

The Use of Light Expanded Clay Aggregates as a Biological Support in Wastewater Treatment

Azad Kavosi*, Mehdi Borgheei**

استفاده از پوک‌های معدنی به عنوان ساپورت بیوفیلم در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب

مهدی برقمی**

آزاد کاوسی*

(دریافت ۸۳/۹/۱۰ پذیرش ۸۴/۱/۱۶)

Abstract

The Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) has been recently used in industrial and municipal wastewater treatment. MBBR is a kind of Bio-Filter with light packed bed. In this study, a mineral packing bed called Leca, a light expanded clay aggregate, was used as a biological support in the treatment of wastewater. The main objective of this study was to evaluate packed media for preparation of suitable beds for biological activity. Seventy percent of the reactor volume was filled with the packing media. Synthetic wastewater was made using sugar beet factory effluent. The influent COD in the range of 800 to 3200 mg/L was injected into the reactor at retention times of 12.16 and 24 hours. The results show that MBBR reactor is capable of removing 82% of soluble COD at a loading rate of 1.766 kg COD/m². However, it was found that reducing the retention time from 24 h to 16 h and 12 h, reduces COD removal efficiency from 82% to 76% and 66%, respectively. It was also found that 78.2% of the overall COD removal is due to biofilm activity and the rest is related to the activity of the submerged microorganism.

Key Words: COD, Leca, Biological growth, Moving Bed Biofilm Reactors

*Grad. Student of Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
** Professor Associate of Chemical Engineering, Sharif University of Technology

چکیده

در سال‌های اخیر کاربرد سیستم بیوفیلمی از جمله راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR). در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب‌های شهری و صنعتی توسعه یافته است. در این مطالعه، از پوک‌های معدنی بسیار سبک به عنوان ساپورت بیوفیلم در راکتوری که دارای ویژگی‌های یک راکتور هوایی بود استفاده شد. فاضلاب ورودی به راکتور، محلول ساخته شده از ملاس قند همراه با مواد مغذی افزودنی بود که خوراک مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها محسوب می‌گردد. آکنه‌هایی که ۷۰ درصد حجم راکتور را پر نموده بودند، از نوع پوک‌های معدنی با ویژگی‌های خاص که مصارف صنعتی دارند انتخاب شدند. عملکرد آکنه‌ها، به عنوان سطح فراهم شده برای رشد میکروارگانیسم‌های بیوفیلمی، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده مشخص می‌سازد که راکتور MBBR فوق، قابلیت حذف ۸۲ درصد از COD محلول تحت بار ورودی Kg COD/m² ۱/۷۶۶ را داراست و در صورت کاهش زمان ماند از ۲۴ ساعت به ۱۶ ساعت و در پی آن ۱۲ ساعت، حذف COD از ۸۲ درصد به ۷۶ درصد و به ۶۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که از کل راندمان حذف مواد کربنه، ۷۸/۲ درصد مربوط به بیوفیلم و ۲۱/۸ درصد مربوط به میکروارگانیسم‌های شناور است. واژه‌های کلیدی: اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، لیکا، فیلم میکروارگانیسم، بیومیکروارگانیسم، راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک

*کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف
**دانشیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

۱- مقدمه

از جمله روش هایی که برای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب صنعتی، به خصوص در سال های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک می باشند [۱].

در سال ۱۹۸۷ فرایند بستر متحرک kaldnes که به راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک موسوم است، توسط یک شرکت نروژی به نام Kaldnes Miljoteknologi با همکاری مرکز تحقیقات SINTEF توسعه یافت. این فرایند که اساس آن تشکیل بیوفیلم می باشد، ترکیبی از یک فرایند لجن فعال و سیستم بیوفیلمی است [۲]. آکنه های مورد استفاده در این سیستم ها که سطح مورد نیاز به منظور رشد توده های بیولوژیکی را فراهم می آورند، از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده و تأثیر مستقیمی بر عملکرد فرایند تصفیه دارند. استفاده از پوکه های معدنی لیکا^۱ به منظور ایجاد بستر رشد توده های بیولوژیکی، برای اولین بار در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است و با توجه به آن که آکنه های مورد استفاده در داخل کشور عمدتاً از جنس پلی اتیلن با قیمت بسیار بالا می باشند، که نسبت به دانه های لیکا، از سطح ویژه کمتر، دانسیته بالاتر و راندمان حذفی کمتری برخوردارند؛ در نتیجه استفاده از این آکنه ها می تواند دستاوردی نو در این بخش از تصفیه به شمار آید. در دسته بندی این سیستم ها مشخصه های مختلفی مورد نظر قرار می گیرد؛ این سیستم ها را براساس جهت جریان، جنس آکنه ها، تعداد لایه های بستر، فشار، سرعت، دبی و ... تقسیم بندی می کنند. همان طور که گفته شد یکی از عوامل مهم در طراحی و کاربری سیستم های مختلف تصفیه

¹ Light Expanded Clay Aggregate Catalogue (LECA)

فاضلاب، وجود بسترهای مناسب در فرایندهای گوناگون است.

در دسته بندی راکتورهای بیوفیلمی، مشخصه های مختلفی مورد نظر قرار می گیرد. جهت جریان، جنس آکنه ها، تعداد لایه های بستر، سرعت جریان و ... از جمله عواملی هستند که بر عملکرد سیستم مؤثر می باشند. بر اساس این تحقیق موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

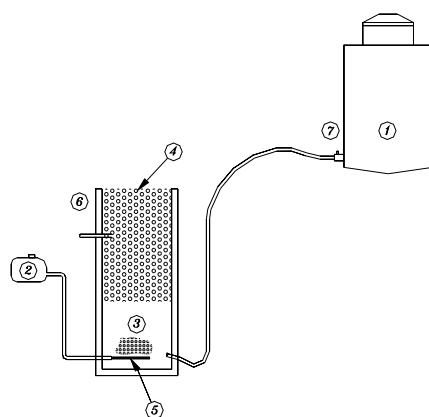
- ۱- بررسی امکان استفاده از پوکه های معدنی لیکا به عنوان ساپورت بیوفیلم در بستر متحرک
- ۲- بررسی اثر زمان ماند در غلظت های مختلف فاضلاب در راندمان حذف، با استفاده از این نوع آکنه
- ۳- ارائه مدلی مناسب برای بررسی و طراحی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) با استفاده از این نوع آکنه

۲- مواد و روش

با توجه به آن که هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی استفاده از پوکه معدنی در راکتورهای با بستر متحرک می باشد، لذا از یک دستگاه پایلوت متشکل از: راکتور آزمایشگاهی پرشده از آکنه ها، سیستم تزریق خوراک و سیستم هوادهی برای مطالعه فوق استفاده گردید.

۲-۱- مشخصات راکتور

پایلوتی از جنس شیشه طبق شکل ۱ و با مشخصات جدول ۱ ساخته شد. برای هوادهی مناسب از پمپ هوا به ظرفیت ۴/۵ لیتر بر دقیقه که قابلیت تنظیم نرخ هوادهی را نیز دارا می باشد، استفاده گردید.



- توضیحات**
- ۱- مخزن تزریق
 - ۲- پمپ
 - ۳- هوا دهی
 - ۴- پایلوت
 - ۵- شیشه ای
 - ۶- آکنه های لیکا
 - ۷- دیفیوزر های هوا
 - ۸- شیر خروجی
 - ۹- شیر تزریق

شکل ۱- پایلوت مورد استفاده به همراه ارتباط اجزای آن

جدول ۱- مشخصات پایلوت مورد استفاده در تحقیق [۳]

طول	عرض	ارتفاع	عمق آب	حجم مفید	نوع راکتور
سانتی متر	سانتی متر	سانتی متر	سانتی متر	لیتر	
۲۰	۲۰	۶۰	۵۵	۲۲	بستر متحرک بالارو هوایی

ویژگی‌های خاص پوکه های لیکا عبارت اند از [۴]:

- ۱- تخلخل بسیار زیاد
- ۲- ثبات ساختاری و در پی آن عدم قابلیت فشردگی
- ۳- طول عمر و دوام زیاد
- ۴- توانایی نگهداری آب به مدت زمان زیاد و فراهم نمودن شرایط ایده آل تماس فاضلاب و بیوفیلم
- ۵- حمل و نقل آسان
- ۶- وزن بسیار کم
- ۷- عایق حرارتی
- ۸- مقاومت در یخ زدگی و فراهم آوردن شرایط رشد در فصل سرما
- ۹- تراکم ناپذیری تحت فشار ثابت و دائمی
- ۱۰- فساد ناپذیری
- ۱۱- مقاومت در برابر ترکیبات اسیدی و بازی که خود عامل اساسی مقاومت این پوکه ها در برابر شوک های ناشی از ورود فاضلاب های ناخواسته به شبکه می باشد.

۲-۲- مشخصات پوکه ها

برای ساپورت بیوفیلم، از پوکه‌های معدنی که اصطلاحاً، لیکا نامیده می‌شود استفاده شد [۴]. دانه‌های لیکا از انبساط نوع خاصی از خاک رس در کوره های گردان و افقی در حرارت حدود ۱۲۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید و دارای مجموعه‌ای از ویژگی‌های وزن کم، هدایت حرارتی پایین، افت صوتی مناسب، مقاومت و پایداری است. این دانه‌ها، ذراتی مدور و سبک می‌باشند که در حرارت حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند. وزن واحد دانه‌های خشک لیکا به صورت فله و برای دانه‌بندی‌های مختلف در جدول ۲ ارائه گردیده است. اصلی‌ترین عامل در سبکی دانه‌های لیکا وجود هوا در بین و داخل دانه‌هاست که آنها را به صورت توپی از هوا در می‌آورد. این هوا برحسب دانه بندی پوکه بین ۷۳ الی ۸۸ درصد فضای کل را اشغال می‌کند. جدول ۲ خواص دانه‌بندی لیکا را نشان می‌دهد. این دانه ها با سطح ویژه بسیار بالا در حدود $525 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ، محیط مناسبی برای رشد میکروارگانیسم‌ها در حجمی محدود می‌باشند. شکل ۲ نمایی از پوکه‌های مورد استفاده در این تحقیق است.

۲-۳- راه اندازی راکتور [۵]

برای راه اندازی راکتور، از لجن تصفیه خانه شهرک اکباتان استفاده شد. راکتور تا ۵۰ درصد حجم از این لجن پر و سپس داخل راکتور آب ریخته شد و هوادهی به راکتور آغاز شد.

توسط پمپ پایلوت (راکتور)، میزان هوادهی سیستم به گونه‌ای تنظیم گردید که میزان اکسیژن محلول در حدود ۲ تا ۴ میلی گرم اکسیژن در لیتر باشد. اکسیژن محلول به طور مداوم کنترل شد تا هیچ‌گاه میزان آن از ۲ میلی گرم در لیتر کمتر نباشد. راکتور به صورت ناپیوسته مورد بهره برداری قرار گرفت تا بیوفیلم به صورت مناسب رشد کند و راکتور برای راه‌اندازی پیوسته آماده گردد. به منظور تهیه خوراک ورودی به راکتور از ملاس (حاصل از چغندر قند)

استفاده شد؛ زیرا برای سازگار گشتن میکروارگانیسم‌ها با این فاضلاب، استفاده از ملاس مناسب‌ترین گزینه برای راه اندازی سیستم می باشد. مشخصات ملاس مورد استفاده در پروژه، به منظور محاسبه غلظت خوراک ورودی به صورت دقیق‌تر در جدول ۳ ذکر گردیده است.

به منظور تأمین مواد مغذی و شرایط بهینه برای رشد میکروارگانیسم‌ها، به همراه ملاس از فسفات آمونیوم و اوره نیز به عنوان تأمین کنندگان فسفر و نیتروژن استفاده شد. معیار استفاده از نیتروژن و فسفر دستیابی به نسبت COD:N:P برابر ۱:۵:۱۰۰ می‌باشد که در عمل برای جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های رشته‌ای از میزان فسفات آمونیوم بیشتری استفاده گردید [۶ و ۷].

جدول ۲- خواص دانه بندی لیکا (مشخصات پوکه های شرکت لیکا) [۴]

دانه بندی لیکا، میلی متر	۱۰-۲۰	۳-۱۰	۰-۳	۰-۲۵
وزن واحد دانه های خشک لیکا، کیلوگرم بر متر مکعب	۲۸۰-۳۸۰	۳۳۰-۴۳۰	۴۳۰-۵۳۰	۳۳۰-۵۳۰



شکل ۲- نمائی از پوکه های مورد استفاده در این تحقیق

وجود نداشت انجام گرفت و تمامی آزمایش ها نیز بر مبنای COD صورت گرفت.

دما، pH و اکسیژن محلول در طی این ۳۰ روز اندازه گیری می گردید که مقدار دما 20°C ، pH برابر $7/2-8/1$ و مقدار DO برابر $3/5-6$ بود.

۲-۴- بهره برداری از راکتور

بعد از گذشت دوره batch و راه اندازی، راکتور آماده فعالیت و بارگیری پیوسته شده و فاضلاب مصنوعی تهیه شده از ملاس، به همراه مواد مغذی (شامل اوره و فسفات آمونیوم) با غلظت های متفاوت هر چند روز یکبار در داخل تانک مخصوص تهیه می شد و براساس زمان ماند و با دبی معینی وارد راکتور می گردید.

غلظت فاضلاب در مخزن تزریق (تانک خوراک) و غلظت خروجی از راکتور با انجام نمونه گیری، مورد بررسی قرار می گرفت. لازم به ذکر است که نمونه خروجی، پس از ته نشینی در بشکه ته نشینی و صاف شدن مایع و پس از قرار گرفتن در داخل دستگاه سانتریفوژ نیز مورد بررسی قرار می گرفت تا بتوان از میزان کمی ذرات جامد معلق، قبل از ته نشینی نیز اطلاعات ثبت نمود. به منظور تصفیه مناسب بار آلی می بایستی میکروارگانیسم ها با فاضلاب ورودی سازگار شوند؛ از این رو در این مرحله، زمان نمونه گیری چند برابر زمان ماند هیدرولیکی

خوراک ورودی با غلظت در حدود ۲۵۰ میلی گرم در لیتر تزریق شده و در طول مدت یک ماه به مقدار ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی گرم در لیتر افزایش می یابد. لازم به ذکر است که نتایج براساس آزمایش COD خوراک ورودی و مایع داخل راکتور می باشد که ۳۰ روز متوالی به طول می انجامد.

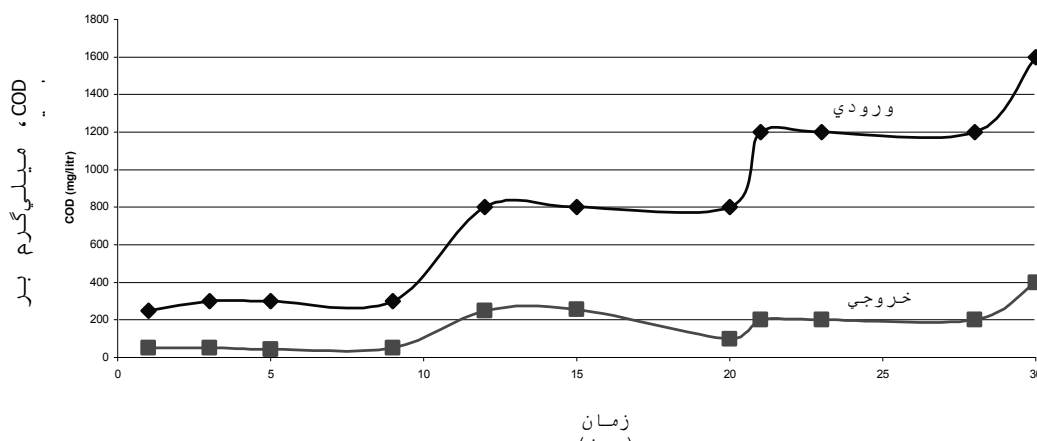
هنگامی که غلظت خوراک ورودی از ۲۵۰ به ۸۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت، غلظت پساب خروجی راکتور به حداکثر رسید. این افزایش زیاد در غلظت راکتور به علت افزایش ناگهانی بار آلی می باشد. با افزایش غلظت بار آلی ورودی از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ میلی گرم بر لیتر تغییر محسوسی در غلظت درون راکتور دیده نمی شود؛ که این امر بیانگر سازگار شدن میکروارگانیسم ها با محیط می باشد (شکل ۳). پس از گذشت ۱۰ روز، بیوفیلم محسوسی روی پوکه ها مشاهده شد که موجب لزجی محسوس پوکه گردید. با افزایش خوراک دهی در انتهای هفته دوم، بر روی آکنه ها بیوفیلم کامل تشکیل شد و ^۱MLSS محتویات راکتور تا حدود ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت. از این زمان به بعد، افزایش خوراک، مقدار COD را در داخل راکتورها چندان تغییر نداد. لازم به ذکر است که این آزمایش ها بر روی مایع خروجی از دستگاه سانتریفوژ که کاملاً صاف، شده بود و هیچ جزء بیولوژیکی غیر قابل تجزیه ای در آن

¹ Mixed Liquor Suspended Solids

تعیین شد. در ابتدا تغییراتی روزانه در نمونه برداری مشاهده نمی شد و زمان

جدول ۳- مشخصات ملاس استفاده شده بر مبنای گرم بر لیتر ملاس

COD	ازت کل	کلرور	پروتئین	متیزیم	سدیم	پتاسیم	خاکستر
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
۷۵۰-۷۹۰	۱۵/۲۵	۱۱۵	۶۵/۴	۱۵۹/۲	۱۰	۲۴	۸۳/۵



شکل ۳- عملکرد راکتور در دوره batch و در حین راه اندازی

سیستم دچار شوکی از نظر زمان ماند گردید که پیامدهای آن ثبت گردیده است.

۳- نتایج و بحث آزمایش‌ها

در مرحله اول زمان ماند ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و COD فاضلاب از مقدار ۱۶۰۰ تا ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش و ناگهان به مقدار ۸۰۰ میلی گرم بر لیتر کاهش یافت. با توجه به زمان ماند، دبی راکتور در ۰/۹۲ لیتر بر ساعت تنظیم شد. به منظور تأمین خوراک ورودی راکتور و با توجه به مصرف شبانه روزی ۲۲ لیتر در این زمان ماند، بشکه ۱۰۰ لیتری خوراک هر ۴ روز می‌باید پر و آماده می‌شد و به منظور حصول اطمینان از وجود هد لازم برای تزریق یک‌نواخت، بشکه هر ۲ روز یک‌بار شارژ می‌شد تا همواره ارتفاع آب، هد لازم برای تزریق ثقلی را تأمین نماید. نمونه گیری از خروجی راکتور به صورت روزانه به عمل آمده و در جدول ثبت می‌گردید (جدول ۴).

نمونه برداری در حدود ۲-۴ روز انتخاب گردید. پس از این مدت، آزمایش‌ها در سه زمان ماند ۱۲، ۱۶ و ۲۴ ساعت انجام شد و در هر دوره غلظت خوراک در دامنه ۸۰۰ تا ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر و بالعکس تغییر داده می‌شد؛ در هر حالت که در حدود یک‌ماه به طول می‌انجامید، خروجی راکتورها مورد بررسی قرار گرفته و راندمان حذف تعیین می‌گردید. در زمان ماند ۲۴ ساعت، غلظت خوراک ورودی از ۱۶۰۰ میلی گرم بر لیتر به ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش داده شده و سپس دفعتهاً به مقدار ۸۰۰ میلی گرم بر لیتر کاهش داده شد تا بدین ترتیب اثرات شوک‌های وارده و تغییرات ناگهانی بار نیز تا حدی مورد بررسی قرار گیرد. سپس در ادامه و در زمان ماند ۱۶ ساعت، غلظت خوراک از مقدار ۸۰۰ به ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافته و مجدداً و به طور منظم غلظت خوراک از ۳۲۰۰ به ۸۰۰ میلی گرم بر لیتر و زمان ماند نیز به ۱۲ ساعت کاهش داده شد. در زمان ماند ۱۲ ساعت

شکل ۵ نیز مقایسه ای از راندمان حذف نهایی (پس از ثابت شدن راندمان در راکتور) بر حسب زمان ماند را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ با افزایش غلظت خوراک، راندمان نیز افزایش می‌یابد.

آنچه مسلم است، برای افزایش زمان ماند نیاز به افزایش حجم راکتور و صرف هزینه‌های بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب می‌باید با توجه به استانداردهای خروجی، زمان ماند بهینه را تعیین نمود. شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش زمان ماند راندمان نیز افزایش می‌یابد.

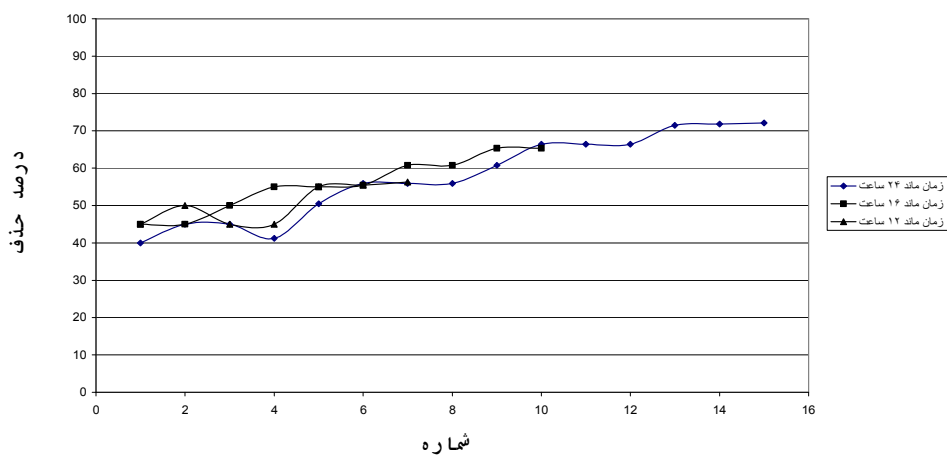
۳-۱- شوک هیدرولیکی

برای این منظور زمان ماند در COD با غلظت ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، از ۱۲ ساعت به ۶ ساعت کاهش داده شد. قبل از اعمال

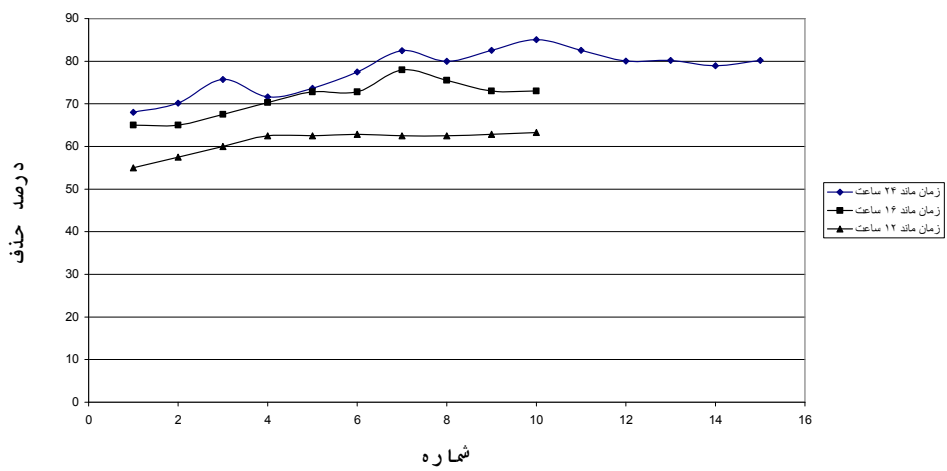
به آسانی و بر طبق انتظار مشاهده شد که با افزایش زمان ماند، راندمان حذف در هر خوراک به طور محسوسی افزایش می‌یابد. با توجه به آن که در دبی ثابت فاضلاب، افزایش زمان ماند نیاز به افزایش حجم راکتور و مخازن داشته و در پی آن موجب صرف هزینه‌های بیشتر می‌گردد، لذا می‌باید زمان ماندی را که از نظر اقتصادی دارای توجیه بوده و از نظر راندمان حذف نیز با فاضلاب ورودی و استانداردهای خروجی سازگاری داشته باشد، تعیین نمود.

شکل ۴ مقایسه ای از راندمان حذف نهایی (پس از ثابت شدن راندمان در راکتور) بر حسب غلظت خوراک را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ با افزایش زمان ماند، راندمان نیز افزایش می‌یابد.

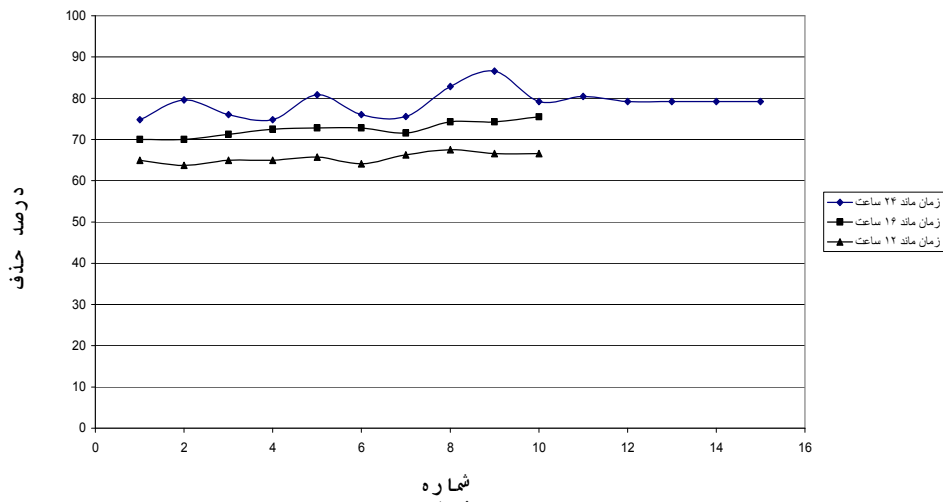
الف- مقایسه راندمان حذف در خوراک ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر



ب- مقایسه راندمان حذف در خوراک ورودی ۱۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر



ج- مقایسه راندمان حذف در خوراک ورودی ۳۲۰۰ میلی گرم بر لیتر



شکل ۴- مقایسه راندمان بر حسب خوراک‌های ورودی

نمونه گیری شد که غلظت COD برابر ۶۷۰ میلی گرم بر لیتر محاسبه شد. براساس این دو آزمایش، مشخص گردید در صورتی که جرم میکروبی معلق و چسبیده هر دو در سیستم باشند، درصد حذف ۸۵ درصد و در مورد جرم میکروبی چسبیده ۶۶/۵ درصد خواهد بود. در صورتی که در آزمایش دوم و زمانی که جرم میکروبی معلق از سیستم خارج گشته است، راندمان حذف جرم میکروبی چسبیده را به صورت

$$\frac{\text{راندمان حذف بعد از خروج جرم میکروبی معلق}}{\text{راندمان حذف کل سیستم}} = \frac{۶۶/۵}{۸۵} = \frac{۷۸/۲۳}{۱۰۰}$$

تعریف نماییم، در این صورت مقدار راندمان حذف جرم میکروبی معلق نیز به صورت زیر قابل تخمین می‌باشد:

$$۱۰۰ - ۷۸/۲۳ = ۲۱/۷۷\%$$

به این ترتیب، راندمان حذف هر یک از دو جرم میکروبی چسبیده و معلق در تصفیه بیولوژیکی به ترتیب برابر ۷۸/۲۳٪ و ۲۱/۷٪ خواهد بود. مسلم است هر چه بیوفیلم ایجادی نازک‌تر و فعال‌تر بوده و برای رشد بیوفیلم سطح ویژه بیشتری موجود باشد، سهم جرم میکروبی چسبیده در تجزیه مواد آلی بیشتر خواهد بود.

شوک به سیستم، COD خروجی از سیستم ۱۰۷۰ میلی گرم بر لیتر بود. پس از شوک، COD خروجی افزایش یافت. مقدار ماکزیمم دیده شده در خروجی ۱۹۲۴ میلی گرم بر لیتر بود. شکل ۷ تغییرات غلظت COD را قبل و بعد از شوک دادن تا رسیدن به پایداری نشان می‌دهد. سیستم پس از حدود ۶ برابر زمان ماند تقریباً به حالت پایداری اولیه بازگشت.

۳-۲- راندمان حذف هر یک از جرم های میکروبی در راکتور

برای این منظور در زمان ماند ۱۲ ساعت، خوراکی با COD برابر ۲۰۰۰ میلی گرم بر لیتر به راکتور داده شد و پس از گذشت سه برابر زمان ماند، از خروجی نمونه گیری شد که COD خروجی ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر به دست آمد. در مرحله بعد، کل مایع موجود در راکتور که همان سوسپانسیون لجن است، از سیستم خارج شده و راکتور از خوراک COD با غلظت ۶۰ میلی گرم بر لیتر پر گردید و مجدداً در سیکل عملیاتی قرار گرفت. به این ترتیب کل جرم میکروبی معلق از سیستم خارج گشته و فقط جرم میکروبی چسبیده باقی ماند. پس از دو روز، از خروجی

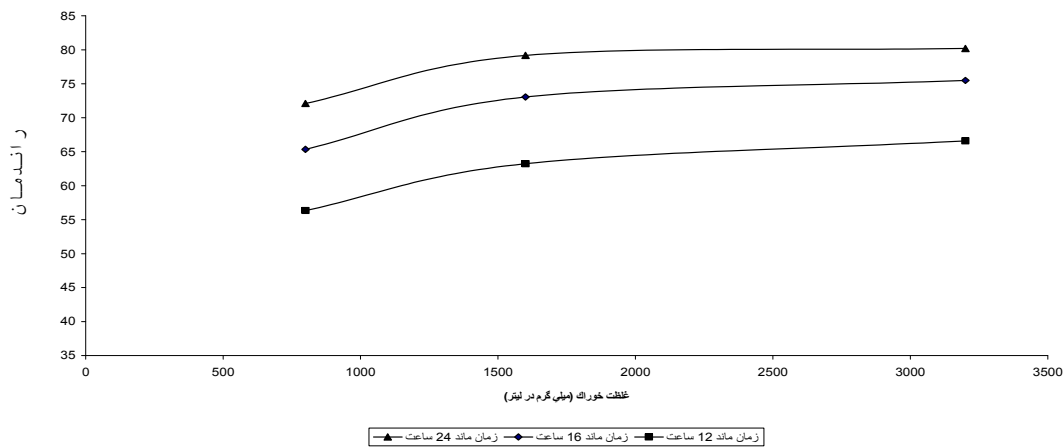
جدول ۴- جدول ثبت اطلاعات روزانه آزمایش [۸]

DO	pH	COD	B	A	N	تاریخ آزمایش	شماره ردیف
۴/۲	۷/۵	۵۴۸/۸	۳/۴	۴/۸	۰/۰۹۸	۸۳/۲/۲۶	۱
۴/۶	۷/۸	۶۶۶/۴	۳/۱	۴/۸	۰/۰۹۸	۸۳/۳/۲	۲

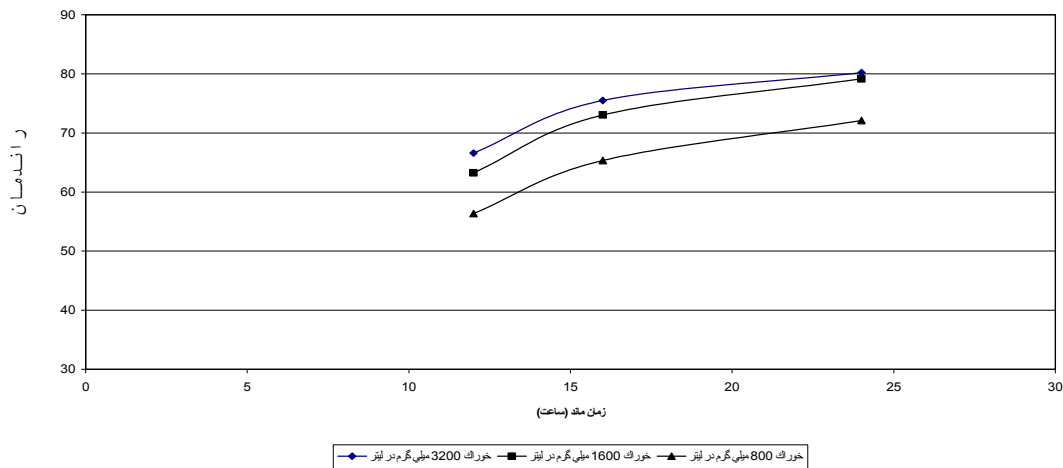
A = سولفات آمونیوم مصرفی برای شاهد، میلی لیتر
 B = سولفات آمونیوم مصرفی برای نمونه، میلی لیتر
 N = نرمالیه فرسولفات آمونیوم

$$\text{COD(mg/L)} = \frac{(A - B) * N * 8000}{\text{حجم نمونه بر حسب میلی لیتر}}$$

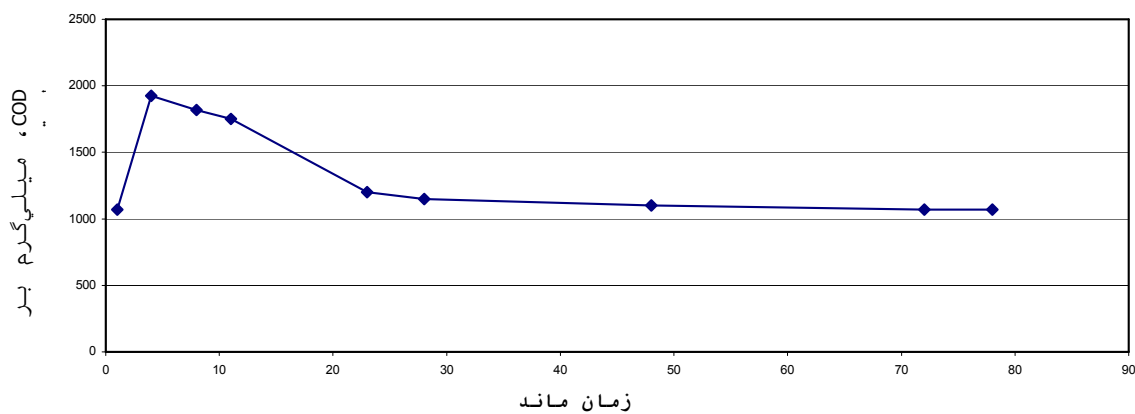
حجم نمونه بر حسب میلی لیتر



شکل ۵- راندمان حذف بر حسب تغییرات غلظت خوراک



شکل ۶- راندمان حذف بر حسب تغییرات زمان ماند



شکل ۷- تغییرات غلظت COD برحسب زمان قبل و بعد از شوک هیدرولیکی

تحقیقات انجام شده توسط Broch-Due و Kristoffersen ذرات معلق بیولوژیکی در راکتورهای فیلمی با بستر متحرک سهم زیادی از جامدات بیولوژیکی در راکتور را تشکیل می دهند از این رو فرض اخیر صادق نیست. بنابراین در رابطه ۳ به جای پارامتر سطح (A) از پارامتر حجم (V) استفاده می شود و خواهیم داشت

(۴)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{U_{\max} QS_i / V}{K_B + QS_i / V}$$

نتایج تحقیقات Henze and Kincannon-Stover(1982) و Harremoes (1983) نشان می دهد که سرعت حذف COD (بازدهی حذف) بیش از آن که به غلظت مواد آلی و یا، بار هیدرولیکی بستگی داشته باشد؛ به بار آلی اعمال شده وابسته است.

با خطی سازی رابطه ۴ رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)^{-1} = \frac{V}{Q(S_i - S_e)} = \frac{K_B}{U_{\max}} \left(\frac{V}{QS_i}\right) + \frac{1}{U_{\max}} \quad (5)$$

با رسم عبارت $\frac{V}{Q(S_i - S_e)}$ ، (معکوس سرعت حذف مواد آلی) برحسب $\frac{V}{QS_i}$ ، (عکس مقدار بار آلی کل)،

خط راستی حاصل خواهد شد. عرض از مبدأ و شیب این خط به ترتیب مقادیر K_B/U_{\max} می باشند. با نوشتن موازنه جرم برای کل راکتور، حجم و هم چنین غلظت مواد آلی خروجی از راکتور قابل محاسبه است.

ا جایگزینی رابطه ۴ توسط رابطه ۲ داریم

۳-۳- سینتیک هیدرولیکی در راکتورهای بیوفیلمی [۹] مدل های مختلفی در زمینه بررسی راکتورهای بیوفیلمی موجود است. از مدل های بسیار کارآمد و مؤثر برای بیان سیستم های بیوفیلمی، مدل Stover-Kincannon [۱۰] است که به صورت زیر بیان می گردد

$$\frac{ds}{dt} = \frac{U_{\max} QS_i / A}{K_B + QS_i / A} \quad (1)$$

با نوشتن موازنه جرم در سیستم، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) \quad (2)$$

با مساوی قرار دادن طرف های راست روابط ۱ و ۲، خواهیم داشت:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{U_{\max} QS_i / A}{K_B + QS_i / A} \quad (3)$$

$\frac{dS}{dt}$ = نرخ مصرف خوراک در مدت زمان t (mg/L.s)

Q = نرخ جریان در سیستم (دبی) (m^3/s)

S_i = خوراک ورودی به سیستم

S_e = خوراک خروجی از سیستم

K_B = پارامتری مربوط به چگونگی رشد توده های بیولوژیکی (mg/L.s)

U_{\max} = بیشترین نرخ مصرف خوراک (mg/L.s)

رابطه ۳ اولین بار برای راکتورهای RBC استفاده شده بود؛ با این فرض که در سیستم RBC مقدار ذرات بیولوژیکی و یا MLSS معلق در درون راکتور در مقابل جامدات بیولوژیکی چسبیده قابل صرف نظر باشد. براساس

راکتورها محسوب می شوند؛ چرا که این معادله قابلیت محاسبه حجم و غلظت خروجی از راکتورها را دارا می باشد.

به منظور بررسی حذف مواد آلی در این پروژه که نوعی راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) است، معادله اصلاح شده استور-کین کانن مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از اطلاعات آزمایشگاهی که در نتیجه کار بر روی این نوع راکتور حاصل گردیده بود، استفاده شد.

با استفاده از این مدل و هم چنین رسم نمودن اطلاعات در دسترس در شکل همان طور که دیده می شود، R^2 معادله رگرسیون برابر با ۰/۹۶ می باشد.

واضح است که اطلاعات حاصله، با این معادله به میزان خوبی تقریب زده می شوند. بر این اساس، روابط حاصل برای محاسبه

$$Qs_i = Qs_e \left[\frac{U_{\max} \left(\frac{Qs_i}{V} \right)}{KB + \left(\frac{Qs_i}{V} \right)} \right] V \quad (6)$$

با حل این معادله روابط زیر حاصل می گردند:

$$V = \frac{Qs_i}{\left(\frac{U_{\max} S_i}{S_i - S_e} \right) - K_B} \quad (A)$$

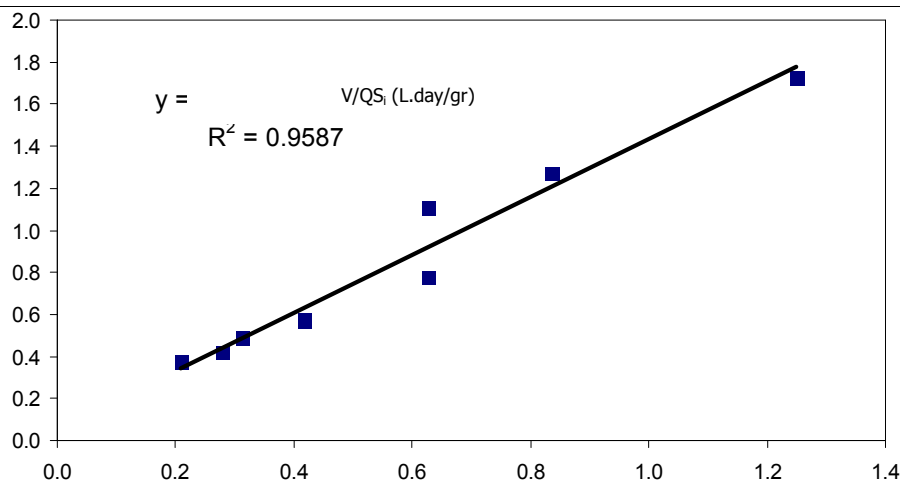
$$S_e = S_i - \frac{U_{\max} S_i}{K_B + Qs_i / V}$$

روابط ۷ و ۸ نشان می دهند که معادله اصلاح شده استور-کین کانن^۱ معادله خوبی برای طراحی این گونه از

¹ Stover-Kincannon

جدول ۵- نتایج مدل ریاضی اصلاح شده استور-کین کانن براساس اطلاعات آزمایشگاهی

V / QSi (L.day/gr)	V / Q (Si-Se) (L.day/gr)	Si-Se (mg/L)	Se (mg/L)	Si (mg/L)	زمان ماند (روز)
۱/۲۵۰	۱/۷۳۴	۰/۵۷۷	۲۳/۲	۸۰۰	۱
۰/۶۲۵	۰/۷۷۹	۱/۲۸۳	۳۱۶/۸	۱۶۰۰	۱
۰/۴۱۷		$R^2=0.96$	۶۶۶/۴	۲۴۰۰	۱
۰/۸۳۳	۱/۲۷۵	۰/۵۲۳	۲۷۷/۲	۸۰۰	۰/ ۶۶۷
۰/۴۱۷	۰/۵۷۰	۱/۱۶۹	۴۳۱/۲	۱۶۰۰	۰/ ۶۶۷
۰/۲۷۸	۰/۴۲۳	۱/۵۷۷	۸۲۳/۲	۲۴۰۰	۰/ ۶۶۷
۰/۶۲۵	۱/۱۰۹	۰/۴۵۱	۳۴۹/۲	۸۰۰	۰/ ۵
۰/۳۱۳	۰/۴۹۴	۱/۰۱۲	۵۸۸	۱۶۰۰	۰/ ۵
۰/۲۰۸	۰/۳۷۶	۱/۳۳۱	۱۰۶۹/۲	۲۴۰۰	۰/ ۵



شکل ۸- رسم مدل بر حسب داده های جمع آوری شده

راکتور کاهش می یابد. با توجه به این که ظرفیت هوادهی سیستم به گونه ای است که توان جبران این کاهش را دارد، با افزایش دبی هوا می توان از افت راندمان جلوگیری نمود.

۴-۶- با توجه به این که سهم رشد چسبیده در این سیستم (بر روی آکنه ها)، نسبت به رشد معلق، در حدود ۷۸/۲۳ درصد به ۲۱/۷ درصد است، مشاهده می شود که این پوکه ها به منظور ساپورت برای رشد بیوفیلم مناسب می باشند.

۴-۷- راه اندازی کامل سیستم بین ۳ تا ۴ هفته به طول می انجامد.

۴-۸- با توجه به سهم بالای رشد میکروبی چسبیده نسبت به رشد معلق و بالارو بودن جریان، برای دستیابی به بازدهی مناسب نیاز به برگشت لجن در سیستم مشاهده نگردید که این خود از مزایای استفاده از این روش تصفیه و بیانگر قابلیت آکنه هاست که موجب کاهش هزینه های پمپاژ می گردد.

۴-۹- با گذشت زمان و در پی افزایش پیشروی پروژه، سیستم مرتباً پایدارتر شده و در مدت زمانی کوتاه تری به حالت پایداری می رسید.

۴-۱۰- مدل اصلاح شده کین کانن و استور برای بررسی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک، مدل بسیار مناسبی می باشد و با این مدل می توان میزان حجم و یا غلظت خروجی از راکتور را محاسبه نمود.

حجم و غلظت خروجی از راکتورها به صورت زیراند:

$$V = \frac{QS_i}{18.05S_i - 24.86} \quad (9)$$

$$S_e = S_i - \frac{18.05S_i}{24.86 + QS_i/V} \quad (10)$$

بنابراین می توان گفت که این مدل برای طراحی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک مدل مناسب است.

۴- نتیجه گیری

۴-۱- در این پروژه با وجود استفاده از یک نوع آکنه ارزان قیمت و شبیه سازی شده داخلی با خواص ذکر شده، کارایی نسبتاً مناسب مشاهده گردید و میانگین راندمان حذف در حدود ۸۰/۲ درصد بدست آمد.

۴-۲- پس از اعمال شوک هیدرولیکی، پایداری نسبتاً مناسبی مشاهده می شد و سیستم پس از ۶ برابر زمان ماندی که در آن کار می کرد، به حالت پایدار اولیه بازگشت.

۴-۳- در طول این پروژه و با تغییرات بار ورودی و زمان ماندی اعمال شده بر سیستم، مشاهده شد با کاهش زمان ماند، غلظت خروجی افزایش و راندمان حذف COD کاهش می یابد. با افزایش غلظت خوراک ورودی و در زمان ماندی ثابت، توان حذف COD در سیستم بالا می رود و این نکته بیانگر توانایی بالاتر راکتور در حذف غلظت های بالاتری از فاضلاب می باشد.

۴-۴- با توجه به این که تأمین زمان ماند هیدرولیکی بالاتر در سیستم، و در پی آن افزایش راندمان حذف، نیاز به حجم بالاتری برای فیلتر و نگهداری ساپورت ها داشته و این خود موجب افزایش هزینه های اقتصادی و سرمایه گذاری بالاتری می گردد، با تغییرات پارامترهای فوق سعی گردیده است تا زمان ماندی را که هم از لحاظ حذف با استانداردهای مورد نظر مطابقت داشته باشد، و هم از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر باشد، به عنوان زمان ماند ایده آل معرفی شود.

۴-۵- با افزایش غلظت خوراک ورودی، رشد بیوفیلم و مصرف اکسیژن بیشتر می گردد. در نتیجه DO درون

۵- مراجع

- ۱- برقی، م.، (۱۳۸۱). "تصفیه فاضلاب صنعتی". انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.
2. Metcalf & Eddy., (2003). "*Wastewater Engineering-Treatment and Reuse* ." Fourth Edition.
- ۳- سهرابی، م.، (۱۳۷۴). "طراحی رآکتورهای شیمیایی". انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
4. Degremont Biofiltration catalogue
- ۵- برقی، م.، حسینی، س.، ح.، (۱۳۸۰). "بررسی اثر بازدارندگی فنل در فاضلاب‌های صنعتی با استفاده از رآکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک، پایان نامه کارشناسی ارشد." دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۶- گاگیگ بدلیانس قلی کندی.، (۱۳۸۱). "طراحی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تصفیه فاضلاب." انتشارات صنعت آب و برق.
7. Schroeder, Edward D. (1977). "*Water and Wastewater Treatment* ." McGraw Hill, Inc.
8. Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 18th Edition
9. Markj, Hammer. " Modeling of Organic Removal in a Moving Bed Biofilm Reactor." Vol9.No.1
10. Hand book of Wastewater Treatment, Arnold S. Vernick, Elwood C. Walker, eds., Marsel. Dekker, Inc. Paramas, Newjersi, USA, 90-92.