علـــوم محـــیـــطی ۸ ، تـابستـان ۱۳۸۴
ENVIRONMENTAL SCIENCES 8 , Summer 2005
۲۹-۴۲

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

آزاد کاوسی
کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
مهدی برقعی
دکترای مهندسی شیمی ، استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در چند سال اخیر کاربرد سیستم بیوفیلمی از جمله راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک[1] در تصفیه بیولوژیکی فاضلاب‌های شهری وصنعتی توسعه یافته است. در این مطالعه از پوکه‌های معدنی بسیار سبک به‌عنوان ساپورت بیوفیلم در راکتوری که دارای ویژگی‌های یک راکتور هوازی بود استفاده گردید. فاضلاب ورودی به راکتور ،محلول ساخته شده از ملاس قند همراه با مواد مغذی افزودنی بود که خوراک مناسبی برای رشد میکرو ارگانیزم‌ها محسوب می‌گردد. اکنه‌هائی که ۷۰ درصد حجم راکتور را پر نموده بودند از نوع پوکه‌های معدنی با ویژگی‌های خاص که مصارف صنعتی دارند انتخاب شدند. عملکرد آکنه‌ها به عنوان سطح فراهم شده برای رشد میکرو ارگانیزم‌های 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 $۱/۷۶۶ Kg^{COD}/_{m^2}$ را داراست و در صورت کاهش زمان 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 گردید که از کل راندمان حذف مواد کربنه ۷۸/۲ درصد مربوط به بیوفیلم و ۲۱/۸ درصد مربوط به میکرو ارگانیزم‌های شناور است. اطلاعات آزمایشگاهی با رابطه اصلاح شده Stover – Kincannon مطابقت دارند و از این طریق می‌توان مدل ریاضی سیستم را ارائه نمود.

کلیدواژه‌ها: اکسیژن مورد نیاز شیمیایی، فیلم میکروارگانیسم، راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک، لیکا

The Use of Light Expandend clay Aggregates as a Biological Support in Wastewater Treatment

Azad Kavosi, M.Sc.
Civil Engineering, Sharif University
Mehdi Borghei, Ph. D.
Professor, Faculty of Chemical Engineering and petroleum, Sharif University

Abstract
The moving bed biological reactor (MBBR) has recently been used in industrial and municipal wastewater treatment. The process used in this project involves a kind of Bio-Filter with light packing. In this paper, the usage of a particular kind of mineral packing called 'Leca' (Light Expanded Clay Aggregate) as a biological support in the treatment of wastewater is examined. By changing the inlet flow and applying a different HRT (Hydraulic Retention Time) in different wastewater COD, the system is placed under examination. Diagrams are made by regularly evaluating COD on the outlet wastewater. The artificial wastewater, with sugar beet factory wastewater, was made in the COD Concentration Range of 800 to 3200 mg/lit and with three different retention times of 12,16 and 24 hours and injected into reactor. The mean value of COD removal is in the range of 66.6% to 79.2% according to the diagrams presented in the article. Also the BOD removal is established in inlet wastewater with a COD Concentration of 3200 mg/lit in all three retention times (24, 16 and 12) as 71%, 61% and 60.2%. In order to calculate the biomass in the system, at a HRT of 12 hours, a substrate with COD concentration of 2000 mg/lit was made and the sample was collected after 36 hours. Hence, the partnership between attached growth and submerged growth are approximately 78.23 % and 21.7% for evaluating the application of supports.

Keywords: COD, biological growth, Moving bed biofilm reactors, Lica.

مقدمه

مقولهٔ محیط زیست و ضرورت حفاظت از آن، به عنوان دانش و بینش، از تاریخچه‌ای بس نوین برخوردار بوده به همین دلیل است که هنوز، جایگاه واقعی خود را در میان اذهان عمومی باز ننموده است. یکی از انواع آلودگی‌های محیط زیست، آلودگی منابع آبی است. آلودگی آب،حاصل از ورود هر جسم خارجی به آن است. به طوری که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی آن طوری تغییر می‌نماید که از حد معیار طبیعی و استاندارد تعیین شده جهت مصارف ویژه خارج شود.

ا ز جمله روش‌هایی که برای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب صنعتی بخصوص در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک می‌باشند.

در دسته بندی این سیستم‌ها مشخصه‌های مختلفی مورد نظر قرار می‌گیرد، جهت جریان، جنس آکنه‌ها، تعداد لایه‌های بستر ، براساس سرعت جریان و ... از جمله عواملی هستند که در عملکرد سیستم موثر می‌باشند.

بر این اساس در این تحقیق موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

۱- بررسی امکان استفاده از پوکه‌های معدنی ذکر شده به‌عنوان ساپورت بیوفیلم در بستر متحرک(لازم به یادآوری است که فاضلاب مورد استفاده در آزمایشات با استفاده از ملاس مدل سازی شده است.)

۲- بررسی اثر زمان ماند در غلظت‌های مختلف فاضلاب در راندمان حذف با این نوع آکنه

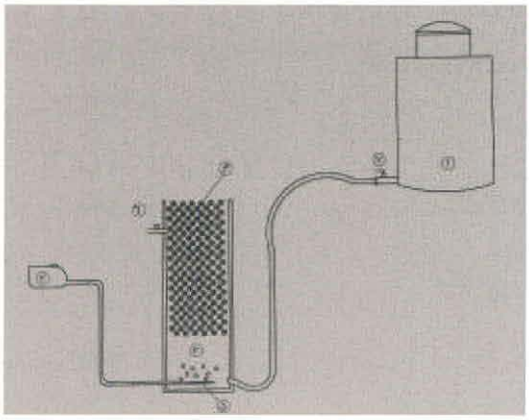
۳- ارائه مدلی مناسب جهت بررسی و طراحی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) و با این نوع آکنه

مواد و روش‌ها

با توجه به آنکه هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی استفاده از پوکه معدنی در راکتورهای با بستر متحرک می‌بود لذا از یک دستگاه پایلوت متشکل از

۱- راکتور آزمایشگاهی پرشده از آکنه‌ها، ۲- سیستم تزریق خوراک، ۳- سیستم هوادهی

برای مطالعه فوق استفاده گردید.



شکل ۱- پایلوت مورد استفاده به همراه ارتباط اجزای آن

توضیحات

۱-مخزن تزریق ۲-پمپ هوادهی ۳-پایلوت شیشه‌ای

۴- آکنه‌های لیکا ۵-دیفیوزرهای هوادهی

۶-شیر خروجی ۷-شیر تزریق

مشخصات راکتور

پایلوتی از جنس شیشه با مشخصات زیرساخته شد. برای هوادهی مناسب از پمپ هوا به ظرفیت ۴/۵ لیتر بر دقیقه که قابلیت تنظیم نرخ هوادهی را نیز دارا می‌باشد استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات پایلوت مورد استفاده در این تحقیق

طول Cm	عرض Cm	ارتفاع Cm	عمق آب Cm	حجم‌مفید (لیتر)	نوع راکتور
۲۰	۲۰	۶۰	۵۵	۲۲	بستر متحرک هوازی با جریان رو به بالا

مشخصات پوکه‌ها

برای ساپورت بیوفیلم از پوکه‌های معدنی که اصطلاحا لیکا[۲] (Degremont Biofiltration (catalogue, 2003 نامیده می‌شود استفاده گردید. 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 پائین، افت صوتی مناسب، مقاومت و پایداری است. این دانه‌ها، ذراتی مدور و سبک می‌باشند که در حرارت حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تولید می‌شود.وزن فضایی دانه‌های خشک لیکا به صورت قله و برای دانه بندی‌های مختلف در جدول زیر ارائه گردیده است. اصلی‌ترین عامل در سبکی دانه‌های لیکا وجود هوای بین و داخل دانه‌هاست که به صورت توپی از هوا آنها را در می‌آورد. این هوا برحسب دانه بندی بین ۷۳ الی ۸۸ درصد فضای کل را اشغال می‌کند.

جدول ۲- خواص دانه بندی لیکا
(مشخصات پوکه‌های شرکت لیکا)

دانه بندی لیکا mm	۱۰-۲۰	۳-۱۰	۰-۳	۰-۲۵
کیلوگرم بر متر مکعب	۲۸۰-۳۸۰	۳۳۰-۴۳۰	۴۳۰-۵۳۰	۴۳۰-۳۳۰

این دانه‌ها با سطح ویژه بسیار بالا در حدود m^2/m^3 ۵۲۵، محیطی مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها را در حجمی محدودفراهم می‌آورند.

ویژگی‌های خاص پوکه‌های لیکا عبارتند از: (Degremont Biofiltration catalogue, 2003)

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- به دلیل سبکی حمل و نقل آن آسان می‌باشد.
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 پوکه‌ها در برابر شوک‌های ناشی از ورود فاضلاب‌های ناخواسته به شبکه می‌باشد.

شکل ۲- نمائی از پوکه‌های مورد استفاده در این تحقیق

راه اندازی راکتور

برای راه اندازی راکتور از لجن تصفیه خانه شهرک اکباتان استفاده شد. راکتور تا ۵۰ درصد حجمی از این لجن پر شده 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 الی ۴ میلی گرم اکسیژن در لیتر باشد. اکسیژن محلول به طور مداوم مورد بررسی قرار گرفت تا هیچ گاه میزان آن از ۲ میلی‌گرم در لیتر کمتر نباشد. راکتور به صورت

ناپیوسته مورد بهره برداری قرار گرفت تا بیوفیلم به صورت مناسب رشد کند و راکتور برای شروع کار به‌صورت پیوسته آماده گردد. به منظور تهیه خوراک ورودی به راکتور از ملاس (حاصل از چغندر قند) استفاده گردید. با توجه به آنکه در طول انجام پروژه از ملاس به‌عنوان سازنده فاضلاب مصنوعی استفاده می‌گردید، برای سازگار گشتن میکروارگانیسم‌ها با این فاضلاب، استفاده از ملاس مناسب‌ترین گزینه برای راه اندازی سیستم می‌باشد.

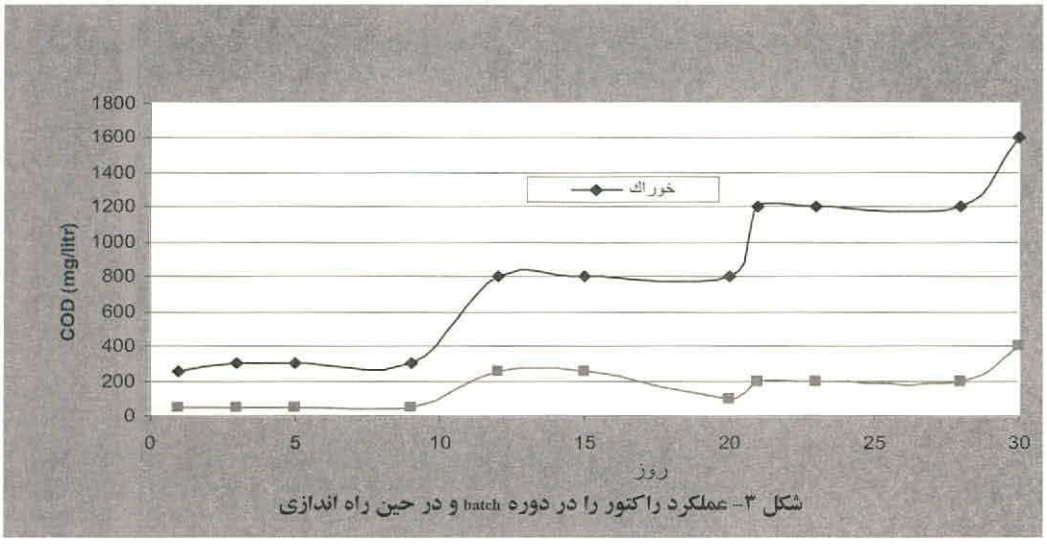
به منظور تأمین مواد مغذی و شرایط بهینه برای رشد میکروارگانیسم‌ها، به همراه ملاس ورودی از فسفات آمونیوم به عنوان منبع تأمین فسفر و اوره به عنوان تأمین کننده نیتروژن استفاده شد. معیار استفاده از نیتروژن و فسفر دستیابی به نسبت COD/N/P برابر ۱۰۰/۵/۱ می‌باشد که در عمل برای جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های رشته ای از میزان فسفات آمونیوم بیشتری استفاده گردید.

خوراک ورودی با غلظت در حدود ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر تزریق شده و در طول مدت یک ماه به مقدار ۸۰۰، ۱۲۰۰، 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 $\frac{mg}{lit}$ ۲۵۰ به $\frac{mg}{lit}$ ۸۰۰ افزایش یافت یک حداکثر در غلظت خروجی از راکتور مشاهده گردید. این افزایش زیاد در غلظت راکتور به علت افزایش ناگهانی بارآلی می‌باشد. با افزایش غلظت بار آلی ورودی از $\frac{mg}{lit}$ ۸۰۰ به $\frac{mg}{lit}$ ۱۲۰۰ و در ادامه، تغییر محسوسی در غلظت درون راکتور دیده نمی‌شود که این بیانگر سازگار شدن میکروارگانیسم‌ها با محیط می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات ملاس استفاده شده برمبنای $\frac{mg}{lit}$ ملاس

COD mg/lit	ازت کل mg/lit	کلرور mg/lit	پروتئین mg/lit	منیزیم mg/lit	سدیم mg/lit	پتاسیم mg/lit	خاکستر mg/lit
750 -790	۱۵/۲۵	۱۱۵	۶۵/۴	۱۵۹/۲	۱۰	۲۴	۸۳/۵



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

پس از گذشت ۱۰ روز بیوفیلم محسوسی روی پوکه‌ها مشاهده شد که موجب لزجت محسوس پوکه گردید. با افزایش خوراک دهی در انتهای هفته دوم بیوفیلم کاملاً بروی آکنه‌ها تشکیل شد و MLSS[3] محتویات راکتور تا حدود $\frac{mg}{lit}$ ۳۰۰۰ افزایش یافت. از این زمان به بعد افزایش خوراک، مقدار COD[4] را در داخل راکتورها چندان تغییر نداد. لازم به ذکر است که این آزمایشات بعد از عبور مایع از دستگاه سانتریفوژ بود، که مایع کاملاً صاف شده و جز غیر قابل تجزیه بیولوژیکی در آن وجود ندارد و تمامی آزمایشات برمبنای COD می‌باشد. دما، مقدار PH و اکسیژن محلول[5] در طی این ۳۰ روز اندازه گیری می‌گردید. که مقدار هر یک به ترتیب ^{0}C ۲۰ و PH در حدود ۸/۱-۷/۲ و مقدار DO برابر $\frac{mg}{lit}$ DO=3.5-6 بود.

روش کار

بعد از گذشت مدت کارکرد ناپیوسته و فرا رسیدن زمان راه اندازی ، راکتور آماده فعالیت و بارگیری پیوسته است. فاضلاب مصنوعی ساخته شده از ملاس به همراه مواد مغذی (شامل اوره و فسفات آمونیوم) با غلظت‌های متفاوت هر چند روز یکبار در داخل تانک مخصوص تهیه می‌گشت 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 نمونه گیری 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 قراردادن در داخل دستگاه سانتریفوژ نیز مورد بررسی قرار می گرفت تا بتوان از میزان ذرات جامد معلق قبل از ته نشینی نیز اطلاعات ثبت نمود. به منظور تصفیه مناسب بار آلی می‌بایستی میکروارگانیسم‌ها با فاضلاب ورودی سازگار شوند و لذا در این مرحله زمان نمونه گیری چند برابر زمان ماند هیدرولیکی انتخاب می‌گردید و لذا در ابتدا تغییراتی روزانه در نمونه برداری مشاهده نمی‌گردید، و زمان نمونه برداری در حدود ۴-۲ روز انتخاب گردید. پس از این مدت آزمایشات در سه زمان ماند ۲۴، ۱۶ و ۱۲ ساعت انجام شد و در هر دوره غلظت خوراک در دامنه ۳۲۰۰ تا ۸۰۰ $\frac{mg}{lit}$ و بالعکس تغییر داده می‌شد، در هر حالت که در حدود یک‌ماه به‌طول می‌انجامید خروجی راکتورها مورد بررسی قرار گرفته و راندمان حذف تعیین می‌گردید. در زمان ماند ۲۴ ساعت، غلظت خوراک ورودی از ۱۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ۳۲۰۰ میلی گرم در لیتر افزایش داده شده و سپس دفعتاً به مقدار ۸۰۰ میلی‌گرم در 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 افزایش یافته و در ادامه و به‌طور منظم از غلظت خوراک ۳۲۰۰ به میزان ۸۰۰ و در زمان ماند ۱۲ ساعت کاهش داده شد. در زمان ماند ۱۲ ساعت سیستم دچار شوکی از نظر زمان ماند گردید که پی‌آمدهای آن ثبت گردیده است.

بحث و نتیجه گیری

در مرحله اول زمان ماند ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد و COD فاضلاب از مقدار $\frac{mg}{lit}$ ۱۶۰۰ تا $\frac{mg}{lit}$ ۳۲۰۰ افزایش و ناگهان به مقدار $\frac{mg}{lit}$ ۸۰۰ کاهش یافت. با توجه به زمان ماند دبی راکتور در $\frac{lit}{hr}$ ۰/۹۲ تنظیم شد. به منظور تأمین خوراک ورودی راکتور و با توجه به مصرف شبانه روزی lit ۲۲ در این زمان ماند،به‌صورت روزانه بشکه ۱۰۰ لیتری خوراک هر ۴ روز می باید پر و آماده گردید و به منظور حصول اطمینان از وجود هد

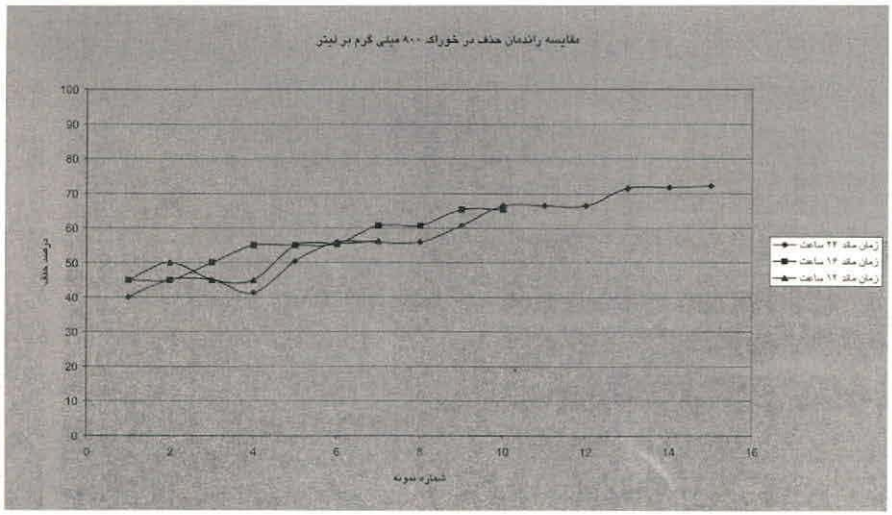
لازم بـرای تزریـق یکنواخـت، بشـکه هـر ۲ روز شـارژ می‌گردید تا همواره ارتفاع آب، هد لازم برای تزریق ثقلی را تـأمین نمایـد. نمونـه‌گیـری از خروجـی راکتـور به‌صورت روزانه به‌عمل آمده و در جدولی مانند زیر ثبت می‌گردید.

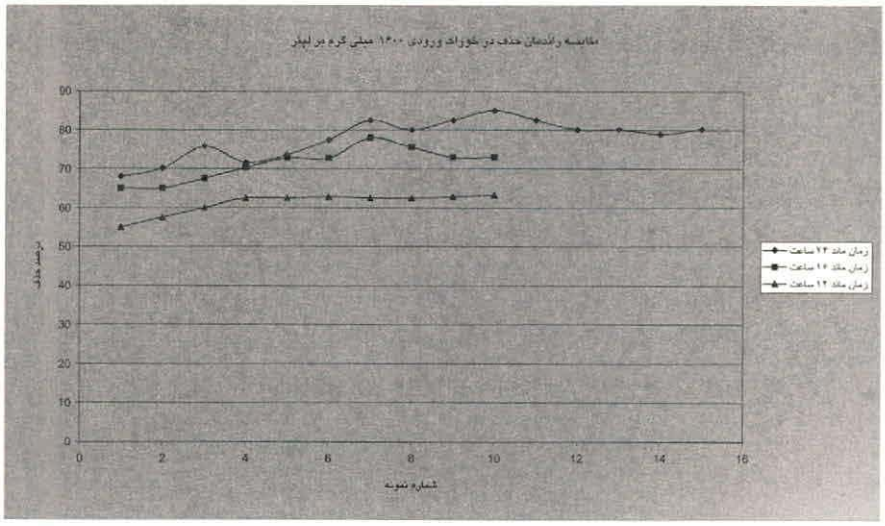
به آسانی و بر طبق انتظار مشاهده می‌گردد که بـا افـزایش زمـان مانـد, راندمان حـذف در هـر خـوراک بـه طـور محسوسی افزایش می‌یابد. با توجه به آنکه در دبی ثابت فاضلاب, افزایش زمان ماند نیاز به افزایش حجـم راکتـور و مخازن داشته و در پی آن موجب صرف هزینه‌های بیشتر می‌گردد, لذا می‌باید در این افزایش زمان مانـدی 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.

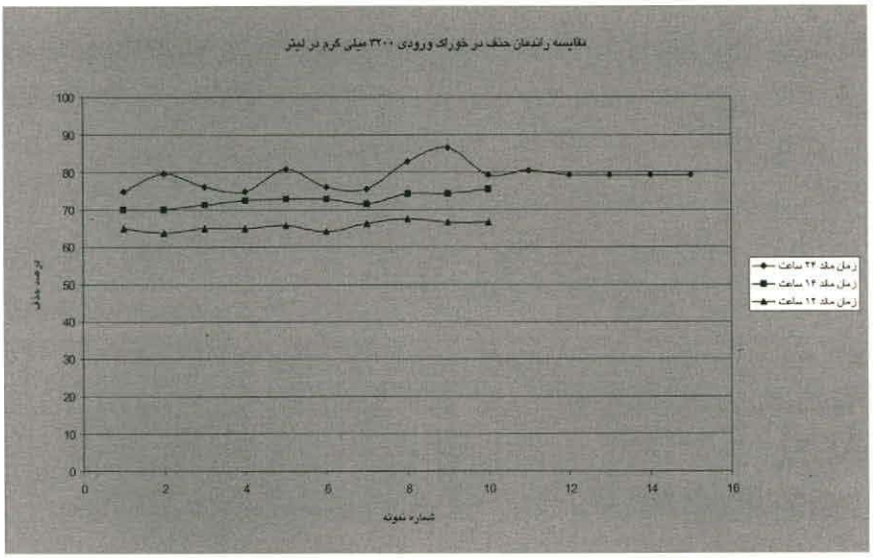
جدول ۴- جدول نمونه گیری که از آن برای ثبت نتایج استفاده می گردید

(Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 18th Edition)

شماره ردیف	تاریخ آزمایش	N	Sample A	Sample B	COD	PH	D.O.
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

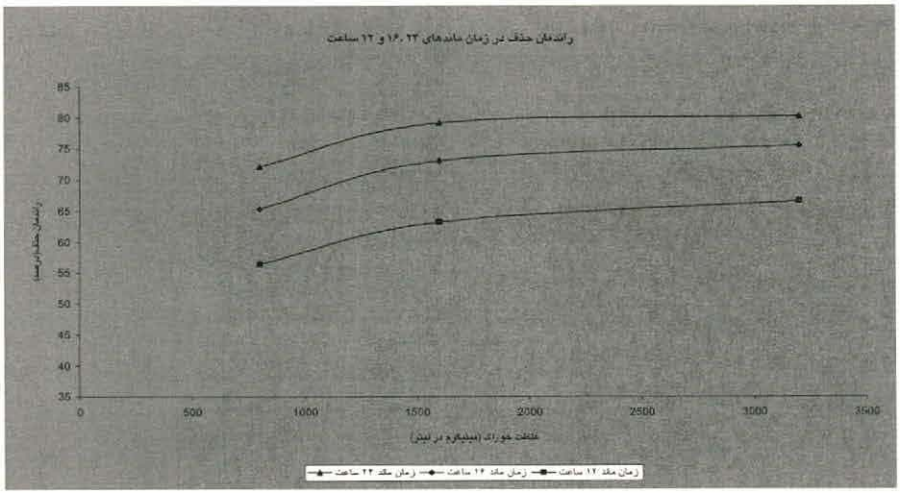






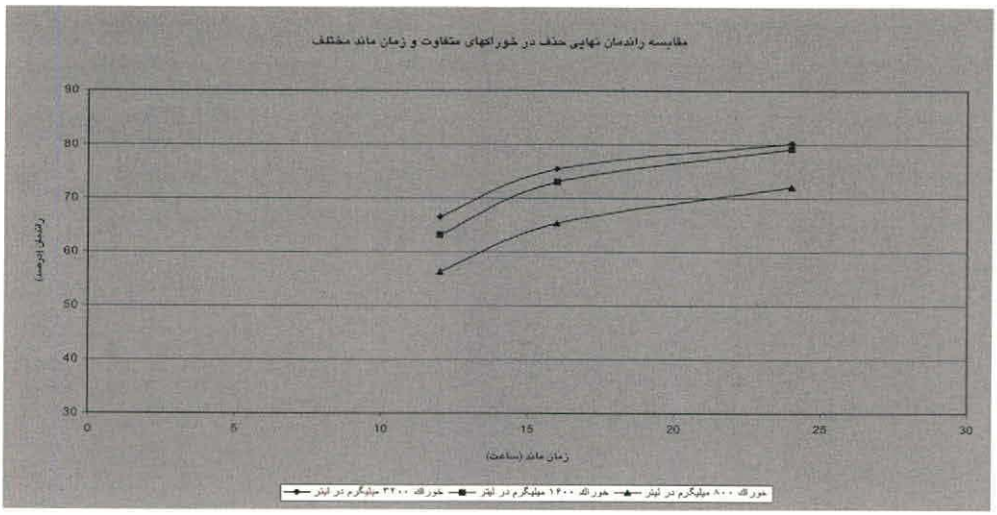
شکل ۴- مقایسه راندمان بر حسب خوراکهای ورودی

در این بخش راندمان حذف نهایی (پس از ثابت شدن راندمان در راکتور) بر حسب غلظت خوراک مقایسه می‌شود. قابل مشاهده است که با افزایش زمان ماند راندمان نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵- راندمان حذف بر حسب تغییرات غلظت خوراک

در این بخش راندمان حذف نهایی (پس از ثابت شدن راندمان در راکتور) بر حسب زمان ماند مقایسه می‌شود. قابل مشاهده است که با افزایش غلظت خوراک راندمان نیز افزایش می‌یابد.



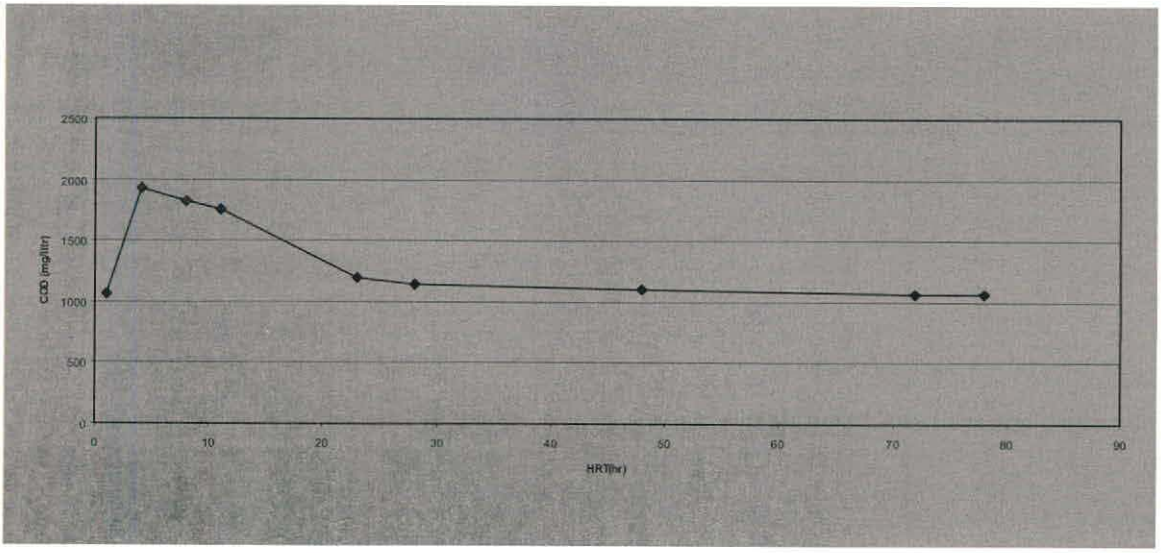
شکل ۶- راندمان حذف بر حسب تغییرات زمان ماند

آنچه مسلم است افزایش زمان ماند نیاز به افزایش حجم راکتور و صرف هزینه‌های بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب می باید با توجه به استانداردهای خروجی زمان ماند بهینه را تعیین نمود.

شوک هیدرولیکی

برای این منظور درCOD دارای غلظت mg/lit ۳۲۰۰، زمان ماند از ۱۲ ساعت به ۶ ساعت کاهش داده شد.

قبل از اعمال شوکه به سیستم، COD خروجی از سیستم mg/lit ۱۰۷۰ بود. پس از شوک COD خروجی افزایش یافت. مقدار ماکزیمم دیده شده در خروجی mg/lit ۱۹۲۴ بود. شکل زیر منحنی تغییرات غلظت COD را قبل و بعد از شوک دادن تا رسیدن به پایداری را نشان می‌دهد. سیستم پس از حدود ۶ برابر زمان ماند تقریباً به حالت پایداری اولیه بازگشت.



شکل۷- تغییرات غلظت COD برحسب زمان قبل و بعد از شوک هیدرولیکی

بررسی راندمان حذف هر یک از جرم های میکروبی در راکتور

برای این منظور در زمان ماند ۱۲ ساعت خوراکی با COD برابر mg/lit ۲۰۰۰ به راکتور داده شد و پس از گذشت سه برابر زمان ماند از خروجی نمونه گیری شد که COD خروجی mg/lit ۳۰۰ به دست آمد. در مرحله بعد کل مایع موجود در راکتور که همان سوسپاسیون لجن است از سیستم خارج شده و راکتور با دبی mgCOD/lit ۶۰ از خوراک برگردید و مجددا پیوسته درآمد. 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 mgCOD/lit ۶۷۰ محاسبه شد و براساس این دو آزمایش مشخص می‌شود در صورتی که جرم میکروبی معلق و چسبیده هر دو در سیستم باشند درصد حذف ۸۵ درصد و وقتی فقط چسبیده باشد ۶۶/۵ درصد خواهد بود. که به این ترتیب راندمان حذف هر یک از دو جرم میکروبی چسبیده و معلق در تصفیه بیولوژیکی به ترتیب۷۸/۲۳ درصد و ۲۱/۷ درصد 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.

سینتیک هیدرولیکی در راکتورهای بیوفیلمی (Hosseiniy *et al.*, 2002)

مدل‌های مختلفی در زمینه بررسی راکتورهای بیوفیلمی موجود است. از مدل‌های بسیار کارآمد و مؤثر برای بیان سیستم‌های بیوفیلمی، مدل Stover-Kincannon می‌باشد. این مدل به‌صورت زیر بیان می گردد:

$$\frac{ds}{dt}=\frac{U_{Max}(\frac{QS_i}{A})}{K_B+(\frac{QS_i}{A})} \qquad (۱)$$

همچنین با نوشتن موازنهٔ جرم در اطراف سیستم خواهیم داشت:

$$\frac{ds}{dt}=\frac{Q}{V}(S_i-S_e) \qquad (۲)$$

بنابراین با تساوی قراردادن طرف‌های دوم معادله خواهیم داشت:

$$\frac{dS}{dt}=\frac{Q}{V}(S_i-S_e)=\frac{U_{Max}(\frac{QS_i}{A})}{K_B+(\frac{QS_i}{A})} \qquad (۳)$$

معادلهٔ (۳) اولین بار برای راکتورهای RBC[۶] 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 صرف‌نظر باشد. براساس تحقیقات انجام شده توسط O.Kristoffersen و A. Broch-Due ذرات معلق بیولوژیکی در راکتورهای فیلمی با بستر متحرک سهم زیادی از جامدات بیولوژیکی در راکتور را تشکیل می‌دهند و بر این اساس نمی‌توان از آن صرف‌نظر نمود. بنابراین در معادلهٔ (۳) بجای پارامتر سطح (A) از پارامتر حجم (V) استفاده می‌شود، بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{dS}{dt}=\frac{Q}{V}(S_i-S_e)=\frac{U_{Max}(\frac{QS_i}{V})}{K_B+(\frac{QS_i}{V})} \qquad (۴)$$

براساس تحقیقاتی که Henze and Harremoes (1983), Kincannon-Stover(1982) انجام دادند نتایج نشان می‌دهد که سرعت حذف COD، بازدهی حذف، بستگی زیادی به بارآلی اعمال شده به سیستم دارد تا به غلظت مواد آلی و یا بار هیدرولیکی.

با خطی سازی معادلهٔ (۴) خواهیم داشت:

$$(\frac{dS}{dt})^{-1} = \frac{V}{Q(S_i - S_e)} = \frac{K_B}{U_{Max}}(\frac{V}{QS_i}) + \frac{1}{U_{Max}} \qquad (۵)$$

با رسم $\frac{V}{Q(Si-Se)}$، معکوس سرعت حذف مواد آلی برحسب $\frac{V}{QSi}$، عکس مقدار بار آلی کل، خط راستی حاصل خواهد شد. عرض از مبدأ و شیب این خط به ترتیب مقادیر U_{Max} ,K_B می‌باشند. با نوشتن موازنهٔ جرم برای کل راکتور میزان حجم و همچنین غلظت مواد آلی خروجی از راکتور قابل محاسبه است.

با جایگزینی معادلهٔ (۴) توسط رابطهٔ (۲) داریم:

$$QS_i = QS_e + \frac{U_{Max}(\frac{QS_i}{V})}{K_B + (\frac{QS_i}{V})}V \qquad (۶)$$

با حل این معادله روابط زیر حاصل می‌گردند:

$$V = \frac{QS_i}{(\frac{U_{Msax}}{S_i - S_e}\frac{S_i}{}) - K_B} \qquad (۷)$$

$$S_e = S_i - \frac{U_{Max}S_i}{K_B + \frac{QS_i}{V}} \qquad (۸)$$

روابط (۷) و (۸) نشان می‌دهند که معادلهٔ Stover-Kincannon معادلهٔ خوبی جهت طراحی این گونه از راکتورها محسوب می‌شوند چرا که این معادله قابلیت محاسبه حجم و غلظت خروجی از راکتورها را دارا می‌باشد.

مدل Stover-Kincannon (Hosseiniy, *et al.*, 2002)

به منظور بررسی حذف مواد آلی در این پروژه که نوعی راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک (MBBR) می‌باشد, معادلهٔ Stover-Kincannon مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور از اطلاعات آزمایشگاهی که در نتیجه کار بر روی این نوع راکتور حاصل گردیده بود استفاده شد

جدول ۵- نتایج مدل ریاضی Stover-Kincannon

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

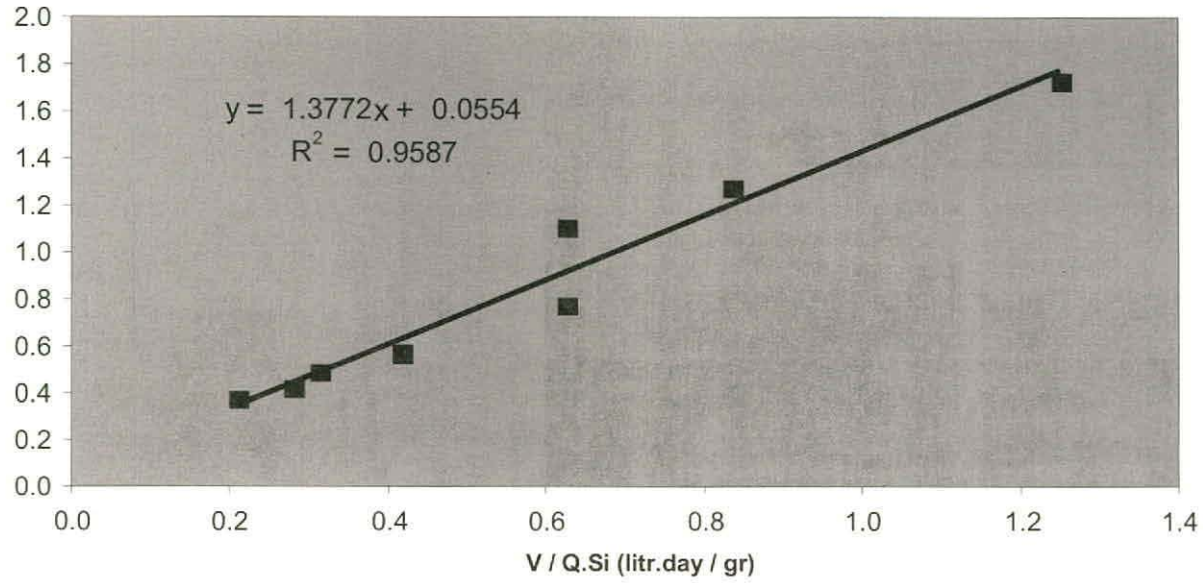
با استفاده از این مدل و همچنین رسم نمودن اطلاعات در دسترس در شکل همانطوری که دیده می شود میزان درجهٔ رگریستون برای برابر با ۰/۹۵۸۷می‌باشد. دیده می‌شود که اطلاعات حاصله با این معادله به میزان خوبی تقریب زده می‌شوند. بر این اساس معادلات حاصل برای محاسبهٔ حجم و غلظت خروجی از راکتورها در جدول 6 نشان داده شده است.

بنابراین می‌توان گفت که این مدل برای طراحی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک مدل مناسب محسوب می‌شود

جدول ۶- معادلات حاصله برای محاسبه حجم و غلظت خروجی

$Se = Si - \frac{18.0505Si}{24.859 + \frac{QSi}{V}}$	$V = \frac{QSi}{\frac{18.0505Si}{Si - Se} - 24.859}$

مدل Kincannon – Stover برای راکتور با بستر متحرک



شکل ۸- رسم مدل بر حسب داده‌های جمع آوری شده

نتیجه گیری

- 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 راندمان میانگین حذفی در حدود ۸۰/۲ درصد بهدست آمد.
- پس از اعمال شوک هیدرولیکی، پایداری نسبتاً مناسبی مشاهده می گردد، سیستم پس از ۶ برابر زمان ماندی که در آن کار می کرد به حالت پایدار اولیه بازگشت.
- در طول این پروژه و با تغییرات بار ورودی و زمان ماندهای اعمال بر سیستم، مشاهده گردید با کاهش زمان ماند، غلظت خروجی افزایش یافته و درصد و راندمان حذف COD کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت خوراک ورودی و در زمان ماندهای ثابت توان حذف COD در سیستم بالا می‌رود و این نکته بیانگر توانایی بالاتر راکتور، در حذف در غلظت‌های بالاتری از فاضلاب می‌باشد.
- با توجه به آنکه تأمین زمان ماند هیدرولیکی بالاتر در سیستم، و در پی آن افزایش راندمان حذف نیاز به حجم بالاتری برای فیلتر و نگهداری ساپورت‌ها داشته و این خود موجب افزایش هزینه‌های اقتصادی و سرمایه گذاری بالاتری می گردد، لذا 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 نیز توجیه پذیر باشد به عنوان زمان ماند ایده‌آل معرفی نمود.
- با افزایش غلظت خوراک ورودی، رشد بیوفیلم افزایش یافته و مصرف اکسیژن آنها نیز بیشتر می گردد. در نتیجه DO درون راکتور کاهش می‌یابد. با توجه به آن که ظرفیت هوادهی سیستم به گونه‌ای است که توان جبران این کاهش را دارد لذا می‌توان با افزایش دبی هوا از افت راندمان جلوگیری نمود.
- با توجه به آن که سهم رشد چسبیده در این سیستم و بروی این آکنه‌ها به رشد معلق در حدود۷۸/۲۳ درصد به ۲۱/۷ درصد بوده است، لذا مشاهده می گردد که این پوکه ها به منظور ساپورت برای رشد بیوفیلم مناسب می‌باشند.
- در هنگام راه اندازی سیستم، پس از گذشت حدود ۳ الی ۴ هفته سیستم کاملاً آماده راه اندازی گردید.
- با توجه به سهم بالای رشد میکروبی چسبیده به رشد معلق و بالارو بودن جریان و دستیابی به بازدهی مناسب نیاز به برگشت لجن در سیستم مشاهده نگردید که این خود از مزایای استفاده از این روش تصفیه، بیانگر قابلیت آکنه‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های پمپاژ می گردد.
- با گذشت زمان و در پی افزایش پیشروی پروژه، سیستم مرتباً پایدارتر گشته و در مدت زمانی کوتاه تر به حالت پایداری می‌رسید.
- مدل Kincannon & Stover برای بررسی راکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک مدل بسیار مناسبی می‌باشد و با این مدل می‌توان میزان حجم و یا غلظت خروجی از راکتور را محاسبه نمود.

پی نوشت‌ها

1- Moving Bed Biofilm Reactor
2- Light Expanded Clay Aggregate catalogue (LECA)
3- Mixed Liquor Suspended Solid
4- Chemical Oxygen Demand
5- Disolved Oxygen (DO)
6- Rotating Biological Contactors

منابع

برقعی، مهدی (۱۳۸۱). *تصفیه فاضلاب صنعتی*.انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.

قلی کندی، گاگیک بدلیانس(۱۳۸۱). *طراحی فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تصفیه فاضلاب*. انتشارات صنعت برق.

برقعی، مهدی و سید حسین حسینی(۱۳۸۰). *بررسی اثر بازدارندگی فنل در فاضلاب های صنعتی با استفاده از رآکتورهای بیوفیلمی با بستر متحرک*.پایان نامه کارشناسی ارشد.دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف.

برقعی، مهدی و علی فیضی (۱۳۷۹). *بیوفیلتر هوازی با بستر متحرک در تصفیه فاضلاب شهری*. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی شریف.

سهرابی، مرتضی (۱۳۷۴). *طراحی رآکتورهای شیمیایی*. انتشارات دانشگاه امیرکبیر.

Hosseiniy, S.H., Borghei, S.M., and Scientia Irania (2002). Modeling of Organic Removal in a Moving Bed Biofilm Reactor.

Metcalf & Eddy (2003). Watewater Engineering-Treatment and Reuse, Fourth Edition.

Schroeder D., (1977). Water and Wastewater Treatment. *McGraw Hill, Inc.*