۰۰ سی‌سی از MLSS هر راکتور برداشته شد و با استفاده از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرون و قیف بوخنر و مکش توسط وکیوم پمپ جامدات معلق آن جداسازی و در آون ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت خشک شد. اختلاف وزن کاغذها به عنوان ماده خشک لجن تعیین شد. سپس ماده خشک در ۵۰ سی‌سی آب مقطر حل شد و نیتروژن با روش هضم پرسولفات در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت نیم ساعت و فسفر با روش مولیبدات و هضم با اسید پرسولفات در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت نیم‌ساعت انجام گرفت. سپس غلظت ازت و فسفر لجن توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر DR-5000 به ترتیب در طول موج‌های ۴۱۰ و ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.



شکل ۲. فلودیاگرام سیستم ساخته‌شده برای اندازه‌گیری مقاومت لجن در برابر فیلتراسیون  
۱. ارلن مایر ۲. قیف بوخنر ۳. تغذیه لجن ۴. بارومتر ۵. وکیوم پمپ

### ۳. نتایج و بحث

با توجه به تعدد مشخصه‌ها و برای نمایش و مقایسه بهتر، داده‌ها به صورت نمودارهایی ارائه شده است. در شکل‌های ۳ تا ۶ به ترتیب تغییرات مشخصه‌های VSS/TSS (درجه تثبیت لجن و میزان مصرف پلی‌الکترولیت)، SVI و شاخص فیلتراسیون FI<sup>۱</sup>، غلظت EPS و SMP و میزان ازت و فسفر در لجن ارائه شده است. درجه تثبیت لجن تابع سن لجن و دمای راکتور است، معمولاً برای طراحی هاضم هوازی از حاصل ضرب این دو مشخصه برای تخمین درجه تثبیت استفاده می‌شود [۲۲]. با توجه به اینکه در این تحقیق هضم لجن نبوده است، از راهبری پایلوت در دماهای بیشتر اجتناب شده و دمای راهبری ۲۰ درجه سلسیوس است. ملاحظه می‌شود در دمای ۲۰ درجه و زمان ماند سلولی ۳۵ روز نسبت VSS/TSS در راکتور MBR برابر ۷۱ درصد است که با افزودن مدیای شناور نسبت VSS/TSS ۶۰ درصد حاصل شده است و نسبت به سیستم‌های متداول تصفیه فاضلاب بیشتر است (این نسبت در سیستم‌های متعارف تصفیه فاضلاب بین ۰/۸۶ تا ۰/۹۲ است) [۲۴، ۲۳، ۲۲، ۱]. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، درصد تثبیت با سن لجن رابطه مستقیم دارد که با یافته‌های (Ouyang & Junxin, 2009) مطابقت دارد [۲۵]. به‌علاوه در شرایط یکسان برای هر دو فرایند، درصد تثبیت در راکتور MB-MBR نسبت به راکتور MBR متعارف بیشتر است که این امر ناشی از تثبیت بیشتر بیومس در بیوفیلم به‌خصوص در شرایط انوکسیک و بی‌هوازی است و در راکتور MBR متعارف رخ نمی‌دهد. برای تعیین

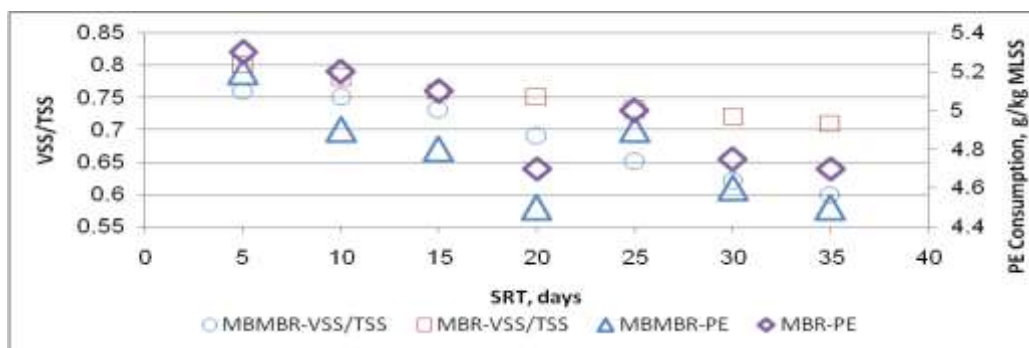
میزان مصرف پلیمر، ۴/۴ - ۵/۴ گرم پلیمر به ازای هر کیلوگرم MLSS استفاده شد. نتایج آنالیز بیانگر نبودن اختلاف معنی‌دار در درجه آمایش لجن هر دو فرایند است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده می‌شود، دوز بهینه برای پلیمر حدود ۴/۵ گرم پلیمر به ازای هر کیلوگرم MLSS در زمان ماند سلولی ۲۰ روز بوده است که نسبت VSS/TSS راکتور MB-MBR در این شرایط به میزان ۵۷ درصد می‌رسد. ارتباط مستقیم بین SVI و شاخص آبیگری لجن بیانگر ارتباط مستقیم درجه آبیگری با میزان ته‌نشین‌پذیری لجن است. فلوک‌های محکم و حاوی مقادیر کم میکروارگانیسم‌های رشته‌ای به‌راحتی فشرده شده و آب کمتری در بین آن‌ها حبس می‌شود، در حالی که در لجن رشته‌ای فلوک‌ها تشکیل پل داده و آب بین آن‌ها حبس می‌شود و درصد آب مویینه و پیوندی نسبت به آب آزاد در آن‌ها بالا رفته که موجب مقاومت بیشتر در برابر آبیگری می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴، ارتباط SVI و شاخص آبیگری لجن در زمان‌های ماند سلولی متفاوت ارائه شده است، بالاتر بودن SVI در راکتور MB-MBR نسبت به سیستم متعارف به دلیل شکسته شدن فلوک‌ها در اثر برخورد با مدیای شناور و رشد میکروارگانیسم‌های رشته‌ای است. هرچند بالاتر بودن SVI در فرایند MBR سبب خروج جامدات از سیستم و تنزل کیفیت پساب خروجی نمی‌شود، شکسته شدن فلوک و رشد میکروارگانیسم‌های رشته‌ای موجب افزایش SMP و EPS در راکتور می‌شود که تأثیر این دو عامل بر انسداد غشا اثبات شده است [۷].

جدول ۲. ضریب همبستگی پیرسون<sup>۲</sup> بین مشخصه‌های لجن در راکتور MBR

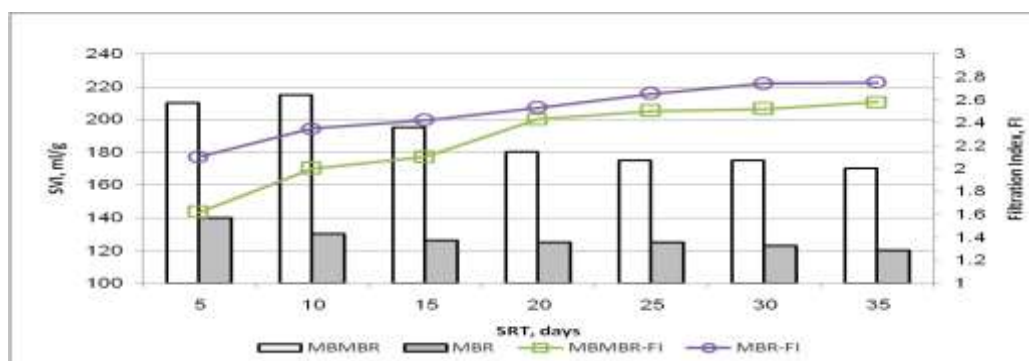
مشخصه‌ها	SVI	VSS/TSS	P-content	N-content	FI	SRT	PE req	bEPS	SMP
SVI	۱/۰	۰/۹۲۱	۰/۱۵۱	-۰/۸۹۰	-۰/۹۴۴	-۰/۸۹۳	۰/۷۷۶	۰/۹۰۹	۰/۸۶۵
VSS/TSS	۰/۹۲۱	۱/۰	۰/۳۰۰	-۰/۸۳۸	-۰/۹۸۷	-۰/۹۹۲	۰/۷۸۷	۰/۹۹۷	۰/۹۳۶
P-content	۰/۱۵۱	۰/۳۰۰	۱/۰	-۰/۲۱۵	-۰/۳۶۸	-۰/۳۲۴	۰/۲۳۲	۰/۳۲۸	۰/۲۸۱
N-content	-۰/۸۹۰	-۰/۸۳۸	-۰/۲۱۵	۱/۰	۰/۸۵۷	۰/۸۶۰	-۰/۸۴۱	-۰/۸۴۱	-۰/۸۰۳
FI	-۰/۹۴۴	-۰/۹۸۷	-۰/۳۶۸	۰/۸۵۷	۱/۰	۰/۹۷۱	-۰/۸۰۳	-۰/۹۸۶	-۰/۹۱۸
SRT	-۰/۸۹۳	-۰/۹۹۲	-۰/۳۲۴	۰/۸۶۰	۰/۹۷۱	۱/۰	-۰/۷۸۵	-۰/۹۹۱	-۰/۹۴۴
PE req	۰/۷۷۶	۰/۷۸۷	۰/۲۳۲	-۰/۸۴۱	-۰/۸۰۳	-۰/۷۸۵	۱/۰	۰/۸۲۱	۰/۵۷۰
bEPS	۰/۹۰۹	۰/۹۹۷	۰/۳۲۸	-۰/۸۴۱	-۰/۹۸۶	-۰/۹۹۱	۰/۸۲۱	۱/۰	۰/۹۱۴
SMP	۰/۸۶۵	۰/۹۳۶	۰/۲۸۱	-۰/۸۰۳	-۰/۹۱۸	-۰/۹۴۴	۰/۵۷۰	۰/۹۱۴	۱/۰

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین مشخصه‌های لجن در راکتور MB-MBR

مشخصه‌ها	SVI	VSS/TSS	P-content	N-content	FI	SRT	PE req	EPS	SMP
SVI	۱/۰	۰/۹۳۲	۰/۸۳۴	-۰/۸۹۴	-۰/۹۲۲	-۰/۹۳۳	۰/۷۴۰	۰/۹۷۷	۰/۸۳۷
VSS/TSS	۰/۹۳۲	۱/۰	۰/۷۳۹	-۰/۹۰۸	-۰/۹۰۶	-۰/۹۸۹	۰/۷۱۳	۰/۹۳۷	۰/۹۴۴
P-content	۰/۸۳۴	۰/۷۳۹	۱/۰	-۰/۸۵۳	-۰/۹۱۹	-۰/۷۷۷	۰/۹۰۱	۰/۷۲۰	۰/۶۰۴
N-content	-۰/۸۹۴	-۰/۹۰۸	-۰/۸۵۳	۱/۰	۰/۹۸۴	۰/۹۵۳	-۰/۸۳۰	-۰/۸۵۴	-۰/۸۸۴
FI	-۰/۹۲۲	-۰/۹۰۶	-۰/۹۱۹	۰/۹۸۴	۱/۰	۰/۹۳۷	-۰/۸۳۹	-۰/۸۶۲	-۰/۸۲۶
SRT	-۰/۹۳۳	-۰/۹۸۹	-۰/۷۷۷	۰/۹۵۳	۰/۹۳۷	۱/۰	-۰/۷۸۳	-۰/۹۳۱	-۰/۹۶۰
PE req	۰/۷۴۰	۰/۷۱۳	۰/۹۰۱	-۰/۸۳۰	-۰/۸۳۹	-۰/۷۸۳	۱/۰	۰/۶۶۲	۰/۶۹۶
EPS	۰/۹۷۷	۰/۹۳۷	۰/۷۲۰	-۰/۸۵۴	-۰/۸۶۲	-۰/۹۳۱	۰/۶۶۲	۱/۰	۰/۸۶۶
SMP	۰/۸۳۷	۰/۹۴۴	۰/۶۰۴	-۰/۸۸۴	-۰/۸۲۶	-۰/۹۶۰	۰/۶۹۶	۰/۸۶۶	۱/۰



شکل ۳. تغییرات درجهٔ تثبیت لجن و میزان پلی الکترولیت مورد نیاز آمایش لجن در دو راکتور



شکل ۴. تغییرات شاخص حجمی لجن و شاخص فیلتراسیون در دو راکتور

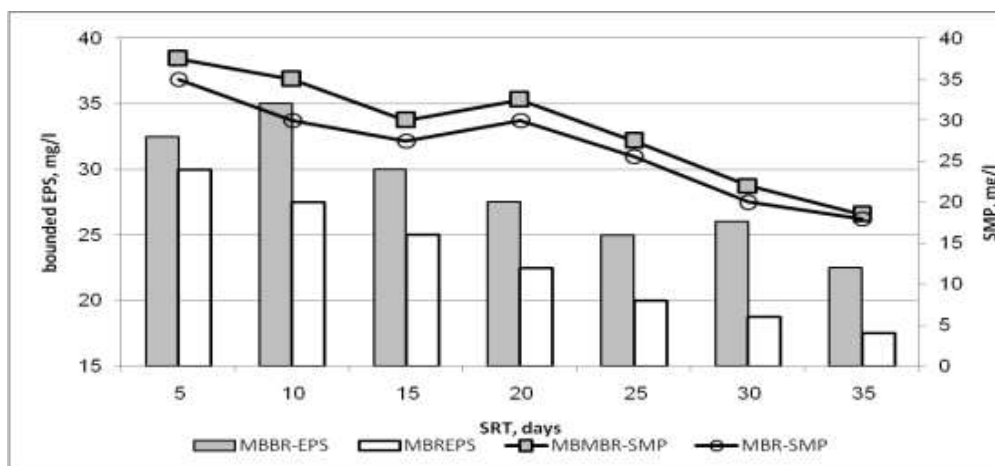
میکروسکوپ، ناشی از بالکینگ رشته‌ای است. یافته‌های (Shuai Yang et al., 2009) بیانگر این مطلب است [۷]. وجود فسفر در منابع آب، مشخصه‌ای نامناسب بوده و علت اصلی اوتریفیکاسیون است، اما وجود آن در لجن- در صورت استفادهٔ مناسب و جلوگیری از زه‌کش شدن آن در منابع آب- به عنوان مادهٔ مغذی برای گیاهان محسوب می‌شود. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در لجن فرایند MB-

ارتباط EPS با شاخص فیلتراسیون ضریب همبستگی بین غلظت EPS و SMP در هر دو راکتور با شرایط یکسان نزدیک یک است و مبین آن است که با افزایش SRT، غلظت این دو مشخصه کاهش می‌یابد. به‌علاوه همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ غلظت EPS و SMP در راکتور MB-MBR بیشتر است که با توجه به بیشتر بودن شاخص حجمی لجن و همچنین مشاهدهٔ تعداد بیشتر باکتری‌های رشته‌ای در زیر

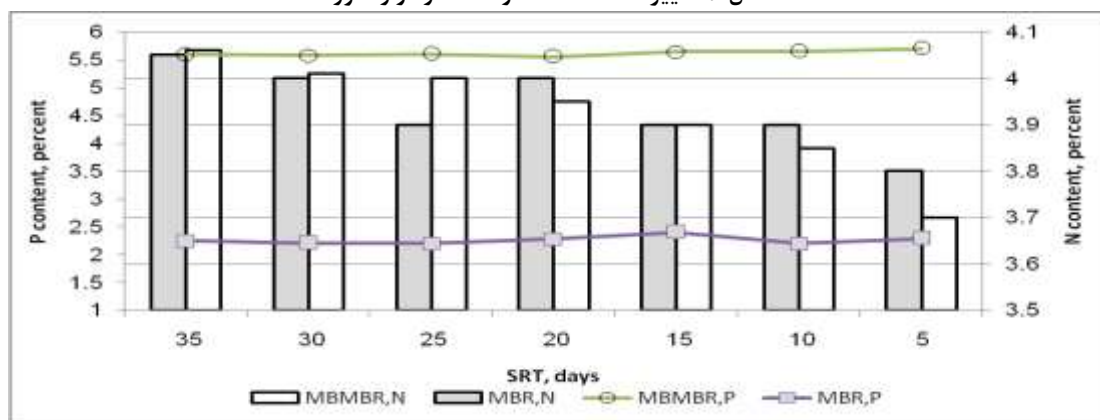
بنابراین میزان حذف فسفر کمتر و ارزش کودی لجن فرایند MBMBR بیشتر خواهد بود.

همچنین مشاهده می‌شود غلظت ازت در لجن فرایند MBMBR با غلظت آن در لجن فرایند MBR متعارف تفاوت معنی‌داری ندارد (میانگین تفاوت نسبت ازت در SRT‌های مختلف ۰/۲ درصد است). هرچند در فرایند MBMBR به دلیل گرادیان اکسیژن در ضخامت بیوفیلم حذف ازت نیز صورت می‌گیرد، بر خلاف فسفر، ازت در بدن باکتری تجمع نمی‌یابد و با عمل دنیتریفیکاسیون به صورت گاز  $N_2$  از راکتور خارج می‌شود.

MBR غلظت فسفر بیشتر است و این امر ناشی از حاکم‌شدن شرایط بی‌هوازی در لایه‌های زیرین بیوفیلم است که در ناحیه بی‌هوازی فسفات آزاد شده و پلی هیدروکسی بوتیرات<sup>۱</sup> در جرم باکتری ذخیره می‌شود و با ریزش بیوفیلم<sup>۲</sup> این باکتری‌ها در داخل راکتور معلق شده و در شرایط هوازی شروع به مصرف PHB می‌کند و به فسفر زیادی از طریق جذب تفننی<sup>۳</sup> در بدن باکتری جذب می‌شود. که در سیستم MBR متعارف که ناحیه بی‌هوازی مجزا قبل از راکتور هوادهی نداشته باشد این سازوکار کمتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۵. تغییرات غلظت EPS و SMP در دو راکتور



شکل ۶. تغییرات غلظت نیترژن و فسفر در جامدات خشک لجن حاصل از دو راکتور

می‌شود (بر اساس تقسیم‌بندی کلاس B لجن برای استفاده مجدد لجن بر اساس رهنمود سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده، باید به منظور دستیابی به این کلاس، ۳۸ درصد از موارد جامد فرار لجن کاهش یابد) [۲۲].

با توجه به گرادیان غلظت اکسیژن در بیوفیلم سیستم MB-MBR، غلظت فسفر و نیترات در لجن آب فرایند MBR

#### ۴. نتیجه‌گیری

لجن مازاد از فرایند تلفیقی رشد ثابت با بستر شناور و بیوراکتور غشایی نسبت به بیوراکتور غشایی متعارف، درجه تثبیت بیشتری دارد که این نسبت حدود ۱۵ درصد بیشتر است و از این نظر، مزیت محسوب شده و موجب تطابق بیشتر کیفیت لجن با الزامات کاهش جذب ناقلان توسط لجن



شناور و بیوراکتور غشایی MB-MBR علاوه بر امکان حذف توأم ازت و فسفر، در بسیاری از مشخصه‌ها موجب بهبود کیفیت لجن تولیدی نیز خواهد شد.

#### تشکر و قدردانی

از آقای دکتر محمدتقی دانشور از شرکت اقلیم دانش برای هدیه غشاهای استفاده‌شده در این تحقیق و آقایان دکتر حبیبی و اکبری از آزمایشگاه تحقیقاتی بیوتکنولوژی پروتئین دانشگاه تهران برای همکاری در اجرای آزمایش‌های این تحقیق سپاسگزاریم.

متعارف بیشتر بود، اما غلظت فسفر در ماده خشک لجن در سیستم MB-MBR بیشتر بوده و غلظت نیترات در ماده خشک لجن در هر دو فرایند تفاوت معناداری نداشت.

با توجه به اثر مخرب فسفر بر منابع آب و اثر مفید آن بر باروری محصولات کشاورزی، این امر مزیتی برای فرایند MB-MBR محسوب می‌شود.

میزان پلی‌الکترولیت مصرفی برای آمایش لجن دو فرایند در محدوده ۴-۵ گرم بر کیلوگرم جامدات لجن متغیر بوده و تفاوت معنی‌داری در بین دو فرایند مشاهده نشد.

نتیجه نهایی اینکه تلفیق فرایند رشد چسبیده با بستر

#### مراجع

- [1]. Metcalf and Eddy, Inc. (2003). "Wastewater Engineering, Treatment and Reuse". 4th Ed. McGraw-Hill, Boston.
- [2]. Gil, J. A., Túa, L., Rueda, A., Montaña, B., Rodríguez, M., Prats, D. (2010). "Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR", *Desalination*, 250 (3), 997-1001.
- [3]. Guo, W. S., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Xing, W. (2008). "Comparison of membrane bioreactor systems in wastewater treatment", *Desalination*, 231 (1-3), 61-70.
- [4]. Lesage, N., Sperandio, M., Cabassud, C. (2008). "Study of a hybrid process: Adsorption on activated carbon/membrane bioreactor for the treatment of an industrial wastewater", *Chemical Engineering and Processing*, 47 (3), 303-307.
- [5]. Miyoshi, T., Tsuyuhara, T., Ogyua, R., Kimuraa, K., Watanabe, Y. (2009). "Seasonal variation in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater", *Water Research*, 43 (20), 5109-5118.
- [6]. Meng, F., Chaeb, S. R., Drewsc, A., Kraumec, M., Shind, H. S., Yang, F. (2009). "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material", *Water Research*, 43 (6), 1489-1512.
- [7]. Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R. (2009). "Comparison Between a Moving Bed Membrane Bioreactor and a Conventional Membrane Bioreactor an Organic Carbon and Nitrogen Removal", *Bioresource Technology*, 100 (8), 2369-2374.
- [8]. Cho, J., Song, K. G., Ahn, K. H. (2005). "The Activated Sludge and Microbial Substances Influences on Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor: Unstirred Batch Cell Test", *Desalination*, 183 (1-3), 425-429.
- [9]. Trussell, R. S., Merlo, R. P., Hermanowicz, S. W., Jenkins, D. (2007). "Influence of Mixed Liquor Properties and Aeration Intensity on Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor at High Mixed Liquor Suspended Solids Concentrations", *Water Research*, 41 (5), 974-958.
- [10]. Fan, F., Zhou, H., Husain, H. (2006). "Identification of Wastewater Sludge Characteristics to Predict Critical Flux for Membrane Bioreactor Processes", *Water Research*, 40 (2), 205-212.
- [11]. Khongnakorn, W., Wisniewski, C., Pottier, L., Vachoud, L. (2007). "Physical properties of activated sludge in a submerged membrane bioreactor and relation with membrane fouling", *Separation and Purification Technology*, 55 (1), 125-131.
- [12]. Guglielmi, G., Chiarani, D., Saroj, D. P., Andreottola, G. (2009). "Sludge filterability and dewaterability in a membrane bioreactor for municipal wastewater treatment", *Desalination*, 250 (2), 660-665.

- [13]. Merlo, R. P. (2004). "Properties Affecting the Solids Processing of Sludges from the Submerged Membrane Bioreactor and Activated Sludge Process", Department of Graduate Division, Vol. PhD, University of California, Berkley, Berkley, California.
- [14]. Rosenberger, S., Kraume, M. (2002). "Filterability of activated sludge in membrane bioreactors", *Desalination*, 146 (1-3), 373-379.
- [15]. APHA., AWWA., WEF. (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation) (1998). "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th Ed, APHA, Washington, DC.
- [16]. Al-Halbouni, D., Traberb, J., Lykoc, S., Wintgensc, T., Melin, T., Tacked, D., Janote, A., Dotta, W., Hollender, J. (2008). "Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena", *Water Research*, 42 (6-7), 1475-1488.
- [17]. Judd, S., C., Judd. (2006). "The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment", First ed. Elsevier Ltd., AMSTERDAM.
- [18]. Ahmed, H. (1959). "Principles and reactions of protein extraction, purification, and characterization", CRC press, Boca Raton.
- [19]. Bradford, M. M. (1976). "A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Rotein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding", *Analytical Biochemistry*, 72 (1-2), 248-254.
- [20]. Miller, G. L. (1959). "Use of Dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing suger", *Analytical Chemistry*, 31(3), 426-428.
- [21]. Berthouex, P. M., Brown, L. C. (2002). "Statistics for Environmental Engineers", Lewis Publishers, 2nd Ed, Boca Raton.
- [22]. Turovskiy, I. S., Mathai, P. K. (2006). "Wastewater Sludge Processing", John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- [23]. McFarland, J. M. (2001). "Biosolids Engineering", McGraw Hill, Inc., New York ISBN.
- [24]. Wang, L. K., Shammas, N. K., Hung, Y. T. (2007). "Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Processes", Vol. 6, Humana Press Inc. Totowa, New Jersey
- [25]. Ouyang, K., LIU, J. (2009). "Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor", *Journal of Environmental Sciences*, 21(10), 1329-1335.