

مقایسه کارایی راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و لجن فعال متعارف در تصفیه پساب های صنعتی آلوده به پروپیلن گلیکول

مهدی فرزاد کیا^۱

روشنک رضایی کلانتری^۲ (مسئول مکاتبات)

roshanak_rezaeilalantari@yahoo.com

سید غلامرضا موسوی^۳

سهند جرفی^۴

میترا غلامی^۲

تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۱۰

پروپیلن گلیکول یک ترکیب شیمیایی آلی است که کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف داشته و انتشار آن به محیط زیست اثرات بهداشتی و زیست محیطی مضر در پی دارد. فرایند لجن فعال بستر ثابت یکی از انواع فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب به شمار می رود که از جمله مزایای آن می توان به غلظت بالای توده میکروبی ، امکان تصفیه میزان جریان بیشتر یا بازده بالاتر در میزان جریان مشابه فرایندهای رشد معلق اشاره نمود. هدف از این مطالعه مقایسه اثر تغییرات بار آلی بر بازده حذف بیولوژیکی پروپیلن گلیکول در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و راکتور لجن فعال متعارف بوده است. جهت دستیابی به هدف فوق در فاز اول سیستم طی چهار مرحله با زمان های ماند ۸ ، ۶ ، ۴ و ۲ ساعت و غلظت پروپیلن گلیکول ورودی 500 mg/l و در فاز دوم سیستم در زمان ماند ثابت ۶ ساعت و غلظت های پروپیلن گلیکول ورودی ۱۰۰۰ ، ۱۵۰۰ ، ۲۰۰۰ و 2500 mg/l مورد بهره برداری قرار گرفت. بازده حذف پروپیلن گلیکول در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت نسبت به راکتور لجن فعال متعارف در زمان ماند های ۸ ، ۶ ، ۴ و ۲ ساعت به ترتیب ۱۴/۶ ، ۲۴/۵ ، ۴۱/۱۶ و ۵۷/۶٪ بیشتر از راکتور لجن فعال متعارف بوده است. در مرحله دوم بازده راکتور لجن فعال بستر ثابت در غلظت های ۱۰۰۰ ، ۱۵۰۰ ، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ به ترتیب ۱۹/۸ ، ۳۳/۸ ، ۳۹/۴۵ و ۲۵/۹۶٪ بیشتر از راکتور لجن فعال متعارف بوده است. با توجه به داده های حاصل از انجام پژوهش می توان نتیجه گیری کرد که راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت دارای برتری قابل ملاحظه ای بر راکتور لجن فعال متعارف می باشد.

واژه های کلیدی: بار آلی - پروپیلن گلیکول - تصفیه بیولوژیکی - رشد چسبیده - لجن فعال

۱- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران

۳- استادیار، گروه بهداشت محیط و حرفه ای، دانشکده علوم پزشکی ، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشجوی Ph.D گروه بهداشت محیط و حرفه ای ، دانشکده علوم پزشکی ، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

پروپیلن گلیکول کاربرد گسترده ای در صنایع بهداشتی و آرایشی، دارویی، مواد غذایی و صنایع شیمیایی دارد. این ترکیب می تواند منجر به آثار پوستی نظیر اریتما، تحریک پذیری پوستی، ادم پوستی و آثار سیستمیک نظیر کاهش هموگلوبولین، کاهش هماتوکریت ها و اریتروسیت ها، کاهش گلوبول های سفید خون و لنفوسیت ها در زنان، کوچک شدن کلیه و افزایش و کاهش وزن بدن به خارج از محدوده طبیعی شود (۱، ۲، ۳و۴).

پروپیلن گلیکول پس از ورود به محیط نهایتاً به آب های زیر زمینی راه یافته و منجر به آلودگی آن ها می شود و با در آب های سطحی به شدت اکسیژن محلول در دسترس جانوران و گیاهان آب زی را مصرف نموده و شرایط نامناسبی در اکوسیستم آبی ایجاد می کند. همچنین بخش قابل توجهی از آن وارد زمین شده و محیط زیست و به ویژه خاک های محل را آلوده می کند (۵، ۶ و ۷). تاکنون مطالعات گوناگونی در زمینه حذف بیولوژیکی پروپیلن گلیکول به روش های مختلف هوازی و بی هوازی انجام گرفته است (۸). در یک پژوهش Agnieszka and etal تجزیه بیولوژیکی پروپیلن گلیکول را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از قابلیت تجزیه پذیری بسیار بالای پروپیلن گلیکول به وسیله زنجیره های مختلف باکتریایی بود (۹). Joanna and etal تجزیه بیولوژیکی پروپیلن گلیکول را به عنوان تنها منبع کربن در یک فرایند هوازی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که پروپیلن گلیکول به کتون و آلدئید تجزیه می شود (۱۰). Agnieszka and etal در مطالعه دیگری اکسیداسیون بیولوژیکی پروپیلن گلیکول را در شرایط هوازی مورد پژوهش قرار دادند. آن ها دریافتند که پروپیلن گلیکول ذاتاً تجزیه پذیر است و پس از فراتر رفتن از حد آستانه ۱۰ mg/L آثار سمی شدیدی بر روی لجن فعال دارد. احتمالاً تجمع متابولیت ها بر روی لجن فعال دلیل اصلی بروز این اثرات سمی می باشد (۱۱). بررسی های صورت گرفته نشان می دهد که مطالعه ای در

زمینه حذف این ترکیب در راکتورهای تلفیقی دارای رشد معلق و چسبیده انجام نگرفته است. تا کنون فرایندهای بیولوژیکی هوازی به صورت گسترده ای در دو دسته کلی رشد معلق و رشد چسبیده جهت حذف مواد آلی از فاضلاب ها مورد استفاده قرار گرفته است. از میان فرایندهای رشد معلق، فرایند لجن فعال به دلیل ویژگی های خاص خود نظیر مؤثر بودن، بازده بالاتر، عدم تجمع حشرات و مشکلات کمتر بو، بیش از سایر روش ها گسترش یافته است. اما این روش نیز در طول زمان با مشکلاتی در بهره برداری مواجه شده است. از جمله این مشکلات می توان به آسیب پذیری در برابر شوک های آلی و هیدرولیکی، بازده نامناسب در غلظت های بالا و هزینه های بالای مربوط به تأمین برق، اکسیژن و فضای فیزیکی مورد نیاز زیاد اشاره کرد (۱۲ و ۱۳). یکی از روش های حل این معضلات کاربرد فرایندهای تلفیقی رشد معلق - رشد چسبیده یا فرایندهای بیوفیلمی است. فرایندهای مبتنی بر فیلم میکروبی یکی از انواع فرایندهای بیولوژیکی تصفیه فاضلاب به شمار می رود که در آن ها از میکروب های رشد یافته بر روی یک بستر، جهت زدایش آلاینده ها استفاده می شود (۱۴ و ۱۵). از ویژگی های این سیستم ها می توان به غلظت بالای توده میکروبی، امکان استفاده از بسترهای ارزان قیمت، امکان تصفیه میزان جریان بیشتر یا بازده بالاتر در میزان جریان مشابه فرایندهای رشد معلق اشاره نمود (۱۶ و ۱۷). همچنین امکان تصفیه مؤثر فاضلاب های دارای غلظت مواد آلی کم، قابلیت حذف و تصفیه مواد آلی دارای سرعت تجزیه کم، پایداری در برابر شوک های آلی و هیدرولیکی وارد شده به سیستم، فضای مورد نیاز کمتر و انرژی مصرفی کمتر، امکان رشد میکروارگانیسم های دارای بازده رشد پایین و تولید پسابی با کیفیت بهتر همگی از خصوصیات این سیستم ها می باشد که کاربرد آن ها را روز افزون تر نموده است (۱۸ و ۱۹).

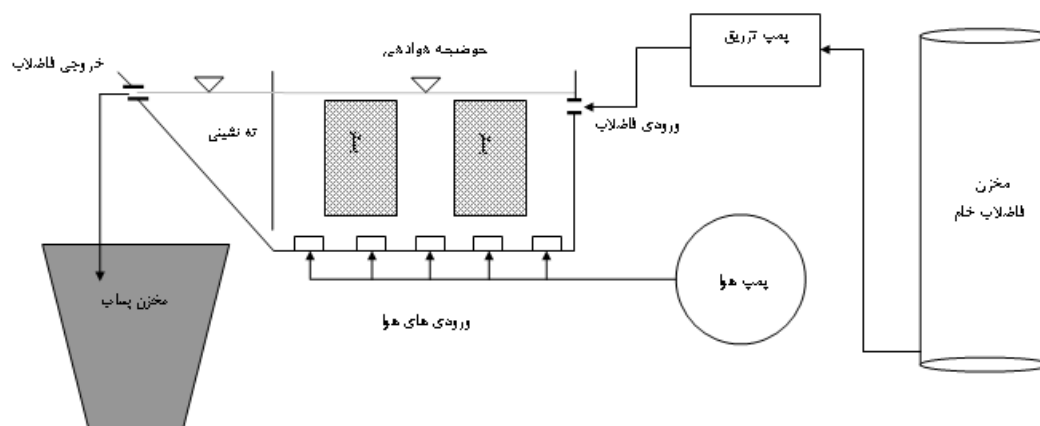
هدف از این مطالعه اثر تغییرات بار آلی بر بازده حذف بیولوژیکی پروپیلن گلیکول در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و راکتور لجن فعال متعارف می باشد.

مواد و روش ها

۱- راکتور های مقیاس آزمایشگاهی

۱-۱-۲ ساختار راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت

راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت در این مطالعه شامل یک مخزن مکعبی شکل از جنس پلاکسی گلاس و به حجم ۱۲ لیتر بود که ۹ لیتر آن به قسمت هوادهی اختصاص داشت. حجم حوضچه ته نشینی ۳ لیتر در نظر گرفته شده بود که از طریق یک دیواره با شیب قائم نسبت به افق از قسمت هوادهی جدا شده بود. قسمت پایینی این دیواره دارای ۰/۵ سانتی متر فاصله از کف بود که به منظور برگشت پیوسته لجن ته نشین شده در حوضچه ته نشینی به وسیله نیروی مکش ناشی از هوادهی های واحد هوادهی مورد استفاده قرار می گرفت. همچنین ۲۵٪ از حجم حوضچه هوادهی به وسیله یک مدیا تجاری ویژه به نام لانه زنبوری^۱ از جنس پلی استایرن با سطح ویژه^۲ m^2 / m^3 ۶۵۰ پر شده بود که در ۲ محفظه جداگانه (هر کدام به حجم ۱/۱۲۵ لیتر) در ابتدا و انتهای حوضچه هوادهی با فاصله ۴ cm از دیواره های جانبی جاگذاری شده بودند که بستر رشد میکروبی را تأمین می کردند. این سیستم توسط یک پمپ آکواریومی هوا به ظرفیت هوادهی حداکثر ۱۴ لیتر در دقیقه هوادهی می شد. هوای مورد نیاز با توجه به بار آلی ورودی به راکتور در محدوده ۲/۵ تا ۱۲/۵ لیتر در دقیقه تنظیم می گردید. عمل اختلاط در این سیستم با کمک جریان هوای ورودی انجام می پذیرفت. فاضلاب ورودی به وسیله یک پمپ تزریق جریان با ظرفیت ۲۰ لیتر در ساعت به راکتور تزریق می شد. کل مجموعه در دمای اتاق (۲۵-۲۰ درجه سانتی گراد) راهبری می گردید. شکل ۱ نمایی از راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت مورد استفاده در این مطالعه را به همراه متعلقات مربوط نشان می دهد.



شکل ۱ - نمای شماتیک راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت رشد میکروبی

۲-۱- ساختار راکتور لجن فعال متعارف

راکتور لجن فعال متعارف به لحاظ مشخصات فیزیکی، ابعاد، جنس و متعلقات دقیقاً مشابه راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت بود. تنها تفاوت این دو راکتور فقدان بستر رشد میکروبی در راکتور لجن فعال متعارف بوده است.

۲- راه اندازی سیستم

به منظور راه اندازی راکتور و تأمین میکروارگانیسم های مورد نیاز آن، ۹ لیتر لجن از خط لجن برگشتی تصفیه خانه فاضلاب شهری شهرک غرب تهران به راکتور منتقل شد. سیستم تصفیه خانه مذکور لجن فعال متعارف می باشد. سیستم به مدت ۴ هفته به صورت ناپیوسته مورد راهبری قرار گرفت و در این مدت هوادهی به منظور تأمین اکسیژن محلول به میزان ۲-۱ mg/L انجام می یافت. سیستم در ابتدا بر مبنای COD محلول ۵۰۰ mg/L راه اندازی شد که ۴۰۰ mg/L از آن ناشی از گلوکز و ۱۰۰ mg/L از پروپیلن گلیکول بود. در طول یک ماه به تدریج از میزان COD ناشی از گلوکز کاسته و به COD ناشی از پروپیلن گلیکول افزوده شد. معیار افزایش نسبت پروپیلن گلیکول به گلوکز، افزایش ۵۰٪ی حذف COD مجموع در نسبت گلوکز به پروپیلن گلیکول اعمال شده بود. پس از گذشت ۲۸ روز از راه اندازی سیستم، کل منبع کربن ورودی به سیستم تنها از طریق پروپیلن

گلیکول تأمین می شد. از این زمان و پس از ۱۱ روز غلظت پروپیلن گلیکول خروجی به کمتر از ۲۰ mg/L کاهش یافت که نشانگر توانایی میکروارگانیسم های موجود در راکتور جهت تجزیه پروپیلن گلیکول بود. پس از دستیابی به شرایط پایدار در حالت راهبری ناپیوسته، جریان را پیوسته کرده و راهبری در غلظت ثابت و زمان ماند های مختلف آغاز شد. در این پژوهش شرایط پایدار به صورت فقدان بیش از ۵٪ تغییرات در پارامترهای مورد بررسی پساب خروجی طی ۷ تا ۱۰ روز راهبری متوالی راکتور تعریف شد. ترکیب فاضلاب ساختگی حاوی پروپیلن گلیکول در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- ترکیب فاضلاب ساختگی مورد استفاده در هوادهی و غنی سازی میکروارگانیسم های تجزیه کننده پروپیلن گلیکول برای غلظت پروپیلن گلیکول ورودی ۵۰۰ mg/l

نوع ترکیب	مقدار مورد نیاز در یک لیتر آب شهر
$C_3H_8O_2$	۶ میلی لیتر
NH_3Cl	۲۸ میلی گرم
KH_2PO_4	۵/۶ میلی گرم
Na_2CO_3	۰/۸ گرم
عناصر جزئی	۱ میلی لیتر

۳- مراحل راهبری سیستم

جهت مقایسه عملکرد راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و راکتور لجن فعال متعارف در حذف پروپیلن گلیکول در غلظت های بالا و شرایط مختلف بهره برداری، در فاز اول سیستم طی ۴ مرحله با زمان های ماند ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت و غلظت پروپیلن گلیکول ورودی ۵۰۰ mg/L مورد بهره برداری قرار گرفت (بار آلی $\text{KgPPG/m}^3 \cdot \text{d}$ ۶ - ۱/۵). پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت پروپیلن گلیکول، VSS، دما، اکسیژن محلول و pH تا زمان دستیابی به شرایط پایدار (فقدان بیش از ۵٪ تغییر در غلظت پروپیلن گلیکول خروجی) مورد پایش قرار گرفت. دستیابی به شرایط پایداری در هر مرحله حدوداً سه هفته به طول انجامید. در مرحله بعدی و با توجه به

نتایج حاصل از مرحله اول، راکتور در زمان ماند ثابت ۶ ساعت و غلظت های پروپیلن گلیکول ورودی ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ mg/L (بار آلی $\text{KgPPG/m}^3 \cdot \text{d}$ ۱۰-۴) مورد بهره برداری قرار گرفت. در این مرحله نیز پارامترهای مورد نظر تا زمان دستیابی به شرایط پایدار مورد پایش قرار گرفت. متغیرهای مورد مطالعه شامل بار آلی در گستره kg PPG/m^3 ۱۰-۱/۵، زمان ماند هیدرولیکی در محدوده ۲ تا ۸ ساعت و غلظت پروپیلن گلیکول در محدوده ۲۵۰۰ - ۵۰۰ mg/L مورد بررسی قرار گرفت. شرایط راهبری سیستم در جدول ۲ به صورت خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۲- شرایط راهبری راکتورهای مورد مطالعه

مرحله راهبری	غلظت پروپیلن گلیکول (mg/L)	زمان ماند هیدرولیکی (h)	میزان جریان (l/h)	بار آلی ($\text{Kg PPG/m}^3 \cdot \text{d}$)
۱	۵۰۰	۸	۱/۱۲۵	۱/۵
۲	۵۰۰	۶	۱/۵	۲
۳	۵۰۰	۴	۲/۲۵	۳
۴	۵۰۰	۲	۴/۵	۶
۵	۱۰۰۰	۶	۱/۵	۴
۶	۱۵۰۰	۶	۱/۵	۶
۷	۲۰۰۰	۶	۱/۵	۸
۸	۲۵۰۰	۶	۱/۵	۱۰

۴- روش های آزمایشگاهی

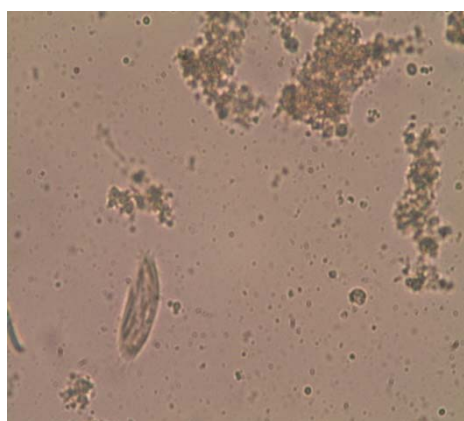
غلظت COD به روش رفلکس برگشتی باز، اکسیژن محلول به روش یدومتری وینکلر، VSS به روش وزن سنجی، SVI به روش ستون ته نشینی (۲۰)، دما به وسیله ترمومتر و pH به روش الکترومتری اندازه گیری می شد. pH سیستم به وسیله یک pH متر دیجیتال با مارک Hack به طور دائم

اندازه گیری و در صورت کاهش و یا افزایش به خارج از محدوده مجاز (۷/۵ - ۷) به وسیله بی کربنات سدیم (جوش شیرین) تعدیل می گردید. غلظت پروپیلن گلیکول به وسیله دستگاه HPLC سنجش می شد. در این مطالعه استخراج پروپیلن گلیکول به روش مایع - مایع و با استفاده از استونیتریل انجام پذیرفت. سپس به کمک ۱- نفتیل ایزوسیانات مشتق گردیده و

در نهایت به کمک HPLC مجهز به ستون C_{18} در طول موج ۲۲۲ نانومتر اندازه گیری شد (۱۰).

نتایج

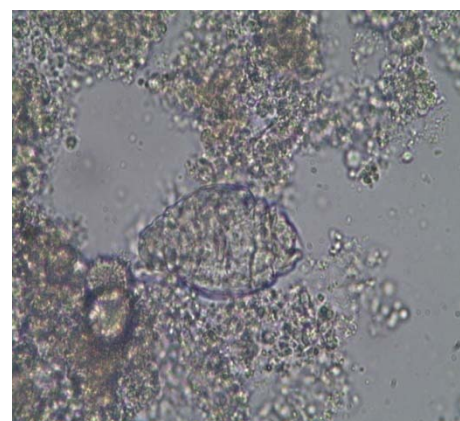
در این بخش نتایج حاصل از بارگذاری راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و لجن فعال متعارف با در نظر گرفتن اثر زمان ماند هیدرولیکی و تأثیر غلظت پروپیلن گلیکول ورودی بر عملکرد این دو راکتور ارایه شده است. به منظور آگاهی از رشد باکتری های رشته ای و آگاهی از عملکرد مطلوب سیستم، تصاویر میکروسکوپی فلاک های باکتریایی به صورت معمول تهیه می شد که نمونه هایی از آن در شکل ۲ نشان داده شده است. این تصاویر حاکی از حضور مجموعه های غنی باکتریایی غنی، پروتوزئرها چسبیده و معلق و روتیفرها بود. پروتوزئرها موجود در مایع مخلوط با تغذیه از باکتری های پراکنده نقش مهمی در زلال سازی پساب خروجی ایفا می کردند.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی میکروارگانیسم های موجود در مایع مخلوط (شامل فلاک های باکتریایی ، پروتوزئرها و روتیفر)

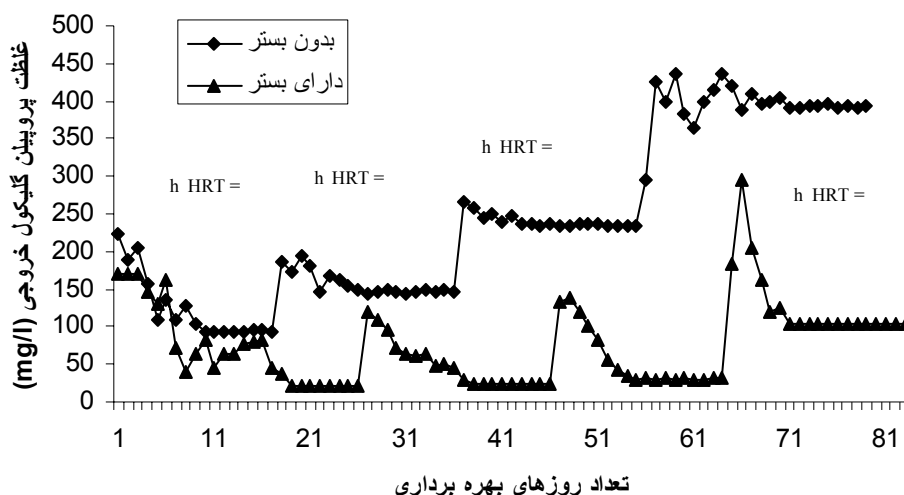
۱- بارگذاری در اثر تغییر زمان ماند هیدرولیکی

بار آلی در این مرحله از طریق کاهش زمان ماند هیدرولیکی ورودی از ۱/۵ به 6 kg PPG/m^3 افزایش داده شد. روند تغییرات بازده حذف پروپیلن گلیکول در هر یک از زمان ماندهای هیدرولیکی ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت برای هر دو راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت و لجن فعال متعارف در شکل ۳ نشان داده شده است. راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت به طور میانگین پس از گذشت ۷ تا ۱۶ روز به شرایط پایداری رسید که میانگین غلظت پروپیلن گلیکول خروجی در زمان ماندهای هیدرولیکی ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت به ترتیب ۲۰/۷ (انحراف معیار



(± 0.92) ، 147 (انحراف معیار ± 0.69)، 214 (انحراف معیار ± 0.73) و $394/5$ mg/L (انحراف معیار ± 1.53) بوده است. با توجه به داده های به دست آمده، مشخص می شود که بازده حذف پروپیلن گلیکول به موازات کاهش زمان ماند هیدرولیکی کاهش یافته است که این کاهش در راکتور لجن فعال متعارف نسبت به راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت مشهود تر است.

(± 0.57) ، $24/4$ (انحراف معیار ± 0.52)، $30/2$ (انحراف معیار ± 1.13) و $104/6$ mg/L (انحراف معیار ± 0.48) بوده است. در این مرحله روند دستیابی به شرایط پایدار در راکتور لجن فعال متعارف در گستره ۷ تا ۱۸ روز بوده است. میانگین غلظت پروپیلن گلیکول خروجی در شرایط پایدار و در زمان ماند های ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت به ترتیب 94 (انحراف معیار



شکل ۳ - بازده حذف پروپیلن گلیکول در زمان های ماند ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت

و غلظت ورودی 500 mg/l

می دهد. راکتور در این مرحله دارای بازده حذف $81/2\%$ می باشد که غلظت خروجی آن بر حسب COD معادل 155 است که فراتر از استاندارد تخلیه به منابع پذیرنده به میزان 100 mg/L است (۲۱ و ۲۲). به طور قطع در زمان ماند های هیدرولیکی کمتر، با توجه به کاهش بازده حذف و افزایش غلظت خروجی، کیفیت پساب به لحاظ دستیابی به استانداردهای تخلیه به منابع پذیرنده نامطلوب تر می باشد. با مقایسه نتایج حاصل از راهبری این دو راکتور در شرایط یکسان می توان نتیجه گیری کرد که راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت دارای عملکرد بسیار مطلوب تری در مواجهه با بار آلی بالا در اثر بارگذاری با کاهش زمان ماند هیدرولیکی می باشد. میانگین نتایج سایر متغیرهای بهره برداری در شرایط پایدار در جدول ۳ نشان داده شده است.

راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت در زمان ماند هیدرولیکی ۴ ساعت دارای بازده بیش از 93% و غلظت پروپیلن گلیکول خروجی کمتر از 35 mg/L بود. COD معادل این مقدار پروپیلن گلیکول 58 mg/L است که در محدوده استاندارد پساب خروجی صنعتی برای تخلیه به منابع پذیرنده قرار دارد (۲۱ و ۲۲). اما در زمان ماند کمتر از ۴ ساعت و مشخصاً در زمان ماند ۲ ساعت، بازده راکتور به شکل ناگهانی افت کرده و به کمتر از 80% رسید. این امر به معنای تخلیه 104 mg/L پروپیلن گلیکول در پساب خروجی است که با توجه به غلظت ورودی معادل 800 mg/L بر حسب COD قابل قبول نبوده و قادر به تأمین استانداردهای پساب خروجی نمی باشد. در مورد راکتور لجن فعال متعارف، عدول از استانداردهای تخلیه به منابع پذیرنده از زمان ماند ۸ ساعت رخ

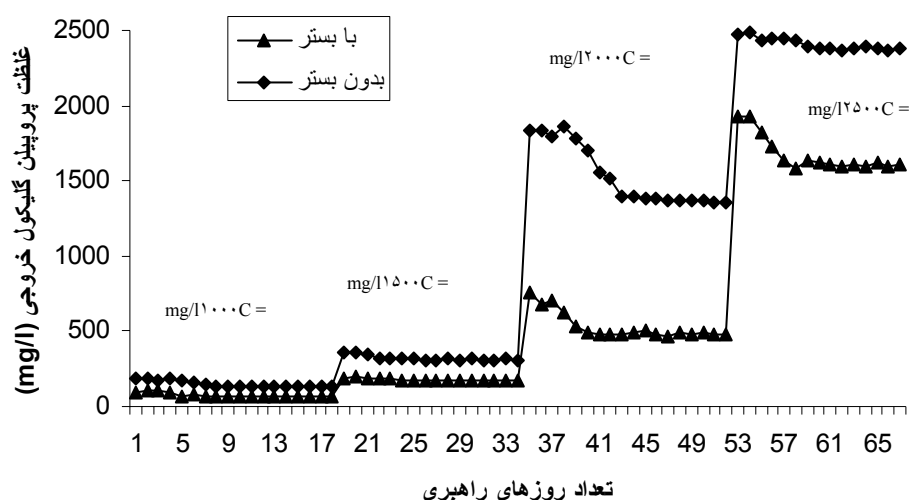
جدول ۳- متغیرهای بهره برداری در مرحله تغییر بار آلی از طریق تغییر زمان ماند هیدرولیکی

لجن فعال متعارف			لجن فعال دارای بستر ثابت			زمان ماند هیدرولیکی (hr)
DO (mg/L)	SVI (mL/g)	VSS (mg/L)	DO (mg/L)	SVI (mg/L)	VSS (mg/L)	
۱/۳	۷۶	۲۳۰۸	۳/۲	۱۳۳	۱۸۸۵	۸
۱/۳	۶۸	۲۲۷۰	۳/۶	۱۱۷	۱۹۰۱	۶
۱/۴	۷۴	۲۳۴۰	۴/۰۶	۱۶۰	۱۸۲۱	۴
۱/۳	۸۳	۲۳۳۹	۳/۱۵	۱۷۹	۱۸۲۲	۲

۲- اثر بارگذاری با تغییر غلظت ورودی

در مرحله دوم و بنا بر نتایج مرحله اول، زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت به عنوان زمان ماند بهینه جهت افزایش غلظت پروپیلن گلیکول ورودی انتخاب گردید. بیشترین بازده حذف پروپیلن گلیکول در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت مربوط به زمان ماندهای هیدرولیکی ۸ و ۶ ساعت با مقادیر $95/86$ و $95/12$ ٪ بوده است. همچنین بازده حذف در راکتور لجن فعال متعارف در زمان ماندهای مشابه به ترتیب $81/2$ و $70/6$ ٪ بوده است. پس از انجام آنالیز آماری T test با P value برابر $0/05$ مشخص گردید که اختلاف بازده این دو مقدار معنی دار نبوده و از سویی در زمان ماند ۶ ساعت امکان اعمال بار آلی بیشتری به سیستم وجود دارد. همچنین در زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت، سایر پارامترهای بهره برداری نظیر VSS، SVI و اکسیژن محلول در مقایسه با زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت در محدوده مناسب تری قرار داشتند (جدول ۲). میانگین VSS، SVI و اکسیژن محلول در شرایط پایداری در زمان ماند ۶ ساعت به ترتیب 1901 mg/L ، 117 mL/g و $3/6 \text{ mg/L}$ بوده است. لذا با در نظر گرفتن همه موارد فوق، زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت به عنوان زمان ماند بهینه جهت بررسی اثرات بار آلی با تغییر غلظت ورودی انتخاب گردید.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در این مرحله غلظت پروپیلن گلیکول ورودی پارامتر تعیین کننده بوده و به موازات افزایش غلظت ورودی بازده حذف کاهش یافته است. غلظت های ورودی در این مرحله به ترتیب ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و 2500 mg/L بوده است. غلظت پروپیلن گلیکول خروجی در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت در غلظت های مذکور به ترتیب $70/5$ (انحراف معیار $\pm 0/71$)، $171/9$ (انحراف معیار $\pm 0/36$)، 481 (انحراف معیار $\pm 1/02$) و $1607/75 \text{ mg/L}$ (انحراف معیار $\pm 0/83$) بوده است. بنابراین راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت تا غلظت پروپیلن گلیکول ورودی 1500 mg/L دارای بازده بالای ۸۸٪ بود. با فراتر رفتن غلظت پروپیلن گلیکول ورودی بازده سیستم به سرعت افت کرده و در غلظت 2500 mg/L به $35/69$ ٪ می رسد. این امر به معنای تخلیه 1607 mg/L پروپیلن گلیکول در پساب خروجی است که قابل قبول نبوده و با قاطعیت می توان اظهار کرد که راکتور در غلظت پروپیلن گلیکول معادل 2500 mg/L دچار اختلال شدید شده و عملاً بدون بازده بوده است.



شکل ۴- بازده حذف پروپیلن گلیکول در غلظت های ورودی ۱۰۰۰-۲۵۰۰ mg/l و زمان ماند هیدرولیکی ثابت ۶ ساعت

(C = غلظت پروپیلن گلیکول ورودی)

بستر ثابت بوده است. بازده حذف راکتور لجن فعال متعارف در بهترین حالت و در غلظت پروپیلن گلیکول ۱۰۰۰ mg/L معادل ۷۳٪ بود که با توجه به حد مجاز تخلیه پساب های صنعتی بر مبنای COD به میزان ۱۰۰ mg/L، تبعاً بیش از مقادیر استاندارد تخلیه پساب به منابع پذیرنده است. مقادیر میانگین سایر متغیرهای بهره برداری در شرایط پایداری در مرحله تعیین اثر افزایش غلظت برای هر دو راکتور در جدول ۴ ارائه شده است.

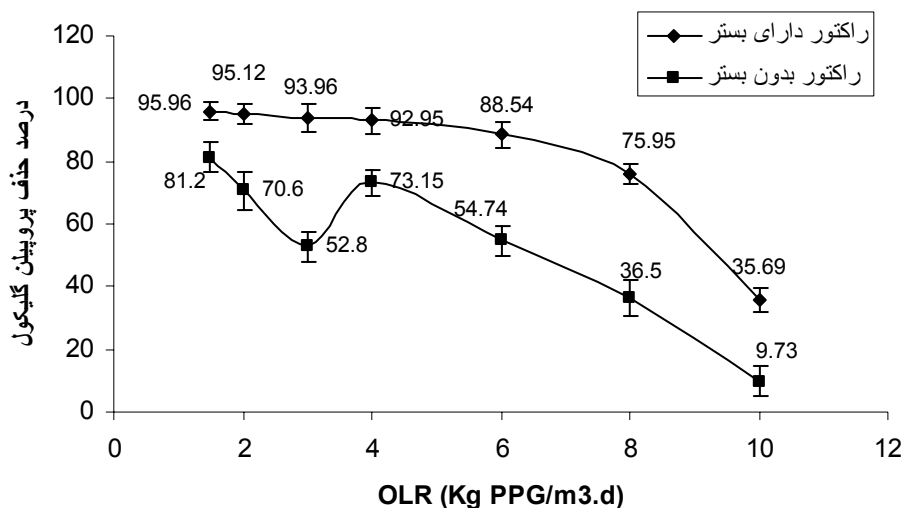
غلظت پروپیلن گلیکول خروجی در راکتور لجن فعال متعارف در شرایط مشابه و غلظت های پروپیلن گلیکول ورودی یکسان با راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت به ترتیب ۲۶۸/۵ (انحراف معیار $\pm 1/21$)، ۶۷۹/۹ (انحراف معیار $\pm 1/38$)، ۱۲۷۰ (انحراف معیار $\pm 0/43$) و ۲۲۵۶/۷۵ mg/L (انحراف معیار $\pm 1/15$) بوده است. با توجه به داده های به دست آمده مشخص می شود که راکتور لجن فعال متعارف در همه غلظت های مورد بررسی دارای بازده کمتر از راکتور لجن فعال دارای

جدول ۴- متغیرهای بهره برداری در مرحله تغییر بار آلی از طریق افزایش غلظت ورودی

لجن فعال متعارف			لجن فعال دارای بستر ثابت			غلظت پروپیلن گلیکول
DO (mg/L)	SVI (mL/g)	VSS (mg/L)	DO (mg/L)	SVI (mg/L)	VSS (mg/L)	گلیکول (mg/L)
۱/۲	۹۸	۲۱۳۰	۳/۲۶	۱۲۵	۱۸۲۵	۱۰۰۰
۱/۱	۸۷	۲۲۳۸	۳/۸۴	۱۲۱	۱۹۱۶	۱۵۰۰
۱/۳	۹۹	۲۲۴۰	۳/۰۸	۱۵۷	۱۹۱۴	۲۰۰۰
۱/۲	۱۰۵	۲۲۳۴	۲/۹	۲۸۱	۱۷۵۱	۲۵۰۰

همچنین به منظور بررسی روند تغییرات بازده حذف پروپیلن گلیکول در همه مراحل راهبری در اثر تغییر زمان ماند هیدرولیکی و غلظت پروپیلن گلیکول ورودی، متغیرهای راهبری به مقیاس بار آلی تبدیل گردید. بر این اساس بار آلی

اعمال شده به هر دو راکتور در محدوده 10 kg PPG/m^3 - $1/5$ بوده است که نتایج حذف پروپیلن گلیکول بر اساس بارهای آلی مختلف برای هر دو راکتور در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- بازده حذف پروپیلن گلیکول در محدوده بار آلی $(1/5 - 10 \text{ kg PPG/m}^3)$

بحث و نتیجه گیری

با توجه به داده های حاصل از مرحله اول مطالعات پیرامون تعیین اثر زمان ماند هیدرولیکی بر بازده راکتورهای لجن فعال دارای بستر ثابت و لجن فعال متعارف می توان نتیجه گیری کرد که بازده حذف در هر دو راکتور با افزایش زمان ماند هیدرولیکی نسبت مستقیم دارد و به موازات افزایش آن، بیشتر می شود. بدیهی است که این تأثیر مثبت به واسطه افزایش زمان مواجهه میکروارگانیسم ها با پروپیلن گلیکول بوده است که به نوبه خود منجر به سازگاری بیشتر و افزایش مصرف پروپیلن گلیکول به عنوان تنها منبع کربن موجود در محیط می باشد (شکل ۳). از سویی دیگر و با توجه به داده های مربوط به سایر متغیرهای بهره برداری مشخص می شود که در زمان ماند های هیدرولیکی کمتر، به دلیل افزایش جریان هیدرولیکی، جمعیت باکتریایی بیشتری از حوضچه هوادهی شسته می شود (داده های جدول ۲) که منجر به کاهش جمعیت میکروبی فعال مصرف کننده پروپیلن گلیکول شده است. این امر نیز به عنوان

یکی از دلایل مهم کاهش بازده حذف پروپیلن گلیکول در اثر کاهش زمان ماند هیدرولیکی تشخیص داده شد. اما نتایج حاصل نشان می دهد که بازده حذف پروپیلن گلیکول در شرایط یکسان در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت بیشتر از راکتور لجن فعال متعارف بوده است و این برتری به موازات کاهش زمان ماند هیدرولیکی بیشتر نمایان شده است. افزایش بازده حذف در راکتور دارای بستر ثابت نسبت به راکتور لجن فعال متعارف در مرحله راهبری با زمان ماندهای متغیر به وضوح در شکل ۳ نشان داده شده است. بازده حذف پروپیلن گلیکول در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت نسبت به راکتور لجن فعال متعارف در زمان ماندهای ۸، ۶، ۴ و ۲ ساعت به ترتیب $14/6\%$ ، $24/5\%$ ، $41/16\%$ و $57/6\%$ بیشتر بوده است. به نظر می رسد دلیل اصلی این امر بالاتر بودن غلظت توده میکروبی در راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت باشد که حجم انبوهی از جمعیت میکروبی فعال را بر روی بسترهای ثابت خود رشد داده و نگه داری می کند به نحوی که میزان جرم میکروبی شسته شده از راکتور در اثر افزایش جریان هیدرولیکی در مقایسه با

۱۰ mg/L به عنوان یک ترکیب سمی برای لجن فعال عمل می نماید (۱۱). بنابراین در شرایطی که سایر پارامترهای مؤثر در راهبری نظیر دما، اکسیژن محلول، نسبت $\frac{F}{M}$ و غلظت ازت و فسفر در حد بهینه تنظیم شده بودند، تنها عامل محدود کننده رشد بهینه باکتری ها، غلظت بالای پروپیلن گلیکول ورودی بوده است. افزایش غلظت منجر به تجمع متابولیت ها شده و بر فعالیت های آنزیمی و متابولیسمی باکتری ها اثر منفی داشته و آن را مختل می نماید. یکی از ویژگی های سیستم های دارای رشد چسبیده قابلیت تطابق آن با آلاینده های سمی به دلیل زمان ماند میکروبی بالا است (۱۲ و ۱۷). بنابراین دلیل اصلی کارایی بهتر راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت نیز همین امر بوده است که قابلیت سازگاری بیشتری با پروپیلن گلیکول به دلیل به کارگیری فرایند رشد چسبیده داشته است.

عوامل متعددی راهبری و بازده راکتورهای تلفیقی دارای بیوفیلم میکروبی را تحت تأثیر قرار می دهد. پارامترهای بهره برداری نظیر زمان ماند هیدرولیکی و غلظت پروپیلن گلیکول ورودی دارای تأثیر قابل ملاحظه بر عملکرد فرایند می باشد. با توجه به تغییرات اعمال شده به سیستم به لحاظ غلظت و زمان ماند هیدرولیکی، راکتور در نوبت راهبری چهارم و ششم دارای بار آلی $6 \text{ kgPPG/m}^3 \cdot \text{d}$ بود. نکته حائز اهمیت بیشتر بودن بازده حذف پروپیلن گلیکول در غلظت ۱۵۰۰ mg/L و زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت نسبت به غلظت ۵۰۰ mg/L و زمان ماند ۲ ساعت است. بازده حذف در زمان ماند هیدرولیکی ۶ ساعت، علی رغم سه برابر شدن غلظت نزدیک به ۹٪ بیشتر بوده است که نشانگر تأثیر مهم تر افزایش زمان ماند هیدرولیکی بر عملکرد راکتور است. همچنین روند کلی نتایج نشان می دهد که همواره به موازات افزایش غلظت پروپیلن گلیکول ورودی و در نتیجه بار آلی ورودی، تا حدودی بازده حذف کاهش یافته است که با در نظر گرفتن اثرات این دو عامل (غلظت و زمان ماند هیدرولیکی) باید یک رابطه متناسب بین این دو پارامتر تعریف شود تا ضمن دستیابی به بازده حذف مطلوب، بتوان بار آلی بالایی را نیز تصفیه کرد.

راکتور لجن فعال متعارف بسیار کمتر است. بنابراین یکی از برتری های راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت قابلیت شوک پذیری هیدرولیکی بالای آن است که آن را از راکتور لجن فعال متعارف متمایز می نماید.

در مرحله دوم مطالعات تغییرات بار آلی از طریق افزایش غلظت پروپیلن گلیکول ورودی در زمان ماند ثابت مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله نیز راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت دارای بازده بهتری نسبت به راکتور لجن فعال متعارف بود. در این مرحله نیز به موازات افزایش غلظت ورودی تفاوت عملکرد راکتورهای لجن فعال دارای بستر ثابت و لجن فعال متعارف آشکارتر شده و به موازات افزایش غلظت ورودی، برتری راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت مشهود تر است. بازده راکتور لجن فعال بستر ثابت در غلظت های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ به ترتیب ۱۹/۸، ۳۳/۸، ۳۹/۴۵ و ۲۵/۹۶٪ بیشتر بوده است. همانند مرحله قبل در این مرحله نیز به موازات افزایش بار آلی تفاوت بازده دو راکتور بیشتر شده و راکتور دارای بستر ثابت در غلظت های بالا دارای برتری قابل ملاحظه ای بوده است. این امر یکی از مزیت های راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت برای کاربرد جهت تصفیه پساب های صنعتی با غلظت بالا است که آن را در مقایسه با راکتور لجن فعال متعارف ارجحیت می بخشد.

عوامل مختلف مؤثر در راهبری راکتور نظیر اکسیژن محلول و غلظت مواد مغذی در این شرایط مورد بررسی قرار گرفت، تا دلیل اصلی کاهش بازده حذف در هر دو راکتور مشخص شود. نتایج پایش راکتور نشان می دهد که به موازات افزایش غلظت پروپیلن گلیکول ورودی، غلظت اکسیژن محلول به کمتر از ۱ mg/L افت می کند و در نتیجه افزایش هوای ورودی به راکتور ضروری است. علی رغم افزایش میزان جریان هوای ورودی به راکتور، بازده حذف در غلظت های بالای ۱۵۰۰ mg/L بهبود نیافت و دلایل دیگر اختلال راکتور مورد توجه قرار گرفت.

پروپیلن گلیکول در غلظت های بالا کارکرد سوخت و سازی خود را از دست داده و به تدریج در غلظت های بیش از

- environment. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
7. Charles, A. and Staples. and John, W. and Davis. (2002). An examination of the physical properties, fate, ecotoxicity and potential environmental risks for a series of propylene glycol ethers. *Chemosphere*, 49(1): 61–73.
 8. Veltman, S. and Schoenberg, T. (1998). Alcohol and acid formation during the anaerobic decomposition of propylene glycol under methanogenic Conditions. *Biodegradation*, 9(2): 113–118.
 9. Agnieszka, Z. and Tomasz, G. and Joanna, Z. and Zenon, L. (2006). Comparison of biodegradation of poly(ethylene glycol)s and poly(propylene glycol)s. *Chemosphere*, 64(1) 803–809.
 10. Joanna, R. and Agnieszka, Z. and Tomasz, G. and Grzes. and Zenon, L. (2003). Isolation of poly(propylene glycol)s from water for quantitative analysis by reversed phase liquid chromatography. *Chromatography*, 1021(1-2): 11–17.
 11. Agnieszka, Z. and Tomasz, G. and Joanna, Z. Magdalena, F. and Rafał, F. and Zenon, L. (2008) Bio-oxidation of tripropylene glycol under aerobic conditions. *Biodegradation*, 19(3): 365-373.
 12. Metcalf and Eddy. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. Mc Graw Hill.
 13. Jianlong, W. and Hancheng, S. and Yi, Q. (2000). Wastewater treatment in a hybrid biological reactor (HBR): effect of organic loading rates. *Process Biochemistry*, 36(12) 297-303.
- با توجه به داده های حاصل از انجام پژوهش می توان نتیجه گیری کرد که راکتور لجن فعال دارای بستر ثابت یک فن آوری کارآمد، اجرایی و قابل اعتماد برای تصفیه فاضلاب های قوی در مقیاس کامل بوده و از این لحاظ برتری قابل ملاحظه ای بر راکتور لجن فعال متعارف دارد.
- منابع**
1. Karl, K. and Rozman, and Jatinder Bhatia, and Antonia, M. (2006). NTP-CERHR Expert Panel report on the reproductive and developmental toxicity of propylene glycol. *Reproductive Toxicology*, 77(6): 485–638.
 2. Altene, G. (1995). Hazard Data Base. Agency for toxic substances and disease registry.
 3. Pillard, DA. (1995). Comparative toxicity of formulated glycol deicers and pure ethylene and propylene glycol to Ceriodaphnia Dubia and pimephales promelas. *Environ Toxicol Chem*, 14(2): 311–315.
 4. Agnieszka, Z. and Tomasz, G. and Joanna, Z. and Magdalena, F. and Rafał, F. and Tomasz, K. and Zenon, L. (2007). Biodegradation of poly(propylene glycol)s under the conditions of the OECD screening test. *Chemosphere*, 67(5):928-933.
 5. Angela, R. and Bielefeldt, T. and Illangasekare, and Megan, and Uttecht, and Rosanna, L. (2002). Biodegradation of propylene glycol and associated hydrodynamic effects in sand. *Water Research*, 36(7):1707-1714.
 6. Sills, RD. and Blakeslee, PA. (1992). The environmental impact of deicers in airport storm water runoff. In: D'Itri FM, editor. Chemical deicers in the

- [planktonic and fixed microorganisms during the start-up of methanogenic biofilm reactors](#). *Water Research*, 42(3): 792-800.
19. Xin, Z. and Yanming, W. and Zhengfang, Y. (2006). Oil field wastewater treatment in biological aerated filter by immobilized microorganisms. *Process Biochemistry*, 41(7): 1475-1483.
 20. APHA. (2005). Standard Methods For the Examination of Water & Wastewater. 21Th Edition, Washington DC, USA.
 21. Environmental Protection Agency (EPA). (2005). USA, EPA Economic Analysis of Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Landfills Point Source Category.
 22. Environmental Protection Department (EPD). (2005). Hong Kong Special Administrative Region (HKSAR), Technical Memorandum Standards for Effluents Discharged into Drainage and Sewerage Systems, Inland and Coastal Water.
 14. Plattes, M. and Henry, E. and Schosseler, P. and Weidenhaupt, A. (2006). Modeling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 32(2): 61-68.
 15. Yen-Hui Lin. (2008). Kinetics of nitrogen and carbon removal in a moving fixed bed biofilm reactor. *Applied Mathematical Modeling*, 32(11): 2360–2377.
 16. Borghei, S. and Sharbatmaleki, M. and Pourrezaie, P. and Borghei, G. (2008). Kinetics of organic removal in fixed-bed aerobic biological reactor. *Bioresource Technology*, 99(5): 1118-1124.
 17. Bajaj, M. and Gallert, C. and Winter, J. (2008). Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresource Technology*, 99(17): 8376–8381.
 18. Cresson, R. and Escudié, R. and Steyer, J. and Delgenès, J. and Bernet, N. (2008). [Competition between](#)