

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

Azad Kavooosi*, Mehdi Borgheei**

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

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

آزاد کاوسی* مهدی برقعی**

(دریافت ۸۳/۹/۱۰ پذیرش ۸۴/۱/۱۶)

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 هوازی 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 ۱/۷۶۶ Kg COD/m² 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

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

** Professor Associate of Chemical Engineering, Sharif University of Technology

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

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

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

۲-۲- مشخصات پوک‌ها

برای ساپورت بیوفیلم، از پوک‌های معدنی که اصطلاحاً، لیکا نامیده می‌شود استفاده شد [۴]. دانه‌های لیکا از انبساط نوع خاصی از خاک رس در کوره‌های 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 تویی از هوا در می‌آورد. این هوا برحسب دانه بندی پوک‌ها بین ۷۳ الی ۸۸ درصد فضای کل را اشغال می‌کند. جدول ۲ خواص دانه‌بندی لیکا را نشان می‌دهد. این دانه‌ها 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 پوک‌های مورد استفاده در این تحقیق است.

ویژگی‌های خاص پوک‌ها لیکا عبارتند 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 پوک‌ها در برابر شوک‌های ناشی از ورود فاضلاب‌های ناخواسته به شبکه می‌باشد.

۲-۳- راه‌اندازی راکتور [۵]

برای راه‌اندازی راکتور، از لجن تصفیه‌خانه 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 میلی‌گرم اکسیژن در لیتر باشد. اکسیژن محلول به طور مداوم کنترل شد تا هیچ‌گاه میزان آن از ۲ میلی‌گرم در لیتر کمتر نباشد. راکتور به صورت ناپوسته مورد بهره‌برداری قرار گرفت تا بیوفیلم به صورت مناسب رشد کند و راکتور برای راه‌اندازی پیوسته آماده‌گردد. 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 راه‌اندازی سیستم می‌باشد. 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 تأمین‌کنندگان 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 پوک‌های شرکت لیکا) [۴]

دانه بندی لیکا، میلی‌متر	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 پوک‌هاى مورد استفاده در این تحقیق

بیولوژیکی غیر قابل تجزیه‌ای در آن وجود نداشت انجام گرفت و تمامی آزمایش‌ها نیز بر مبنای COD صورت گرفت. دما، pH و اکسیژن محلول در طی این ۳۰ روز اندازه‌گیری می‌گردید 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 غلظت‌های متفاوت هر چند روز یک‌بار در داخل تانک مخصوص تهیه می‌شد و براساس زمان ماند و با دبی معینی وارد راکتور می‌گردید.

غلظت فاضلاب در مخزن تزریق (تانک خوراک) و غلظت خروجی از راکتور با انجام نمونه‌گیری، مورد بررسی قرار می‌گرفت. 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 می‌گرفت تا بتوان از میزان کمی ذرات جامد معلق، قبل از ته نشینی نیز اطلاعات ثبت نمود. به منظور تصفیه مناسب بار آلی می‌بایستی میکروارگانیسم‌ها با فاضلاب ورودی سازگار شوند؛ از این رو در این مرحله، زمان نمونه‌گیری چند برابر زمان ماند هیدرولیکی تعیین شد. در ابتدا تغییراتی روزانه در نمونه برداری مشاهده نمی‌شد و زمان

خوراک ورودی با غلظت در حدود ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر تزریق شده و در طول مدت یک ماه به مقدار ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج براساس آزمایش COD خوراک ورودی و مایع داخل راکتور می‌باشد که ۳۰ روز متوالی به طول می‌انجامد.

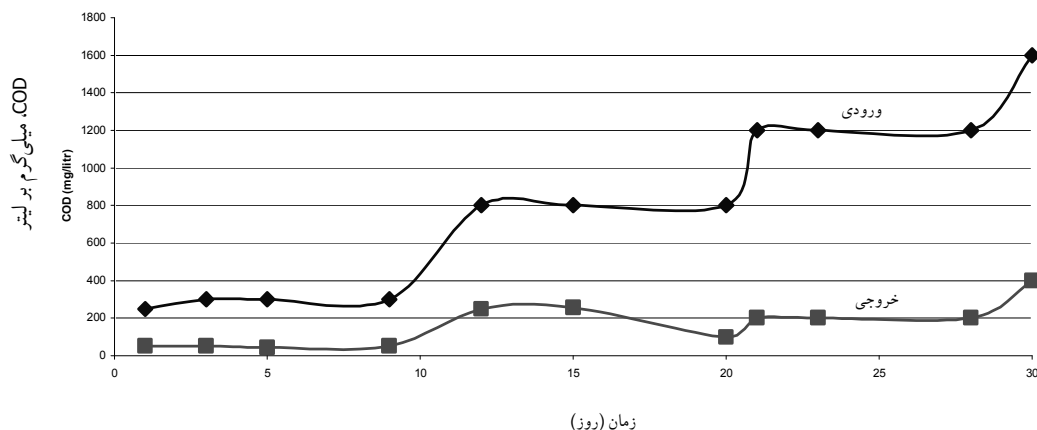
هنگامی که غلظت خوراک ورودی از ۲۵۰ به ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت، غلظت پساب خروجی راکتور به حداکثر رسید. این افزایش زیاد در غلظت راکتور به علت افزایش ناگهانی بار آلی می‌باشد. با افزایش غلظت بار آلی ورودی از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تغییر محسوسی در غلظت درون راکتور دیده نمی‌شود؛ که این امر بیانگر سازگار شدن میکروارگانیسم‌ها با محیط می‌باشد (شکل ۳).

پس از گذشت ۱۰ روز، بیوفیلم محسوسی روی پوک‌ها مشاهده شد که موجب لزجی محسوس پوک‌ها گردید. با افزایش خوراک دهی در انتهای هفته دوم، بر روی آکنه‌ها بیوفیلم کامل تشکیل شد و $MLSS^1$ محتویات راکتور تا حدود ۳۰۰۰ میلی‌گرم 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 آزمایش‌ها بر روی مایع خروجی از دستگاه سانتریفوژ که کاملاً صاف، شده بود و هیچ جزء

¹ Mixed Liquor Suspended Solids

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

COD	ازت کل	کلرور	پروتئین	منیزیم	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

از خروجی راکتور به صورت روزانه به عمل آمده و در جدول ثبت می‌گردید (جدول ۴).

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 مقایسه‌ای 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.

شکل ۵ نیز مقایسه‌ای 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

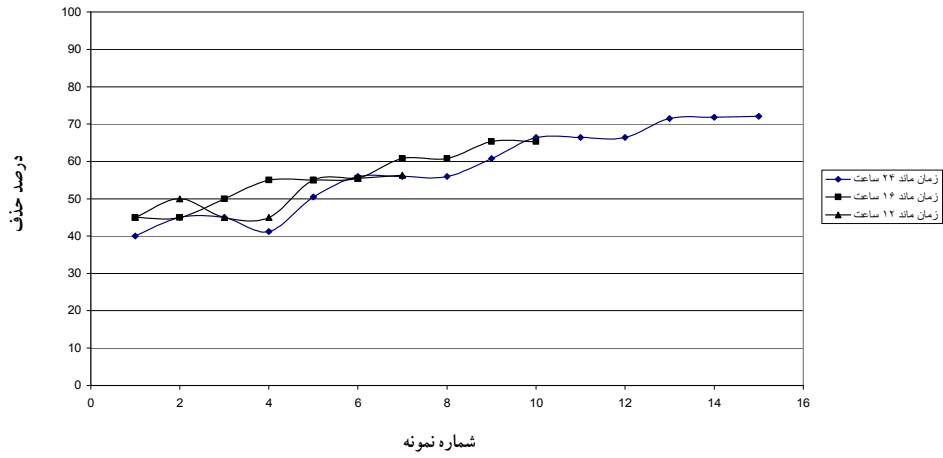
برای این منظور زمان ماند در COD با غلظت ۳۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، از ۱۲ ساعت به ۶ ساعت کاهش داده شد. قبل از اعمال

نمونه‌برداری 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 میلی‌گرم 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 میلی‌گرم بر لیتر به ۳۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داده شده و سپس دفعاتاً به مقدار ۸۰۰ میلی‌گرم 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 میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته و مجدداً و به طور منظم غلظت خوراک از ۳۲۰۰ به ۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و زمان ماند نیز به ۱۲ ساعت کاهش داده شد. در زمان ماند ۱۲ ساعت سیستم دچار شوکی از نظر زمان ماند گردید که پیامدهای آن ثبت گردیده است.

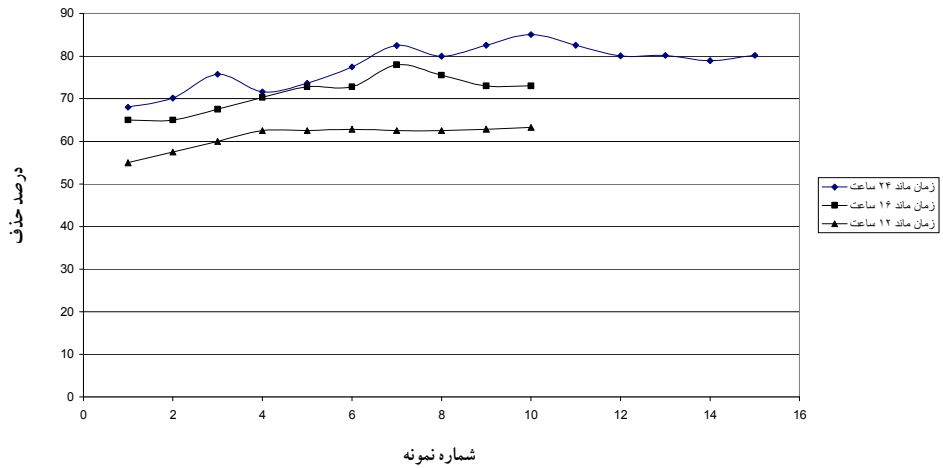
۳- نتایج و بحث آزمایش‌ها

در مرحله اول زمان ماند ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و COD فاضلاب از مقدار ۱۶۰۰ تا ۳۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش و ناگهان به مقدار ۸۰۰ میلی‌گرم 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. نمونه‌گیری

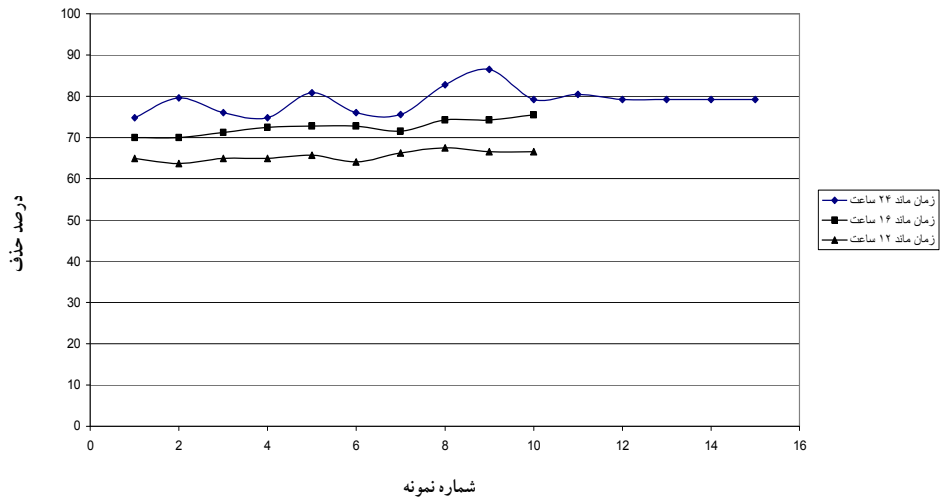
الف- مقایسه راندمان حذف در خوراک ۸۰۰ میلی گرم بر لیتر



ب- مقایسه راندمان حذف در خوراک ورودی ۱۶۰۰ میلی گرم بر لیتر



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



شکل ۴- مقایسه راندمان بر حسب خوراک‌های ورودی

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

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

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

$$۱۰۰ - ۷۸/۲۳ = ۲۱/۷۷\%$$

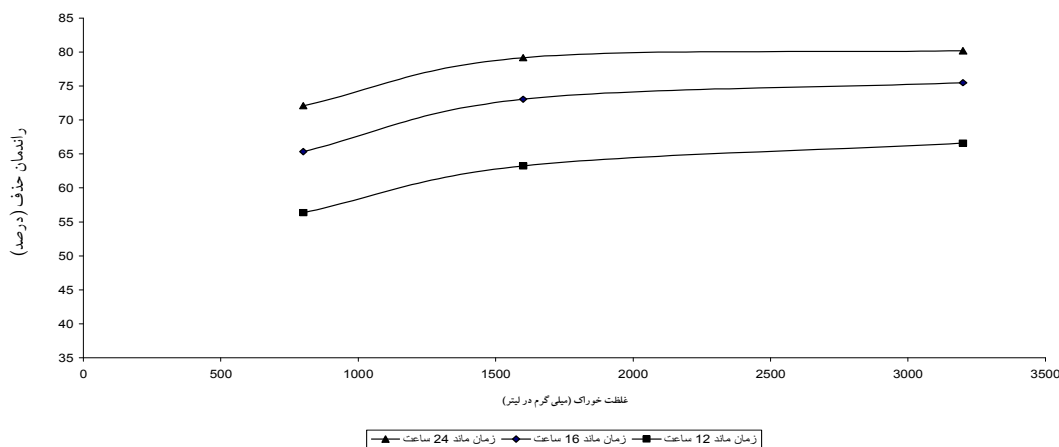
به این ترتیب، راندمان حذف هر یک از دو جرم میکروبی چسبیده و معلق در تصفیه بیولوژیکی به ترتیب برابر ۷۸/۲۳٪ و ۲۱/۷۷٪ خواهد بود. مسلم است هر چه بیوفیلم ایجاد می‌شود و فعال تر بوده و برای رشد بیوفیلم سطح ویژه بیشتری موجود باشد، سهم جرم میکروبی چسبیده در تجزیه مواد آلی بیشتر خواهد بود.

جدول ۴- جدول ثبت اطلاعات روزانه آزمایش [۸]

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

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

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

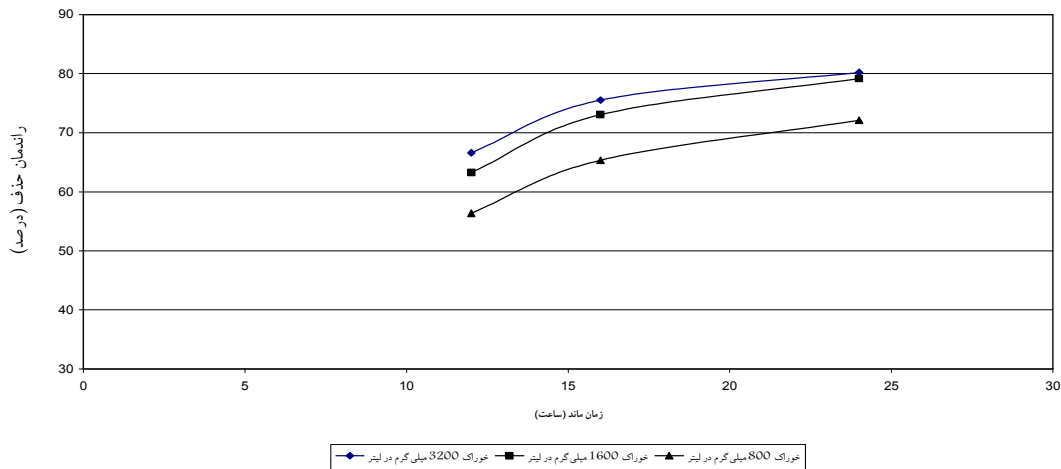


شکل ۵- راندمان حذف بر حسب تغییرات غلظت خوراک

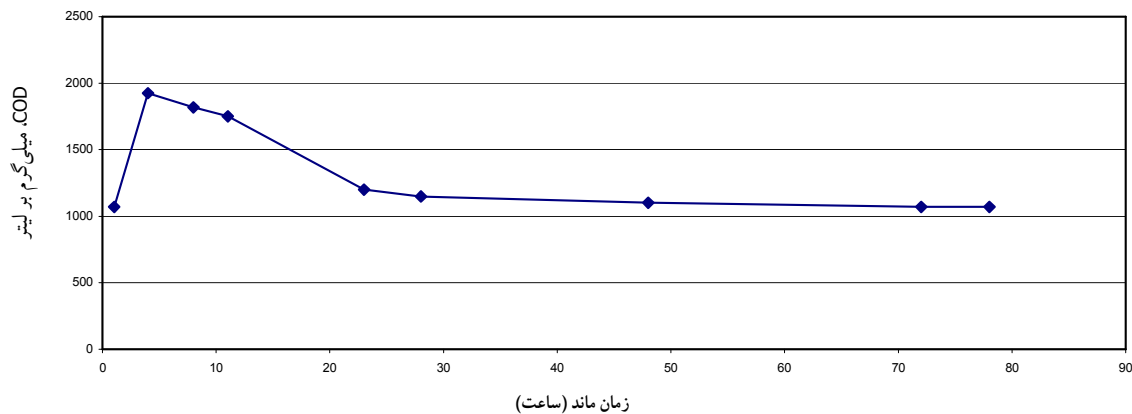
شوکه به سیستم، COD خروجی از سیستم ۱۰۷۰ میلی گرم بر لیتر بود. پس از شوک، COD خروجی افزایش یافت. مقدار ماکزیم دیده شده در خروجی ۱۹۲۴ میلی گرم بر لیتر بود. شکل ۷ تغییرات غلظت COD را قبل و بعد از شوک دادن تا رسیدن به پایداری نشان می‌دهد. سیستم پس از حدود ۶ برابر زمان ماند تقریباً به حالت پایداری اولیه بازگشت.

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 نمونه گیری شد که غلظت COD برابر ۶۷۰ میلی



شکل ۶- راندمان حذف بر حسب تغییرات زمان ماند



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

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

$$Q = \text{نرخ جریان در سیستم (دبی)} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$S_i = \text{خوراک ورودی به سیستم}$$

$$S_e = \text{خوراک خروجی از سیستم}$$

$$K_B = \text{پارامتری مربوط به چگونگی رشد توده‌های بیولوژیکی} \text{ (mg/L.s)}$$

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

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 تحقیقات انجام شده توسط Kristoffersen و Broch-Due 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

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:

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

جای پارامتر سطح (A) از پارامتر حجم (V) استفاده می شود و خواهیم داشت

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{U_{\max} QS_i / V}{K_B + QS_i / V} \quad (4)$$

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) بر حسب $\frac{V}{QS_i}$ ، (عکس مقدار بار آلی کل)، خط راستی حاصل خواهد شد. عرض از مبدأ و شیب این خط به ترتیب مقادیر K_B و 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

$$QS_i = QS_e \left[\frac{U_{\max} \left(\frac{QS_i}{V}\right)}{K_B + \left(\frac{QS_i}{V}\right)} \right] \quad (6)$$

با حل این معادله روابط زیر حاصل می گردند:

$$V = \frac{QS_i}{\left(\frac{U_{\max} S_i}{S_i - S_e}\right) - K_B} \quad (7)$$

$$S_e = S_i - \frac{U_{\max} S_i}{K_B + QS_i / V} \quad (8)$$

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

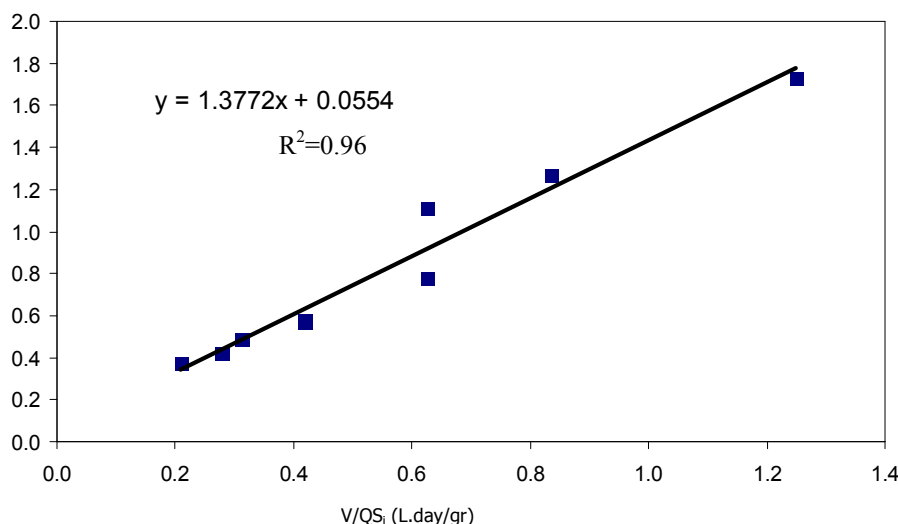
با استفاده از این مدل و هم چنین رسم نمودن اطلاعات در دسترس در شکل همان طور که دیده می شود، R^2 معادله رگرسیون برابر با ۰/۹۶ می باشد.

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

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	۰/۵۷۷	۱/۷۳۴	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

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 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 ۲۳/۷۸ درصد به ۷/۲۱ 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 رسد.

۴-۱۰- مدل اصلاح شده کین کانن و استوور 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:

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

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

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 ماندهای 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

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- سهرازی، م.، (۱۳۷۴). "طراحی راکتورهای 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 راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۶- گاییک 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.