

عملکرد فیلترهای هوادهی شده مستغرق در تصفیه فاضلاب و تولید لجن مازاد بیولوژیکی

محمدعلی بقاء پور^۱ ابراهیم جباری^۲

(دریافت ۸۴/۱۰/۲۷ پذیرش ۸۵/۹/۱)

چکیده

به منظور تولید زائدات کمتر در فرآیند تصفیه فاضلاب و به خصوص کاهش لجن مازاد، منطقی است که نرخ تولید این لجن در محل تصفیه به حداقل رسانده شود. در این رابطه استفاده از فیلترهای هوادهی شده مستغرق در تصفیه فاضلاب کاربرد روزافزونی پیدا کرده است و طی سالهای اخیر فیلترهای مذکور به سبب ماهیت روش تصفیه شان کمک بسزایی در کاهش زائدات و متعاقب آن پایین آوردن هزینه‌ها نموده‌اند. در این فیلترها رشد توده بیولوژیکی نه تنها به صورت چسبیده بلکه به صورت معلق نیز انجام می‌گیرد، اما نرخ تولید لجن معلق و ارتباط آن با مشخصات فیزیکی فیلتر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در هر حال ملاک طراحی و به کارگیری فیلترهای مزبور میزان بارگذاری آلی بر واحد سطح یا واحد حجم محیط به کار رفته در آنهاست. در این مطالعه به منظور ارزیابی نرخ تولید لجن اضافی در این گونه فیلترها، چهار فیلتر با مشخصات فیزیکی و سطوح مخصوص مختلف با فاضلابی مصنوعی بر پایه پودر شیر خشک کم چربی، در زمانهای ماند هیدرولیکی متفاوت مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند. در این مطالعه نشان داده شده که افزایش سطح مخصوص فیلترها در ابتدا سبب افزایش کارایی فیلتر شده و پس از آن قدرت فیلتر ثابت مانده و یا کاهش می‌یابد. نتایج نشان دادند که در کلیه فیلترها نرخ تولید لجن مازاد با کاهش زمان ماند هیدرولیکی افزایش یافته و در محیطی با تخلخل بالاتر با وجود پایین بودن کارایی در حذف آلاینده محلول، زائدات کمتری تولید نموده است.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای هوادهی شده مستغرق، فیلترهای بیولوژیکی، تصفیه فاضلاب، تولید لجن اضافی.

Performance of Submerged Aerated Biofilters for Wastewater Treatment and Excess Biological Sludge Production

Mohammad A. Baghapour¹

Ibrahim Jabbari²

(Received Jan. 17, 2006

Accepted Nov. 22, 2006)

Abstract

Minimizing sludge production in the treatment facility is a reasonable measure to reduce waste in sewage treatment, especially as regards excess biological sludge. In this regard, submerged aerated filters' (SAFs) have recently found increasing applications in treatment facilities. Thanks to their treatment mechanism, they have greatly contributed to reduction of waste production and, thereby, to reduced treatment costs. Biomass growths of both attached and suspended types take place in these filters. However, little attention has been paid to suspended sludge production and to its relationship with the physical properties of the filter. The design and application criterion for these filters is the organic loadings on unit of area or unit of volume of the media used in these filters. In this study, four filters with different physical properties and different specific areas were loaded with synthetic wastewater made of low-fat dry milk powder for five different hydraulic retention times to evaluate excess sludge production rates in submerged aerated filters. It was shown that increasing specific area increased SCOD removal efficiency up to a maximum level in saturated growths after which point the removal efficiency remained unchanging or decreased. The results also revealed that decreased hydraulic retention times increased sludge production rates in all the study columns and that media with higher porosity levels produced less excess sludge despite lower pollutant removal efficiency.

Keywords: Submerged Aerated Filters, Biological Filters, Wastewater Treatment, Excess Sludge Production.

1- PhD Student of Water Resources and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
2- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Jabbari@iust.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری عمران، مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، Jabbari@iust.ac.ir

امروزه با گسترش روشهای مختلف تصفیه فاضلاب شهری و پسابهای صنعتی به منظور حفاظت از محیط زیست، تولید زائدات حاصل از فرآیند تصفیه نیز که عموماً لجن نامیده می‌شود، خود به مسئله زیست محیطی جدیدی تبدیل گردیده است؛ چرا که تصفیه آن پر هزینه بوده و دفع آن به صورت خام نیز مشکلات زیست محیطی عدیده‌ای را به وجود می‌آورد. لذا در حال حاضر توجهات به سمت روشهای تصفیه رشد چسبیده معطوف گردیده است؛ چرا که در این روشها توده بیولوژیکی تولید شده به صورت لایه‌ای بر سطح محیط نگهدارنده می‌چسبند و از اینرو پساب خروجی از این نوع راکتورها در شرایط مشابه از نظر بارگذاری حاوی لجن معلق کمتری نسبت به روشهای رشد معلق هستند. این تفاوت را می‌توان با مقایسه پساب خروجی از صافیهای چکنده و سیستم‌های لجن فعال با حوض هوادهی شده مشاهده نمود. به کارگیری صافیهای چکنده نیز معایبی دارد که از آن جمله می‌توان به عدم استفاده بهینه از کل سطح محیط نگهدارنده و همچنین تشدید پدیده کنده شدن در زمانهای ماند هیدرولیکی کم و در شوک‌های هیدرولیکی اشاره نمود. در راستای برطرف نمودن این نقیصه، راستن^۱ اقدام به معرفی و به کارگیری فیلترهای مستغرق هوازی^۲ یا AFS نمود [۱]. در این نوع فیلترها محیط نگهدارنده به طور کامل زیر سطح فاضلاب غرق می‌شود و بر خلاف دیسک‌های بیولوژیکی دوار (RBCs) کل سطح محیط نگهدارنده با فاضلاب در تماس است و لایه بیولوژیکی حاوی توده‌های میکروبی روی این محیط رشد می‌کند. اختلاط شدیدی که در اثر تزریق هوا در کف راکتور به وجود می‌آید، سبب می‌شود که ماده مغذی^۳ در کل محیط فیلتر پخش شود و لایه بیولوژیکی نسبتاً یکنواختی روی محیط رشد کند. منحنیهای توزیع زمان ماند حاصل از مطالعات به وسیله ردیابها^۴ نشان می‌دهد که این نوع فیلترهای هوادهی شده را می‌توان از دسته راکتورهای اختلاط کامل در نظر گرفت [۱]. این نوع فیلترها را می‌توان به صورت بی‌هوازی نیز به کار گرفت، اما طبق تحقیقات انجام شده توسط کندی^۵ و درآست^۶ راندمان این فیلترها به مراتب کمتر از فیلترهای هوازی است [۲]. در هر حال با توسعه استفاده از فیلترهای مستغرق هوازی، جهت‌گیری به سمتی بوده که تا حد ممکن از محیط‌های با سطح مخصوص زیادتر استفاده شود تا حجم ذخیره میکروبی در فیلتر بالا رود.

فاکتورهای مؤثر در طراحی محیط فیلترهای با بستر ثابت، توسط سانگ^۷ مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در این تحقیق رابطه بین زمان ماند هیدرولیکی و راندمان فیلتر در شرایطی خاص مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیق کارم^۸ نشان داده که در این گونه فیلترها در محدوده نسبت کربن به ازت ۱ تا ۴ راندمان حذف COD تغییر زیادی نکرده است و با افزایش نسبت کربن به ازت از ۱ به ۴ راندمان حذف COD تنها ۸ درصد کاهش پیدا کرده است [۴]. در خصوص تأثیر سطح مخصوص فیلتر بر راندمان حذف COD محلول نیز مطالعاتی انجام شده که از آن جمله می‌توان به تحقیق مارتین^۹ اشاره کرد که در تحقیق خود نرخ فیلتراسیون باکتریایی را مورد بررسی قرار داده است [۵]. در یک بررسی نظری، بنشاک^{۱۰} و بنوین^{۱۱} با روش تحلیل عددی سعی در بهره‌برداری بهینه از بیوراکتورهای با بستر ثابت نمودند [۶]. آنها با استفاده از روش بهینه‌سازی پویا، بیشینه کردن راندمان تصفیه را تابع هدف قرار دادند. در این تحقیق نیز اثری از تأثیر سطح مخصوص محیط فیلتر بر راندمان و تولید زائدات در مدل دیده نمی‌شود. در یک تحقیق نظری زینگ^{۱۲} و همکاران تولید لجن اضافی را در بیوراکتورهای غشایی شبیه‌سازی نموده و آن را با سیستم‌های لجن فعال مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که میزان لجن اضافی در این روش به مراتب کمتر از لجن فعال است [۷]. ناگفته نماند که استفاده از محیط‌های متخلخل با سطح مخصوص بالا نیز محدودیت‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به انسداد فیلتر ناشی از رشد بیش از حد لایه بیولوژیکی اشاره نمود. در بعضی از تحقیقات آزمایشگاهی سعی شده که با افزایش نرخ هوادهی شده و همچنین اضافه نمودن مواد شیمیایی نظیر هیپوکلریت کلسیم ضخامت لایه بیولوژیکی را کنترل کنند و از انسداد و نتیجتاً کاهش راندمان فیلتر بکاهند [۸]. لازم به ذکر است که نمونه‌های تجاری فیلترهای هوادهی شده مستغرق با عناوین Biofor و Biostyr حدوداً مدت ۱۰ سال است که در آمریکا ساخته و به کار گرفته می‌شوند [۹]. با توجه به این که در سیستم‌های تصفیه هوازی نرخ تولید لجن بسیار بالاست و فیلترهای هوادهی شده مستغرق نیز از این قاعده مستثنی نیستند، تحقیق در مورد نرخ تولید لجن معلق که در واقع یک لجن مازاد است، در این گونه فیلترها ضروری به نظر می‌رسد. لذا در مطالعه حاضر با استفاده از یک مدل فیزیکی در مقیاس پایلوت، تأثیر سطح مخصوص محیط فیلترهای هوادهی شده مستغرق و زمان ماند هیدرولیکی

7 Song

8 Chamot

9 Martin

10 Benthack

11 Bonvin

12 Xing

1 Rusten

2 Submerged Aerated Filters

3 Substrate

4 Tracer Studies

5 Kennedy

6 Droste

برکار آبی و میزان تولید لجن معلق در این نوع فیلترها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روشها

۱-۲- طراحی و ساخت فیلتر بیولوژیکی

مدل فیزیکی که در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه علم و صنعت مورد استفاده قرار گرفت شامل چهار لوله از جنس PVC با قطر داخلی ۱۴۷ میلی‌متر بود. حجم هر کدام از این لوله‌ها در حالت خالی ۱۱/۹ لیتر بوده و ارتفاع هر کدام با احتساب ارتفاع آزاد ۱ متر بود. جهت پر نمودن استوانه‌ها از قطعات لوله‌ای شکل با قطر به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۲ و ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. لازم به ذکر است که ارتفاع قطعات، معادل قطر آنها انتخاب گردید. استوانه‌ها تا ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر از این قطعات پر شدند و به این ترتیب محیط متخلخل هر فیلتر آماده شد. در شکل ۱ نمای شماتیک مدل و در جدول ۱ مشخصات فیزیکی آن دیده می‌شود. در این مدل نقاط نمونه‌برداری در ارتفاعات ۳۵ و ۷۰ سانتی‌متر از کف محیط متخلخل تعبیه شدند. هوادهای از کف به وسیلهٔ پخش کننده^۱ های گنبدی که وارونه قرار گرفته بودند انجام می‌شد. میزان هوای

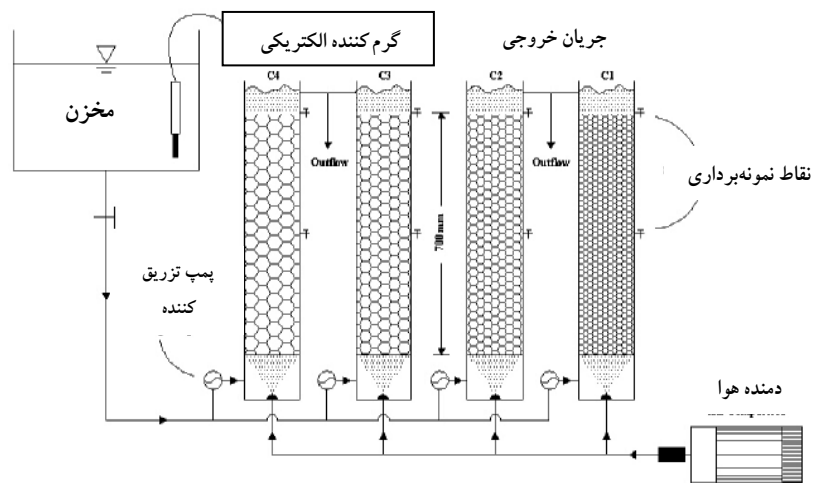
^۱ Diffuser

تزریقی به هر فیلتر به گونه‌ای بود که اکسیژن، عامل محدود کننده رشد بیولوژیکی نباشد و شرایط اختلاط کامل را نیز به وجود آورد.

جهت تغذیه بیوراکتورها از فاضلابی مصنوعی، با COD برابر ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر که از پودر شیر خشک کم چربی و آب شهری ساخته شده بود استفاده گردید. نوسانات pH نیز با هیدروکسید سدیم ۰/۵ نرمال کنترل گردید. فاضلاب مصنوعی توسط پمپ‌های تزریقی از کف وارد راکتورها شده و دمای آن در مخزن توسط یک گرم کن الکتریکی در 30 ± 0.2 درجه سانتی‌گراد کنترل می‌گردید. در کلیه مراحل، راکتورها با جریان رو به بالا به کار گرفته شدند.

۲-۲- راه اندازی سیستم

جهت راه‌اندازی سیستم، ستونها از فاضلاب مصنوعی (متشکل از پودر شیر خشک کم چربی و آب شهری) با COD معادل ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پر شده و سپس با استفاده از باکتری‌های هوایی جمع‌آوری شده از سیستم لجن فعال تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تلقیح انجام شد. پس از این مرحله، کمپرسور هوا روشن شده و راکتورها به صورت بسته شروع به کار نمودند. مرحله آماده‌سازی حدود ۲۵ روز به طول انجامید که طی این مدت ۴ مرتبه فاضلاب درون راکتورها تعویض گردید و در پایان دوره، ضخامت لایه



شکل ۱- نمای شماتیک از فیلترهای هوادهای شده مستغرق در مقیاس پایلوت

جدول ۱- مشخصات فیزیکی فیلترهای هوادهای شده مستغرق

شماره ستون	سطح مخصوص ($m^2 \cdot m^{-3}$)	تخلخل (درصد)	حجم فضای خالی فیلتر (لیتر)	حجم بخش جامد فیلتر (لیتر)
۱	۶۴۷	۷۰/۹	۸/۴۴۵	۳/۴۵۵
۲	۲۹۷	۸۲/۸	۹/۸۵۳	۲/۰۴۷
۳	۱۷۵	۸۸/۱	۱۰/۴۸۲	۱/۴۱۸
۴	۱۳۶	۹۰/۵	۱۰/۷۷۵	۱/۱۲۵

جدول ۲- دبی ورودی به فیلترهای هوادهی شده (لیتر بر ساعت)

شماره ستون				زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱	
۱/۳۴۷	۱/۳۱۰	۱/۲۳۲	۱/۰۵۶	۸
۲/۶۹۴	۲/۶۲۰	۲/۴۶۴	۱/۱۱۲	۴
۵/۳۸۸	۵/۲۴۰	۴/۹۲۸	۴/۲۲۴	۲
۱۰/۷۷۶	۱۰/۴۸۰	۹/۸۵۶	۸/۴۴۸	۱
۲۱/۵۵۲	۲۰/۹۶۰	۱۹/۷۱۲	۱۶/۸۹۶	۰/۵

مستغرق می‌باشد و نرخ حذف ماده آلی، از روابط هایپربولیکی نظیر رابطه ۱ به دست می‌آید

$$r_{\text{COD}} = r_{\text{max}} \frac{B_{\text{COD}}}{k + B_{\text{COD}}} \quad (1)$$

که در آن:

r_{COD} : نرخ حذف ماده آلی، r_{max} : حداکثر نرخ حذف ماده آلی، B_{COD} : بار آلی وارده بر واحد حجم فیلتر و k : ثابت نصف سرعت بوده و همگی بر حسب کیلوگرم COD محلول^۳ بر مترمکعب در روز ($\text{kg SCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) می‌باشند. در جدولهای ۳ و ۴ میزان بارگذاری سطحی و حجمی در طی تحقیق دیده می‌شود.

۲-۳- روش انجام آزمایشها

پارامترهای مورد اندازه‌گیری در این تحقیق شامل SCOD، جامدات معلق فرار، pH، DO و درجه حرارت بوده که از دو پارامتر اول به ترتیب می‌توان کارآیی فیلتر در حذف مواد آلی و تولید لجن اضافی را در هر اجرا و زمان ماند هیدرولیکی مشخص استخراج نمود. اندازه‌گیری pH و DO به صورت تصادفی انجام شده و این دو پارامتر تنها به منظور اطمینان از عملکرد صحیح سیستم و پایداری راکتورها در لیست آزمایشها قرار گرفتند. همچنین نرخ

بیولوژیکی در هر راکتور به حدود ۲۰۰ میکرومتر رسید. جهت بررسی اثر زمان ماند هیدرولیکی بر راندمان فیلترها، فاضلاب با COD برابر ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با دبی‌های متفاوت به راکتورها تزریق گردید که زمانهای ماند هیدرولیکی متفاوت را به دنبال داشت. در کلیه حالات به هر ستون حدود ۹ لیتر بر دقیقه هوا دمیده می‌شد. در جدول ۲ نحوه به کارگیری راکتورها در پنج حالت با استفاده از تغییر دبی جهت تنظیم زمان ماند هیدرولیکی مورد نیاز نشان داده شده است. پس از طی دوران سازگاری میکروبی، راکتورها با زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت شروع به کار کردند و از آنجا که نسبت فضای خالی محیط راکتورها با یکدیگر تفاوت داشت از ۴ پمپ تزریقی به طور جداگانه استفاده شد. نمونه‌برداری از نقاط تعبیه شده به طور مرتب انجام گرفته و زمانی که هر ستون از نظر COD محلول و VSS^۱ (جامدات معلق فرار) خروجی به حالت پایدار^۲ رسید، حجم بیوفیلم اندازه‌گیری شد و به کمک سطح مخصوص، ضخامت لایه بیولوژیکی در هر ستون تخمین زده شد. روش اندازه‌گیری ضخامت بیوفیلم در بخش روش انجام آزمایشها شرح داده شده است.

لازم به ذکر است که تقریباً در کلیه مراجع و از جمله مرجع ۱، نرخ بارگذاری حجمی بر محیط فیلتر، ملاک طراحی فیلترهای

³ Soluble COD (SCOD)

¹ Volatile Suspended Solids

^۲ هنگامی که اختلاف مقدار پارامتر مورد اندازه‌گیری در دو نوبت متوالی به مقدار قابل توجهی از دفعات قبل کمتر باشد و یا مقدار پارامتری نظیر COD بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده در نوبت قبل باشد، می‌توان شروع حالت ماندگار را از آن زمان در نظر گرفت و سپس با اندازه‌گیریهای متوالی، میانگین و انحراف معیار پارامتر را استخراج نمود. شروع حالت پایدار برای پارامترهای مختلف تقریباً همزمان اتفاق خواهد افتاد.

جدول ۳- بارگذاری سطحی فیلترهای هوادهی شده ($\text{g SCOD} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

شماره ستون				زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱	
۲۹/۹۷۰	۲۲/۶۴	۱۲/۶۳۲	۴/۹۳۸	۸
۵۹/۹۴۱	۴۵/۲۹۸	۲۵/۲۵۴	۹/۸۷۱	۴
۱۱۹/۸۸۱	۹۰/۵۷۹	۵۰/۵۱۹	۱۹/۷۴۶	۲
۲۳۹/۷۴۰	۱۸۱/۱۵۸	۱۰۱/۰۲۸	۳۹/۴۸۸	۱
۴۷۹/۴۸۱	۳۶۲/۳۱۶	۲۰۲/۰۵۵	۷۸/۹۷۶	۰/۵

جدول ۴- بارگذاری حجمی فیلترهای هوادهی شده ($\text{kg SCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

شماره ستون				زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱	
۴/۰۷۵	۳/۹۶۳	۳/۷۲۷	۳/۱۹۵	۸
۸/۱۵۰	۷/۹۲۹	۷/۴۵۱	۶/۳۸۶	۴
۱۶/۳۰۰	۱۵/۸۵۵	۱۴/۹۰۵	۱۲/۷۷۵	۲
۳۲/۵۹۷	۳۱/۷۱۰	۲۹/۸۰۷	۲۵/۵۴۸	۱
۶۵/۱۹۳	۶۳/۴۲۱	۵۹/۶۱۵	۵۱/۰۹۶	۰/۵

$$V \frac{dX}{dt} = Q_i X_i + VR_g - Q_e X_e \quad (2)$$

$$V \frac{dC}{dt} = Q_i C_i - VR_s - Q_e C_e \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، C : غلظت ماده غذایی در بیوراکتور بر حسب $\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3}$ ، C_i : غلظت ماده غذایی در فاضلاب ورودی بر حسب $\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3}$ ، C_e : غلظت ماده غذایی در پساب خروجی بر حسب $\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3}$ ، Q_i و Q_e : به ترتیب دبی ورودی و خروجی از راکتور بر حسب $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ، V : حجم راکتور بر حسب m^3 ، X_i و X_e : به ترتیب غلظت لجن در ورودی و خروجی از راکتور بر حسب $\text{kg VSS} \cdot \text{m}^{-3}$ ، R_g : نرخ خالص رشد باکتریایی بر حسب $\text{kg VSS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ، R_s : نرخ مصرف مواد غذایی بر حسب $\text{kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ و t : زمان بر حسب روز می باشد.

اگر فرض کنیم که بیوراکتور در حالت پایدار و در شرایط اختلاط کامل به سر می برد و فاضلاب ورودی فاقد لجن یا توده بیولوژیکی است، می توان روابط ۴ و ۵ را نوشت:

$$\left. \begin{array}{l} X_i = 0 \\ \frac{dC}{dt} = 0 \\ \frac{dX}{dt} = 0 \\ Q_i = Q_e = Q \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} X_e = \frac{V}{Q} R_g \quad (4) \\ C_e = C_i - \frac{V}{Q} R_s \quad (5) \end{array} \right.$$

باید در نظر داشت که در فیلترهای مستغرق، متغیر X_e تنها توده بیولوژیکی معلق نبوده و شامل توده بیولوژیکی چسبیده (بیوفیلم) نیز می باشد. در فیلترهای هوادهی شده مستغرق، حجم فعال در راکتور معادل حجم فضای خالی فیلتر (V_v) می باشد؛ در نتیجه زمان ماند هیدرولیکی^۱ بر اساس این حجم محاسبه می گردد و لذا خواهیم داشت

$$\text{HRT} = \frac{V_v}{Q} \quad (6)$$

^۱ Hydraulic Retention Time (HRT)

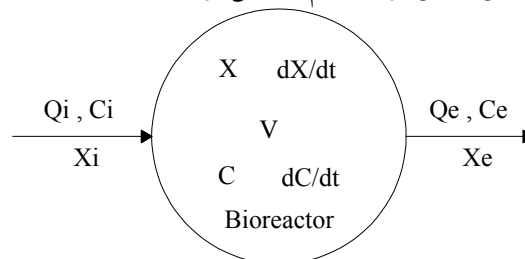
هوادهی شده به راکتورها آنچنان زیاد انتخاب گردید تا شرایط اختلاط کامل در آنها به وجود آید. به منظور کسب اطمینان از رسیدن به شرایط مذکور، دو نقطه نمونه برداری در بدنه هر راکتور تعبیه گردید. درجه حرارت فاضلاب مصنوعی نیز در مخزن و در 20 ± 0.2 درجه سانتی گراد با استفاده از یک گرمکن الکتریکی مجهز به الکترو حساس کنترل می گردید. لازم به ذکر است که در کل طول دوره زمانی آزمایشها، فاضلاب مصنوعی نیاز به سرد کردن پیدا نکرد. کلیه آزمایشها بر اساس روشهای استاندارد مندرج در مرجع ۱۰ انجام شدند.

۲-۴- روش اندازه گیری ضخامت لایه بیولوژیکی

جهت اندازه گیری ضخامت لایه بیولوژیکی تشکیل شده روی محیط متخلخل ستونها، از اختلاف حجم اولیه و ثانویه فضای خالی و سپس تقسیم عدد حاصله بر سطح مخصوص هر فیلتر استفاده گردید. لازم به توضیح است که در پایان هر اجرا در حالت پایدار، هر یک از راکتورها به طور جداگانه به وسیله آب تمیز تا زمانی که پساب خروجی کاملاً زلال شود شسته می شد و سپس فضای خالی جدید اندازه گیری شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می گرفت. لازم به ذکر است که سرعت آب شست و شو به اندازه ای کم بود که سبب شسته شدن لایه مذکور نمی شد.

۳- مدل نظری

قبل از بیان نتایج آزمایشها در یک بحث نظری اقدام به بسط مدلی می شود که در آن میزان لجن تولیدی در راکتورها با بیان ریاضی و استفاده از معادلات موازنه جرم محاسبه گردد. در شکل ۲ پارامترهای کلیدی موازنه جرم دیده می شود.



شکل ۲- دیگرام موازنه جرم

در هر دو روش (لجن فعال و فیلتر غشایی)، تولید لجن مازاد^۵ از رابطه ۱۲ قابل محاسبه است [۷]

$$ESP = \frac{V.X}{SRT} \quad (12)$$

با جای گذاری X از روابط ۱۰ و ۱۱ در رابطه ۱۲، ESP برای سیستم لجن فعال و فیلتر غشایی به ترتیب از روابط ۱۳ و ۱۴ بر حسب $g \text{ VSS} \cdot d^{-1}$ به دست خواهد آمد

$$ESP_{ASP} = \frac{Y.Q_i}{1+k_d.SRT} (C_i - C_e) \quad (13)$$

$$ESP_{MBR} = \frac{Y.Q_i}{1+k_d.SRT} \left[\frac{SRT(C_i - C_e) + HRT(C_i - C_{sup})}{HRT + SRT} \right] \quad (14)$$

همان گونه که قبلاً نیز ذکر شد جهت کاهش و به حداقل رساندن میزان لجن معلق در فیلترهای مستغرق، حجم ذخیره میکروبی در راکتور را باید بالا برد و زمان ماند سلولی را نیز تا حد ممکن افزایش داد. لذا می توان مسئله را با سوق دادن SRT به سمت مقادیر بسیار زیاد ادامه داد و رابطه ۱۰ را به صورت رابطه ۱۵ نوشت

$$X = \lim_{SRT \rightarrow \infty} \frac{SRT.Y(C_i - C_e)}{(1+k_d.SRT).HRT} \quad (15)$$

چنانچه حد در رابطه ۱۵ محاسبه گردد به رابطه ۱۶ خواهیم رسید

$$X = \frac{(C_i - C_e).Y}{k_d.HRT} \quad (16)$$

نکته قابل ذکر این است که در رابطه ۱۶، برای X عددی به دست خواهد آمد؛ اما این بدان معنی نیست که از بیوفیلتر توده بیولوژیکی خارج خواهد شد، بلکه X در این معادله بیانگر غلظت توده بیولوژیکی چسبیده و در حکم حاصل تقسیم جرم این توده بر حجم کل راکتور است.

⁵ Excess Sludge Production (ESP)

اگر فرض کنیم Y_0 بیان کننده ضریب برداشت مشاهده ای و شامل تنفس درون سلولی باشد [۹]، رابطه بین R_g و R_s را می توان به صورت رابطه ۷ نوشت

$$R_g = -Y_0 R_s \quad (7)$$

$$Y_0 = \frac{Y}{1+k_d.SRT} \quad (8)$$

که در رابطه ۸، SRT: زمان ماند سلولی^۱ بر حسب (d)، k_d : ضریب تخریب درون سلولی بر حسب (d^{-1}) ، Y: ضریب برداشت حداکثر و بر حسب $kg \text{ COD}^{-1} \cdot kg \text{ VSS}$ و دارای علامت منفی می باشد.

نرخ جذب اکسیژن^۲ نیز به طور استوکیومتریکی با نرخ مصرف ماده آلی و نرخ رشد توده بیولوژیکی مرتبط است [۹]. این ارتباط در رابطه ۹ دیده می شود

$$OUR = -R_s - 1.42.R_g = -R_s - 1.42.Y*(-R_s) \quad (9)$$

در این رابطه، OUR: بر حسب $kg \text{ O}_2 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ و عدد $1/42$ ، COD نسج سلولی بر حسب $kg \text{ COD} \cdot kg \text{ VSS}^{-1}$ می باشد.

در جدول ۵ شرایط بهره برداری و پارامترهای متعارف سینتیک میکروبی ذکر شده است [۹]. غلظت لجن در سایر سیستم ها نیز از طریق موازنه جرم قابل محاسبه می باشد. این غلظت در استخرهای هوادهی شده لجن فعال^۳ با رابطه ۱۰ و در فیلترهای غشایی^۴ با رابطه ۱۱ به دست می آید [۹]

$$X = \frac{SRT.Y(C_i - C_e)}{(1+k_d.SRT).HRT} \quad (10)$$

$$X = \frac{Y.SRT}{1+k_d.SRT} \left[\frac{C_i - C_e}{HRT} + \frac{C_i - C_{sup}}{SRT} \right] \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، C_{sup} بیانگر غلظت ماده غذایی در لجن شناور است.

¹ Solids Retention Time

² Oxygen Uptake Rate (OUR)

³ Activated Sludge Process (ASP)

⁴ Membrane Bioreactor (MBR)

جدول ۵- پارامترهای متعارف سینتیک رشد میکروبی [۹]

متعارف	محدوده	واحد	پارامتر
۰/۰۶	۰/۰۲۵-۰/۰۷۵	d^{-1}	$K_d(20^\circ C)$
۰/۴	۰/۲۵-۰/۶	$kg \text{ VSS} \cdot kg \text{ COD}^{-1}$	Y (20°C)
۵	۱/۰-∞	h	HRT
۳۰	۰/۱-∞	d	SRT

۴- نتایج و بحث در مدل تجربی

در آزمایش‌های انجام شده مهم‌ترین پارامترهایی که تحت پایش قرار گرفتند، COD محلول و VSS بودند. جهت خلاصه سازی و بیان روشن‌تر، نتایج SCOD و VSS خروجی از فیلترهای بیولوژیکی به کار گرفته شده در این تحقیق، در برابر زمان ماند هیدرولیکی در جدولهای ۶ و ۷ آمده است. لازم به ذکر است که

COD فاضلاب ورودی در کلیه حالات، ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است. در جدول ۸، pH فاضلاب خروجی از راکتورها در حالت پایدار در زمانهای ماند هیدرولیکی مختلف آمده است. در جدولهای ۶، ۷ و ۸ مقادیر میانگین و انحراف معیار (با علامت \pm) پارامترهای مورد اندازه گیری مشخص شده و تعداد انجام آزمایش معتبر نیز در پرانتز آمده است.

جدول ۶- SCOD خروجی از راکتورها در حالت پایدار (g.m^{-3})

شماره ستون	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)				
	۴	۳	۲	۱	
	$(15).210 \pm 13/29$	$(15).120 \pm 6/50$	$(15).75 \pm 3/20$	$(15).86 \pm 3/92$	۸
	$(15).230 \pm 14/55$	$(15).150 \pm 8/48$	$(15).90 \pm 4/36$	$(15).110 \pm 5/64$	۴
	$(21).345 \pm 18/31$	$(21).258 \pm 16/62$	$(21).135 \pm 7/31$	$(21).153 \pm 8/61$	۲
	$(22).395 \pm 23/66$	$(22).327 \pm 20/76$	$(22).186 \pm 11/87$	$(22).167 \pm 10/47$	۱
	$(16).671 \pm 49/72$	$(16).461 \pm 32/06$	$(16).384 \pm 21/77$	$(16).410 \pm 28/04$	۰/۵

جدول ۷- VSS خروجی از فیلترهای هوادهی شده در حالت پایدار (g.m^{-3})

شماره ستون	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)				
	۴	۳	۲	۱	
	$(15).8 \pm 2/34$	$(15).3 \pm 1/15$	$(15).8 \pm 1/24$	$(15).6 \pm 0/9$	۸
	$(15).17 \pm 5/11$	$(15).12 \pm 2/21$	$(15).16 \pm 2/64$	$(15).10 \pm 1/6$	۴
	$(21).19 \pm 3/71$	$(21).17 \pm 2/93$	$(21).39 \pm 6/83$	$(21).25 \pm 4/25$	۲
	$(22).28 \pm 4/76$	$(22).54 \pm 12/30$	$(22).55 \pm 9/79$	$(22).78 \pm 14/04$	۱
	$(16).57 \pm 12/32$	$(16).126 \pm 29/12$	$(16).126 \pm 23/31$	$(16).187 \pm 35/53$	۰/۵

جدول ۸- pH فاضلاب خروجی از فیلترهای هوادهی شده در حالت پایدار

شماره ستون	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)				
	۴	۳	۲	۱	
	$(15).7/76 \pm 0/388$	$(15).7/52 \pm 0/376$	$(15).7/62 \pm 0/381$	$(15).7/43 \pm 0/372$	۸
	$(15).7/80 \pm 0/395$	$(15).7/44 \pm 0/372$	$(15).7/51 \pm 0/376$	$(15).7/40 \pm 0/370$	۴
	$(21).6/27 \pm 0/539$	$(21).7/20 \pm 0/360$	$(21).7/29 \pm 0/365$	$(21).7/12 \pm 0/356$	۲
	$(22).7/34 \pm 0/367$	$(22).6/83 \pm 0/410$	$(22).6/79 \pm 0/505$	$(22).6/91 \pm 0/415$	۱
	$(16).7/21 \pm 0/361$	$(16).6/80 \pm 0/411$	$(16).6/81 \pm 0/409$	$(16).6/79 \pm 0/407$	۰/۵

جدول ۹- متوسط نرخ جذب اکسیژن در فیلترهای هوادهی شده ($\text{kg O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

شماره ستون				زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱	
۰/۵۱۹	۰/۵۴۰	۰/۵۲۴	۰/۴۴۶	۸
۱/۰۲۲	۱/۰۵۶	۱/۰۳۷	۰/۸۷۶	۴
۱/۸۵۸	۱/۹۴۳	۲/۰۰۷	۱/۶۹۸	۲
۳/۵۵۶	۳/۶۷۰	۳/۸۶۴	۳/۳۶۱	۱
۵/۳۳۶	۶/۵۰۵	۶/۵۶۴	۵/۴۹۸	۰/۵

جدول ۱۰- راندمان راکتورها در حذف SCOD در ۳۰ درجه سانتی‌گراد

شماره ستون				زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱	
۸۶	۹۲	۹۵	۹۴/۳	۸
۸۴/۷	۹۰	۹۴	۹۲/۷	۴
۷۷	۸۲/۸	۹۱	۸۹/۸	۲
۷۳/۷	۷۸/۲	۸۷/۶	۸۸/۹	۱
۵۵/۳	۶۹/۳	۷۴/۴	۷۲/۷	۰/۵

مقادیر به همراه میزان بارگذاری آلی در جدول ۱۱ آمده است. از تشابه رابطه ۱۶ با فرم خطی می‌توان ضرایب k و r_{\max} را استخراج نمود. جدول ۱۲ این ضرایب را نشان می‌دهد. با جای گذاری مقادیر جدول ۱۲ در رابطه ۱، شکل‌های ۴ تا ۷ به دست خواهند آمد. از آن گذشته هر فیلتر در بارگذاری حجمی، قدرت نهایی محدودی در حذف مواد آلی محلول دارد که این قدرت، مستقل از زمان ماند هیدرولیکی است. مقادیر این قدرت نهایی تحت عنوان r_{\max} در جدول ۱۲ نشان داده شده است. در یک تحلیل چند متغیره می‌توان رابطه بین سطح مخصوص، تخلخل، درجه حرارت و pH را با کارایی هر فیلتر مورد بررسی قرار داد، اما در مطالعه حاضر با ثابت نگه داشتن درجه حرارت و pH به منظور سادگی کار، این پارامترها از مدل حذف می‌شوند.

در شکل‌های ۴ تا ۷ منحنی بارگذاری فیلترهای هوادهی شده دیده می‌شود. با افزایش میزان بارگذاری آلی حجمی، نرخ حذف حجمی نیز افزایش می‌یابد، اما همان‌گونه که در شکل‌های ۴ تا ۷ نیز دیده می‌شود این ارتباط خطی نیست و یادآور روابط هایپربولیکی نظیر رابطه مونود^۱ می‌باشد.

در شکل ۸، منحنی بارگذاری فیلترهای هوادهی شده در یک دستگاه مختصات رسم شده و بدین ترتیب می‌توان به راحتی آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. این نمودار نشان می‌دهد که در کلیه حالات

در جدول ۹، نرخ جذب اکسیژن (OUR) در فیلترها به طور تقریبی و بر اساس Y متوسط معادل ۰/۵ بر حسب $\text{kg O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ محاسبه شده است. از اینرو مقادیر ذکر شده در جدول ۹، تنها معیاری جهت مقایسه به دست می‌دهند.

مقادیر داده شده در جدول ۹ با استفاده از رابطه ۹ به دست آمده‌اند. ضمناً غلظت اکسیژن محلول فاضلاب خروجی از فیلترها در هیچ حالتی از ۳/۵ میلی‌گرم بر لیتر کمتر نشد.

با بازگشت به رابطه ۱ می‌توانیم آن را به صورت رابطه خطی ۱۷ بازنویسی کنیم

$$\frac{1}{r_{\text{COD}}} = \frac{k}{r_{\max}} \frac{1}{\text{BCOD}} + \frac{1}{r_{\max}} \quad (17)$$

مقادیر r_{COD} و BCOD را می‌توان از معادلات ۱۸ و ۱۹ به دست آورد

$$\text{BCOD} = \frac{Q}{V} C_i \quad (18)$$

$$r_{\text{COD}} = \frac{Q}{V} (C_i - C_e) \quad (19)$$

جدول ۱۰ و شکل ۳ نشان می‌دهند که در تمامی راکتورها، با کاهش زمان ماند هیدرولیکی، راندمان فیلتر در حذف مواد آلی محلول کاهش می‌یابد. با استفاده از معادلات ۱۸، ۱۹ و جدول ۶ می‌توان مقادیر r_{COD} را برای حالات مختلف محاسبه نمود. این

¹ Monod

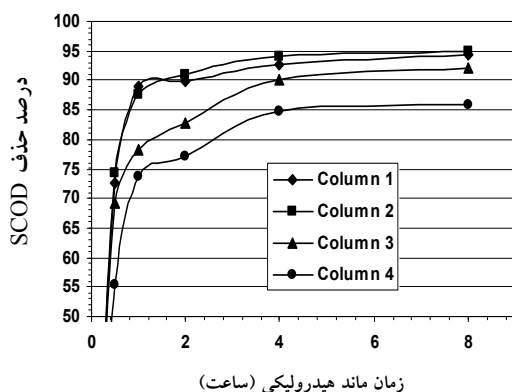
توسط نرم افزار Curve Expert بهترین مدل با بیشترین برازش مورد انتخاب قرار گرفته است. مدل نمایی^۱، در کلیه زمانهای ماند هیدرولیکی مندرج در جدولهای پیشین، برازش بیشتری از خود نشان داده است. مدل مربوطه ساختاری با فرم رابطه ۲۰ دارد

$$y = a.(1 - e^{-bX}) \quad (20)$$

¹ Exponential

و به خصوص در بارگذاریهای بیشتر از ۱۵ کیلوگرم COD محلول بر متر مکعب در روز، فیلتر هوادهی شده ۲ با سطح مخصوص ۲۹۵ مترمربع بر متر مکعب کارایی بیشتری از خود نشان می دهد.

لازم به ذکر است که تخلخل محیط یک فیلتر تنها فواصل زمانی بین دو شست و شوی معکوس آن را کنترل می کند. جهت برقراری ارتباط بین سطح مخصوص محیط فیلترها و کارایی آنها در حذف مواد آلی، در یک تحلیل تک متغیره با برازش مدل های غیر خطی



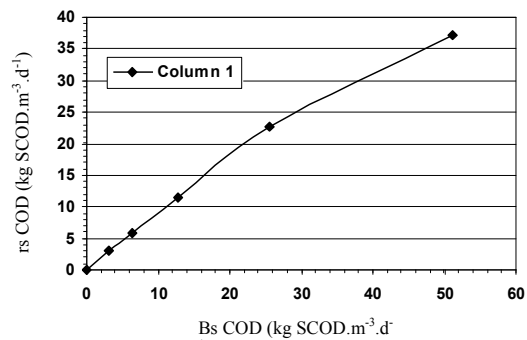
شکل ۳- تغییرات درصد حذف SCOD با زمان ماند هیدرولیکی

جدول ۱۱- مقادیر حذف حجمی (r_{COD}) و بارگذاری آلی بر واحد حجم فیلترهای هوادهی شده در زمانهای ماند هیدرولیکی مختلف در ۳۰ درجه سانتی گراد

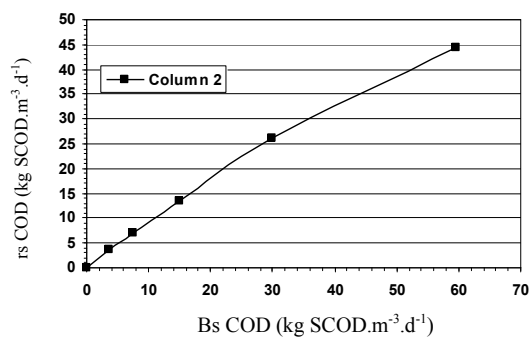
شماره ستون				حذف حجمی و بار حجمی فیلترها	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۴	۳	۲	۱		
۳/۴۵۱	۳/۵۴۰۷	۳/۵۴	۳/۰۱۳	r_{COD}	۸
۴/۰۷۵	۳/۶۴۶	۳/۷۲۷	۳/۱۹۵	B_{COD}	
۶/۹۰۳	۷/۱۳۶۱	۷/۰۰۴	۵/۹۱	r_{COD}	۴
۸/۱۵۰	۷/۹۲۹	۷/۴۵۱	۶/۳۸۶	B_{COD}	
۱۲/۵۵۱	۱۳/۱۲۷	۱۳/۵۶۴	۱۱/۴۷	r_{COD}	۲
۱۶/۳۰۰	۱۵/۸۵۵	۱۴/۹۰۵	۱۲/۷۷۵	B_{COD}	
۲۴/۰۲۴	۲۴/۷۹۷	۲۶/۱۱۱	۲۲/۷۱۲	r_{COD}	۱
۳۲/۵۹۷	۳۱/۷۱۰	۲۹/۸۰۷	۲۵/۵۴۸	B_{COD}	
۳۶/۰۵۲	۴۳/۹۵۱	۴۴/۳۵۴	۳۷/۱۴۷	r_{COD}	۰/۵
۶۵/۱۹۹	۶۳/۴۲۱	۵۹/۶۱۵	۵۱/۰۹۶	B_{COD}	

جدول ۱۲- ضرایب k و r_{max} راکتورها در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد

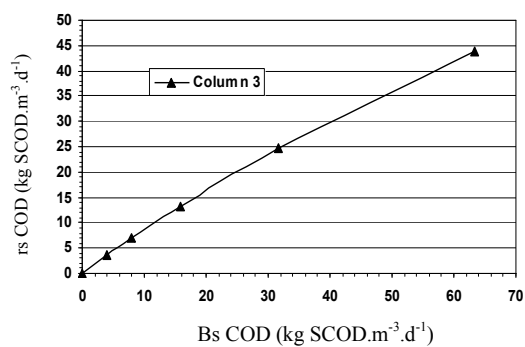
شماره ستون				ضریب
۴	۳	۲	۱	
۱۲۳/۴۰	۱۴۷/۱۰	۲۴۶/۶۲	۲۰۴/۷۸	$K, \text{kg SCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$
۱۰۹/۸۹	۱۳۸/۸۰	۲۳۸/۰۹	۱۹۶/۰۸	$r_{max}, \text{kg SCOD.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$



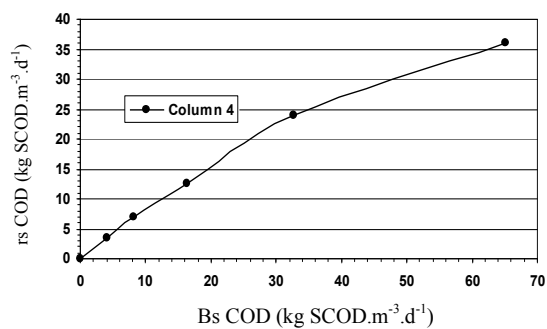
شکل ۴- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۱ در ۳۰ درجه سانتی گراد



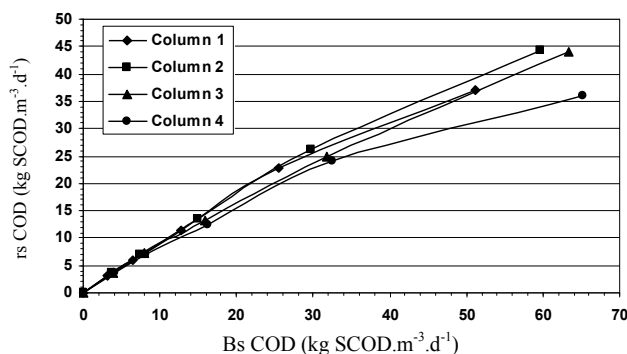
شکل ۵- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۲ در ۳۰ درجه سانتی گراد



شکل ۶- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۳ در ۳۰ درجه سانتی گراد



شکل ۷- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۴ در ۳۰ درجه سانتی گراد



شکل ۸- میزان حذف COD محلول در برابر بارگذاری آلی در فیلترهای هوادهی شده در ۳۰ درجه سانتیگراد

جدول ۱۳- ثوابت a و b در روابط نمایی سطح مخصوص فیلتر با راندمان

b	a	زمان ماند هیدرولیکی (ساعت)
۰/۰۱۷۹	۹۵/۰۶۷	۸
۰/۰۱۷۷	۹۳/۶۶۱	۴
۰/۰۱۳۹	۹۰/۹۶۸	۲
۰/۰۰۵۴	۹۷/۳۶۰	۱
۰/۰۱۱۵	۷۴/۹۹۹	۰/۵

x: زمان ماند هیدرولیکی و y: VSS خروجی از راکتور می باشد. در شکلهای ۱۰ تا ۱۳ برازش این مدل بر نتایج جدول ۷ دیده می شود. همان گونه که مشاهده می گردد مدل برازش خوبی بر نتایج مشاهده شده از خود نشان داده است. بنابراین در یک فیلتر هوادهی شده با سطح مخصوص مشخص می توان میزان VSS خروجی را نیز برآورد نمود. در روابط ۱۶ و ۲۱ چنانچه زمان ماند هیدرولیکی به سمت بی نهایت میل کند، میزان لجن خروجی صفر خواهد شد و در همین روابط در زمان ماند هیدرولیکی صفر غلظت لجن خروجی به طور نظری بی نهایت خواهد شد. در هر حال جهت پیش بینی دقیق تر با متغیر نمودن پارامترهایی نظیر درجه حرارت، این مقادیر تغییر خواهند نمود اما نسبت آنها ثابت خواهد ماند.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

با یک دید کلی می توان متوجه شد که فیلترهای هوادهی شده مستغرق در زمانهای ماند هیدرولیکی پایین (حدود ۱ ساعت) نیز کارایی بسیار خوبی در حذف مواد آلی محلول از خود نشان می دهند. شکل ۳ بیانگر این واقعیت است که افزایش سطح مخصوص محیط متخلخل فیلترهای بیولوژیکی مستغرق تا حدی به افزایش کارایی آن کمک می کند و پس از آن قدرت فیلتر در حذف مواد آلی ثابت مانده و یا حتی کاهش خواهد یافت. در همین راستا،

در رابطه ۲۰، x و y به ترتیب بیان کننده سطح مخصوص محیط فیلتر بر حسب $m^2.m^{-3}$ و راندمان حذف بر حسب درصد بوده، a و b ثوابت معادله می باشند. جدول ۱۳ شامل مقادیر a و b برای زمانهای ماند مختلف است. در شکل ۹ رابطه نمایی ۲۰ برای زمان ماند ۸ ساعت ترسیم شده است.

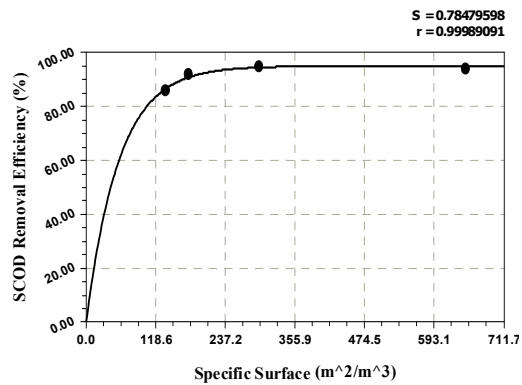
با استفاده از شکلهای ۴ تا ۸ می توان فیلترهای هوادهی شده مستغرق را مورد طراحی و سپس به کارگیری قرار داد. از شکلهای ۴ تا ۷ در بارگذاری آلی و از نمودارهایی نظیر شکل ۹ می توان در انتخاب سطح مخصوص محیط فیلتر استفاده نمود.

نتایج مندرج در جدول ۷، VSS خروجی از راکتورها را نشان می دهد. این لجن خروجی در واقع لجن مازادی است که باید مقدار آن را در فیلترهای هوادهی شده مستغرق به حداقل رساند. در هر حال با بررسی این نتایج، مدل هریس^۱ در یک برازش غیر خطی تک متغیره برازش خوبی به نتایج این جدول از خود نشان داد. ساختار این مدل به صورت رابطه ۲۱، می باشد

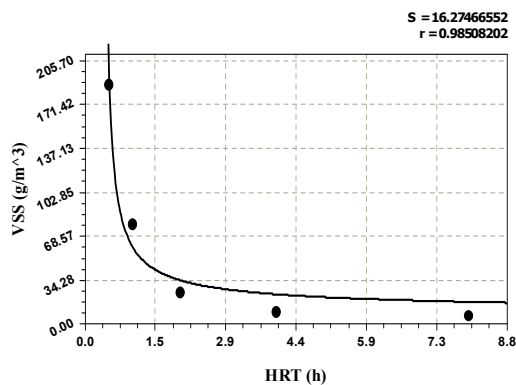
$$y = \frac{1}{a + bx^c} \quad (21)$$

که در این رابطه :

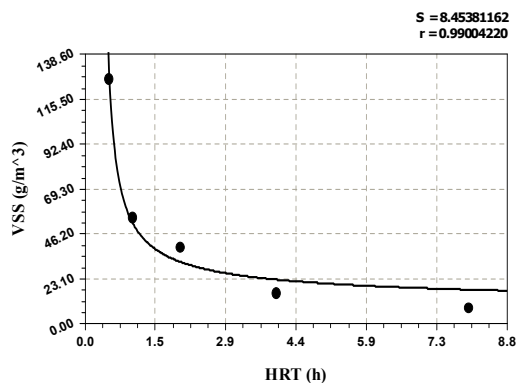
¹ Harris



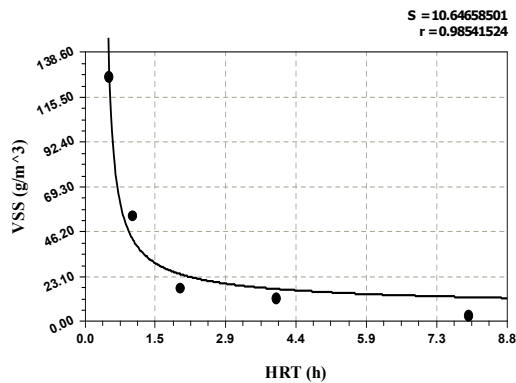
شکل ۹- راندمان حذف SCOD در زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت



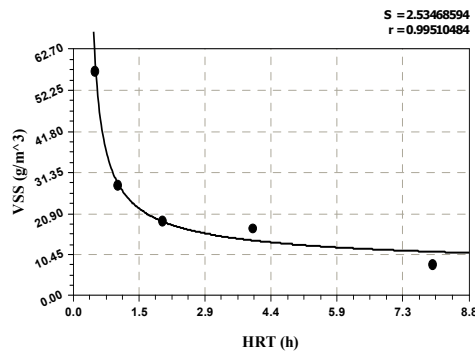
شکل ۱۰- VSS خروجی از فیلتر هوادهی شده ۱ در برابر زمان ماند هیدرولیکی



شکل ۱۱- VSS خروجی از فیلتر هوادهی شده ۲ در برابر زمان ماند هیدرولیکی



شکل ۱۲- VSS خروجی از فیلتر هوادهی شده ۳ در برابر زمان ماند هیدرولیکی



شکل ۱۳- VSS خروجی از فیلتر هوادهی شده ۴ در برابر زمان ماند هیدرولیکی

تحقیقات زینگ^۱ و انگ^۲ [۸] تجربه نشده و حتی در موارد شبیه این مقدار نیز سبب کاهش قابل توجه کارایی روش تصفیه پیشنهادی شده است. لذا با نتایج به دست آمده در بخش حذف مواد آلی، استفاده از فیلتر هوادهی شده مستغرق ۲ در تصفیه پسابهای صنعتی (که احتمالاً قوی نیز هستند) و فاضلابهای شهری که از واحد ته نشینی اولیه گذشته باشند، به واسطه حجم کم مورد نیاز و کارایی بالا مقدر خواهد بود.

از نظر تولید لجن مازاد نیز همان گونه که در جدول ۷ ذکر شد بیشترین میزان تولید لجن مازاد مربوط به راکتور ۱ و در زمان ماند هیدرولیکی ۰/۵ ساعت است و کمترین میزان تولید لجن مازاد مربوط به راکتور ۳ در زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت می باشد. راکتور ۲ در زمان ماند ۱ ساعت، ۵۵ میلی گرم در لیتر (۱/۰۹۲ کیلوگرم VSS در روز بازاء هر متر مکعب فیلتر) لجن مازاد تولید کرده که در بارگذاری آلی ۲۹/۸۰۷ کیلوگرم COD محلول بر مترمکعب در روز، عدد بسیار مناسبی می باشد.

مشاهده شد که راکتور شماره ۲ با سطح مخصوص حدود ۳۰۰ مترمربع بر متر مکعب در کلیه حالات (از نظر زمان ماند هیدرولیکی) از بقیه فیلترها پیشی گرفت و نتایج قابل قبولی از خود نشان داد و راکتور شماره ۱ برخلاف داشتن سطح مخصوص بالاتر در مقایسه با راکتور شماره ۲ کارایی کمتری داشت. لازم به ذکر است که راکتور ۲ در بارگذاریهای مشابه، عملکرد مناسب تری نسبت به راکتور ۱ از خود نشان داد و این امر می تواند به واسطه رشد لایه بیولوژیکی در فضای خالی کوچک راکتور ۱ و متعاقب آن کاهش سطح مقطع عبور جریان و در نتیجه افزایش سرعت جریان و کاهش نرخ انتشار ماده غذایی به درون لایه بیولوژیکی اتفاق بیفتد که این امر سبب پایین آمدن نسبی کارایی این راکتور نسبت به راکتور ۲ شده است. از طرفی نرخ بارگذاری بر این فیلترها در مقایسه با سایر روشهای تصفیه، بسیار بالا بوده و راکتور شماره ۲ در نرخ بارگذاری ۵۹/۶۱۵ کیلوگرم COD محلول بر متر مکعب در روز کارایی ۷۴/۴ درصد از خود نشان داد؛ در حالی که وارد نمودن چنین باری در سایر تحقیقات آزمایشگاهی از جمله

۶- مراجع

- 1-Rusten, B. (1984). "Wastewater treatment with aerated submerged biological filters." *J. WPCF*, 56 (5), 424-430.
- 2- Kennedy, K. J., and Droste, R. L. (1987). "Kinetics of down flow anaerobic attached growth reactors." *J. WPCF*, 59 (4), 212-221.
- 3- Song, Ki-Ho. (1986). "Media design factors for fixed-bed filters." *J. WPCF*, 58 (2), 115-121.
- 4- Charmot, C., and Marie, L. (1999). "Nitrification of high strength ammonium wastewater in an aerated submerged fixed-bed filters." *J. of Environmental Progress*, 18(2), 123-129.
- 5- Martin, M.J., and Logan, B.E. (1996). "Scaling bacterial filtration rates in different sized porous media." *J. Environmental Engineering*, 122 (5), 407-415.
- 6- Benthack, C., and Bonvin, D. (2001). "An optimal strategy for fixed-bed bioreactors used in wastewater treatment." *J. of Biotechnology and Bioengineering*, 72 (1), 34-40.
- 7- Xing, C. H., and Wu, W. Z. (2003). "Excess sludge production in membrane bioreactors: A theoretical investigation." *J. of Environmental Engineering*, 129 (4), 291-297.
- 8- Lin, H., Ong, S.L., and Wun, J. (2004). "Performance of a biofilm airlift suspension reactor for synthetic wastewater treatment." *J. of Environmental Engineering*, 130 (1), 26-36.
- 9- Tchobanoglous, G. (2003). *Wastewater engineering*, Metcalf and Eddy, Inc., 959-961.
- 10- Clescerl, L. S., and Greenberg, A.E. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.