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

محمدعلی بقاء پور [۱] ابراهیم جباری [۲]

(دریافت ۸٤/۱۰/۲۷ پذیرش ۸۵/۹/۱)

چکیده

به منظور تولید زائدات کمتر در فرآیند تصفیهٔ 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 تصفیهٔ فاضلاب کاربرد روزافزونی پیدا کرده است و طی سالهای اخیر فیلترهای مذکور به سبب ماهیت روش تصفیه‌شان کمک بسزایی در کاهش زائدات و متعاقب آن پایین آوردن هزینه‌ها نموده‌اند. در این فیلترها رشد تودهٔ بیولوژیکی نه تنها به صورت چسبیده بلکه به صورت معلّق 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 پایهٔ 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 کارآیی فیلتر شده و پس از آن قدرت فیلتر ثابت مانده و یا کاهش می‌یابد. نتایج نشان دادند که در کلیهٔ فیلترها نرخ تولید لجن مازاد با کاهش زمان ماند هیدرولیکی افزایش یافته و در محیطی با تخلخل بالاتر با وجود پایین بودن کارآیی در حذف آلاینده محلول، زائدات کمتری تولید نموده است.

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

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

Mohammad A. Baghapour[1] *Ibrahim Jabbari[2]*

(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.*

۱- دانشجوی دکترای عمران، مهندسی آب ومحیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،Jabbari@iust.ac.it

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.it

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

امروزه با گسترش روشهای مختلف تصفیهٔ 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 زیست‌محیطی 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 می‌چسبد 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[1] اقدام به معرفی و به کارگیری فیلترهای مستغرق هوازی[2] 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 لایهٔ 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 مادهٔ مغذی[3] در کل محیط فیلتر پخش شود و لایه بیولوژیکی نسبتاً یکنواختی روی محیط رشد کند. منحنیهای توزیع زمان ماند حاصل از مطالعات به وسیلهٔ ردیابها[4] نشان می‌دهد که این نوع فیلترهای هوادهی شده را می‌توان از دستهٔ 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[5] و درأست[6] راندمان این فیلترها به مراتب کمتر از فیلترهای هوازی است[۲]. در هر حال با توسعهٔ 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[7] مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در این تحقیق رابطهٔ بین زمان ماند هیدرولیکی و راندمان فیلتر در شرایطی خاص مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیق کارمُت[8] 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[9] اشاره کرد که در تحقیق خود نرخ فیلتراسیون باکتریایی را مورد بررسی قرار داده است[۵]. در یک بررسی نظری، بنشاک[10] و بُنوین[11] 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[12] 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 لایهٔ 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 لایهٔ 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

[1] Rusten
[2] Submerged Aerated Filters
[3] Substrate
[4] Tracer Studies
[5] Kennedy
[6] Droste
[7] Song
[8] Charmot
[9] Martin
[10] Benthack
[11] Bonvin
[12] Xing

Archive of SID
www.SID.ir

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

۲- مواد و روشها

۲-۱- طراحی و ساخت فیلتر بیولوژیکی

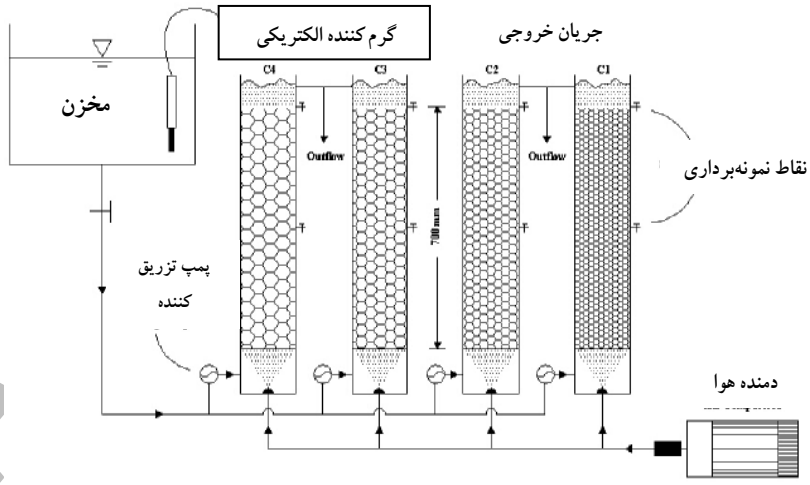
مدل فیزیکی که در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه علم و صنعت مورد استفاده قرار گرفت شامل چهار لوله از جنس PVC با قطر داخلی ۱۴۷ میلی‌متر بود. حجم هر کدام از این لوله‌ها در حالت خالی ۱۱/۹ لیتر بوده و ارتفاع هر کدام با احتساب ارتفاع آزاد ۱ متر بود. جهت پر نمودن استوانه‌ها از قطعات لوله‌ای شکل با قطر به ترتیب 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. هوادهی از کف به وسیلهٔ پخش کننده[1]های گنبدی که وارونه قرار گرفته بودند انجام می‌شد. میزان هوای تزریقی به هر فیلتر به گونه‌ای بود که اکسیژن، عامل محدود کنندهٔ رشد بیولوژیکی نباشد و شرایط اختلاط کامل را نیز به وجود آورد.

جهت تغذیهٔ 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 ۰/۲ ± ۳۰ 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 هوازی 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

[1] Diffuser



شکل ۱- نمایی شماتیک از فیلترهای هوادهی شده مستغرق در مقیاس پایلوت

جدول ۱- مشخصات فیزیکی فیلترهای هوادهی شده مستغرق

شماره ستون	سطح مخصوص ($m^2.m^{-3}$)	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

Archive of SID
www.SID.ir

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

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

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[1] (جامدات معلق فرار) خروجی به حالت پایدار[2] 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 کلیهٔ مراجع و از جمله مرجع ۱، نرخ بارگذاری حجمی بر محیط فیلتر، ملاک طراحی فیلترهای مستغرق می‌باشد و نرخ حذف مادهٔ آلی، از روابط هایپربولیکی نظیر رابطه ۱ به دست می‌آید

$$r_{COD} = r_{max} \frac{B_{COD}}{k + B_{COD}} \qquad (۱)$$

که در آن:

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

[1] Volatile Suspended Solids

[2] 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، می توان 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.

[3] Soluble COD (SCOD)

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

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

Archive of SID
www.SID.ir

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

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

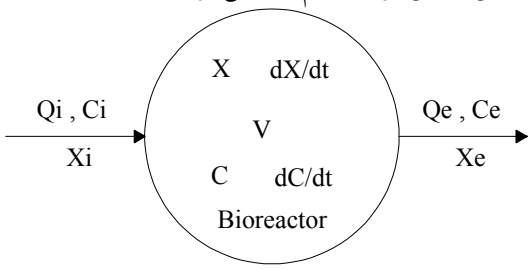
هوادهی شده به راکتورها آنچنان زیاد انتخاب گردید تا شرایط اختلاط کامل در آنها به وجود آید. به منظور کسب اطمینان از رسیدن به شرایط مذکور، دو نقطه نمونه‌برداری در بدنه هر راکتور تعبیه گردید. درجه حرارت فاضلاب مصنوعی نیز در مخزن و در ۰/۲ ± ۳۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از یک گرمکن الکتریکی مجهز به الکترود حساس کنترل می‌گردید. لازم به ذکر است که در کل طول دورهٔ زمانی آزمایشها، فاضلاب مصنوعی نیاز به سرد کردن پیدا نکرد. کلیهٔ آزمایشها بر اساس روشهای استاندارد مندرج در مرجع ۱۰ انجام شدند.

۲-۴- روش اندازه‌گیری ضخامت لایهٔ بیولوژیکی

جهت اندازه‌گیری ضخامت لایهٔ 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 می‌شد و سپس فضای خالی جدید اندازه‌گیری شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گرفت. لازم به ذکر است که سرعت آب شست و شو به اندازه‌ای کم بود که سبب شسته شدن لایهٔ مذکور نمی‌شد.

۳- مدل نظری

قبل از بیان نتایج آزمایشها در یک بحث نظری اقدام به بسط مدلی می‌شود 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 می‌شود.



شکل ۲- دیاگرام موازنه جرم

$$V\frac{dX}{dt} = Q_iX_i + VR_g - Q_eX_e \qquad (۲)$$

$$V\frac{dC}{dt} = Q_iC_i - VR_S - Q_eC_e \qquad (۳)$$

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

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

$$\left.\begin{array}{l} X_i = 0 \\ \dfrac{dC}{dt} = 0 \\ \dfrac{dX}{dt} = 0 \\ Q_i = Q_e = Q \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{ll} X_e = \dfrac{V}{Q}R_g & (۴) \\ C_e = C_i - \dfrac{V}{Q}R_s & (۵) \end{array}\right.$$

باید در نظر داشت که در فیلترهای مستغرق، متغیر X_e تنها تودهٔ بیولوژیکی معلق نبوده و شامل تودهٔ بیولوژیکی چسبیده(بیوفیلم) نیز می‌باشد. در فیلترهای هوادهی شده مستغرق، حجم فعال در راکتور معادل حجم فضای خالی فیلتر(V_V) می باشد؛ در نتیجه زمان ماند هیدرولیکی[1] بر اساس این حجم محاسبه می‌گردد و لذا خواهیم داشت

$$HRT = \frac{V_V}{Q} \qquad (۶)$$

[1] Hydraulic Retention Time (HRT)

Archive of SID

www.SID.ir

اگر فرض کنیم Y_o بیان کنندهٔ ضریب برداشت مشاهده‌ای و شامل تنفس درون سلولی باشد[۹]، رابطهٔ بین R_s و R_g را می‌توان به صورت رابطهٔ ۷ نوشت

$$R_g = -Y_O R_S \qquad (۷)$$

$$Y_O = \frac{Y}{1 + k_d.SRT} \qquad (۸)$$

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

نرخ جذب اکسیژن[2] نیز به طور استوکیومتریکی با نرخ مصرف مادهٔ آلی و نرخ رشد تودهٔ بیولوژیکی مرتبط است[۹]. این ارتباط در رابطهٔ ۹ دیده می‌شود

$$OUR = -R_S - 1.42*R_g = -R_S - 1.42Y*(-R_S) \qquad (۹)$$

در این رابطه، OUR: بر حسب $kg\ O_2.m^{-3}.d^{-1}$ و عدد ۱/۴۲، COD نسج سلولی بر حسب $kg\ COD.kg\ VSS^{-1}$ می‌باشد.

در جدول ۵ شرایط بهره برداری و پارامترهای متعارف سینتیک میکروبی ذکر شده است [۹]. غلظت لجن در سایر سیستم‌ها نیز از طریق موازنهٔ جرم قابل محاسبه می‌باشد. این غلظت در استخرهای هوادهی شده لجن فعال[3] با رابطه ۱۰ و در فیلترهای غشایی[4] با رابطه ۱۱ به دست می‌آید [۹]

$$X = \frac{SRT.Y(C_i - C_e)}{(1 + k_d.SRT)HRT} \qquad (۱۰)$$

$$X = \frac{Y.SRT}{1 + k_d.SRT}\left[\frac{C_i - C_e}{HRT} + \frac{C_i - C_{sup}}{SRT}\right] \qquad (۱۱)$$

در رابطه ۱۱، C_{SUP} بیانگر غلظت مادهٔ غذایی در لجن شناور است.

در هر دو روش (لجن فعال و فیلتر غشایی)، تولید لجن مازاد[5] از رابطه ۱۲ قابل محاسبه است[۷]

$$ESP = \frac{V.X}{SRT} \qquad (۱۲)$$

با جای‌گذاری X از روابط ۱۰ و ۱۱ در رابطهٔ ۱۲، ESP برای سیستم لجن فعال و فیلتر غشایی به ترتیب از روابط ۱۳ و ۱۴ برحسب $g\ VSS.d^{-1}$ به دست خواهد آمد

$$ESP_{ASP} = \frac{Y.Q_i}{1 + k_d.SRT}(C_i - C_e) \qquad (۱۳)$$

$$ESP_{MBR} = \frac{Y.Q_i}{1 + k_d.SRT}\left[\frac{SRT(C_i - C_e) + HRT(C_i - C_{sup})}{HRT + SRT}\right] \qquad (۱۴)$$

همان گونه که قبلاً نیز ذکر شد جهت کاهش و به حداقل رساندن میزان لجن معلق در فیلترهای مستغرق، حجم ذخیرهٔ 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 رابطهٔ ۱۰ را به صورت رابطهٔ ۱۵ نوشت

$$X = \lim_{SRT \to \infty} \frac{SRT.Y(C_i - C_e)}{(1 + k_d.SRT).HRT} \qquad (۱۵)$$

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

$$X = \frac{(C_i - C_e).Y}{k_d.HRT} \qquad (۱۶)$$

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

[1] Solids Retention Time
[2] Oxygen Uptake Rate (OUR)
[3] Activated Sludge Process (ASP)
[4] Membrane Bioreactor (MBR)
[5] Excess Sludge Production (ESP)

جدول ۵- پارامترهای متعارف سینتیک رشد میکروبی[۹]

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

Archive of SID
www.SID.ir

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 کلیهٔ 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 ±) 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($g.m^{-3}$)

زمان ماند هیدرولیکی	شماره ستون			
(ساعت)	۱	۲	۳	۴
۸	(۱۵).۸۶±۳/۹۲	(۱۵).۷۵± ۳/۲۰	(۱۵).۱۲۰± ۶/۵۰	(۱۵).۲۱۰± ۱۳/۲۹
۴	(۱۵).۱۱۰± ۵/۶۴	(۱۵) .۹۰± ۴/۳۶	(۱۵).۱۵۰± ۸/۴۸	(۱۵).۲۳۰± ۱۴/۵۵
۲	(۲۱).۱۵۳± ۸/۶۱	(۲۱).۱۳۵± ۷/۳۱	(۲۱).۲۵۸± ۱۶/۶۲	(۲۱).۳۴۵± ۱۸/۳۱
۱	(۲۲).۱۶۷± ۱۰/۴۷	(۲۲).۱۸۶± ۱۱/۸۷	(۲۲).۳۲۷± ۲۰/۷۶	(۲۲).۳۹۵± ۲۳/۶۶
۰/۵	(۱۶).۴۱۰± ۲۸/۰۴	(۱۶).۳۸۴± ۲۱/۷۷	(۱۶).۴۶۱± ۳۲/۰۶	(۱۶).۶۷۱± ۴۹/۷۲

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

زمان ماند هیدرولیکی	شماره ستون			
(ساعت)	۱	۲	۳	۴
۸	(۱۵). ۶ ±۰/۹	(۱۵). ۸±۱/۲۴	(۱۵). ۳±۱/۱۵	(۱۵). ۸±۲/۳۴
۴	(۱۵). ۱۰±۱/۶	(۱۵). ۱۶±۲/۶۴	(۱۵). ۱۲±۲/۲۱	(۱۵). ۱۷±۵/۱۱
۲	(۲۱). ۲۵±۴/۲۵	(۲۱). ۳۹±۶/۸۳	(۲۱). ۱۷±۲/۹۳	(۲۱). ۱۹±۳/۷۱
۱	(۲۲). ۷۸±۱۴/۰۴	(۲۲). ۵۵±۹/۷۹	(۲۲). ۵۴±۱۲/۳۰	(۲۲). ۲۸±۴/۷۶
۰/۵	(۱۶). ۱۸۷±۳۵/۵۳	(۱۶). ۱۲۶±۲۳/۳۱	(۱۶). ۱۲۶±۲۹/۱۲	(۱۶). ۵۷±۱۲/۳۲

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

زمان ماند هیدرولیکی	شماره ستون			
(ساعت)	۱	۲	۳	۴
۸	(۱۵). ۷/۴۳±۰/۳۷۲	(۱۵). ۷/۶۲±۰/۳۸۱	(۱۵). ۷/۵۲±۰/۳۷۶	(۱۵). ۷/۷۶±۰/۳۸۸
۴	(۱۵). ۷/۴۰±۰/۳۷۰	(۱۵). ۷/۵۱±۰/۳۷۶	(۱۵). ۷/۴۴±۰/۳۷۲	(۱۵). ۷/۸۰±۰/۳۹۵
۲	(۲۱). ۷/۱۲±۰/۳۵۶	(۲۱). ۷/۲۹±۰/۳۶۵	(۲۱). ۷/۲۰±۰/۳۶۰	(۲۱). ۶/۲۷±۰/۵۳۹
۱	(۲۲). ۶/۹۱±۰/۴۱۵	(۲۲). ۶/۷۹±۰/۵۰۵	(۲۲). ۶/۸۳±۰/۴۱۰	(۲۲). ۷/۳۴±۰/۳۶۷
۰/۵	(۱۶). ۶/۷۹±۰/۴۰۷	(۱۶). ۶/۸۱±۰/۴۰۹	(۱۶). ۶/۸۰±۰/۴۱۱	(۱۶). ۷/۲۱±۰/۳۶۱

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۹- متوسط نرخ جذب اکسیژن در فیلترهای هوادهی شده ($kg\ O_2.m^{-3}.d^{-1}$)

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

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

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

در جدول ۹، نرخ جذب اکسیژن (OUR) در فیلترها به طور تقریبی و بر اساس Y متوسط معادل ۰/۵ بر حسب $kg\ O_2.m^{-3}.d^{-1}$ 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 رابطهٔ ۹ به دست‌آمده‌اند. ضمناً غلظت اکسیژن محلول فاضلاب خروجی از فیلترها در هیچ حالتی از ۳/۵ میلی گرم بر لیتر کمتر نشد.

با بازگشت به رابطهٔ ۱ می توانیم آن را به صورت رابطهٔ خطی ۱۷ بازنویسی کنیم

$$\frac{1}{r_{COD}} = \frac{k}{r_{max}}\frac{1}{B_{COD}} + \frac{1}{r_{max}} \qquad (۱۷)$$

مقادیر B_{COD}, r_{COD} را می توان از معادلات ۱۸ و ۱۹ به دست آورد

$$B_{COD} = \frac{Q}{V}C_i \qquad (۱۸)$$

$$r_{COD} = \frac{Q}{V}(C_i - Ce) \qquad (۱۹)$$

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 مقادیر به همراه میزان بارگذاری آلی در جدول ۱۱ آمده است. از تشابه رابطهٔ 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 رابطهٔ 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 رابطهٔ بین سطح مخصوص، تخلخل، درجه حرارت و pH را با کارآیی هر فیلتر مورد بررسی قرار داد، اما در مطالعهٔ 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 می یابد، اما همانگونه که در شکلهای ۴ تا ۷ نیز دیده می‌شود این ارتباط خطی نیست و یادآور روابط هایپربولیکی نظیر رابطهٔ مونود[1] 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 کلیهٔ حالات

[1] Monod

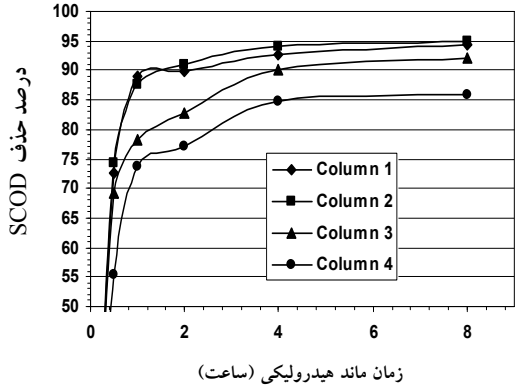
Archive of SID
www.SID.ir

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 کارآیی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که تخلخل محیط یک فیلتر تنها فواصل زمانی بین دو شست و شوی معکوس آن را کنترل می‌کند. جهت برقراری ارتباط بین سطح مخصوص محیط فیلترها و کارآیی آنها در حذف مواد آلی، در یک تحلیل تک متغیره با برازش مدلهای غیر خطی توسط نرم افزار Curve Expert بهترین مدل با بیشترین برازش مورد انتخاب قرار گرفته است. مدل نمایی[1]، درکلیهٔ زمانهای ماند هیدرولیکی مندرج در جدولهای پیشین، برازش بیشتری از خود نشان داده است.مدل مربوطه ساختاری با فرم رابطهٔ ۲۰ دارد

$$y = a.(1 - e^{-bX}) \qquad (۲۰)$$

[1] Exponential



شکل ۳- تغییرات درصد حذف SCOD با زمان ماند هیدرولیکی

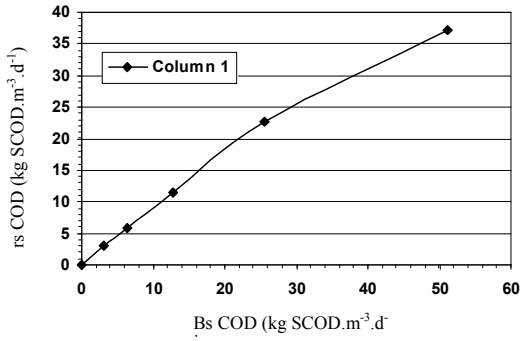
جدول ۱۱- مقادیر حذف حجمی (r_{COD}) و بارگذاری آلی بر واحد حجم (B_{COD}) فیلترهای هوادهی شده در زمانهای ماند هیدرولیکی مختلف در ۳۰ درجه سانتی گراد

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

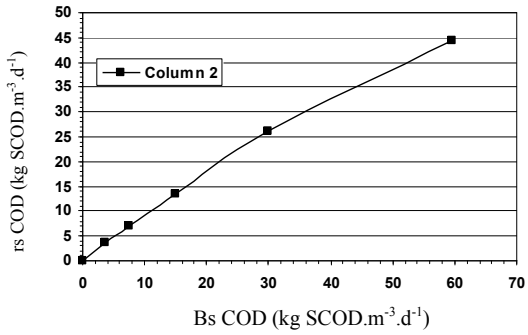
جدول ۱۲- ضرایب k و r_{max} راکتورها در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

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

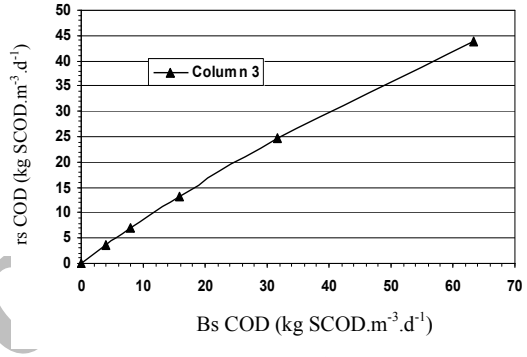
Archive of SID
www.SID.ir



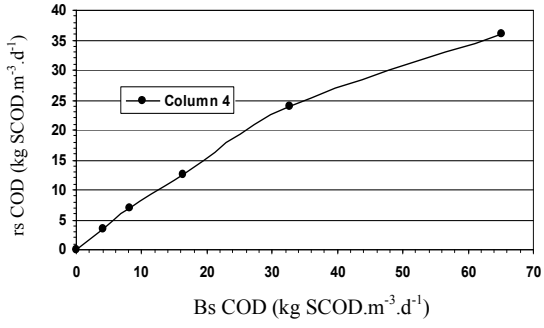
شکل ۴- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۱ در ۳۰ درجه سانتی گراد



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

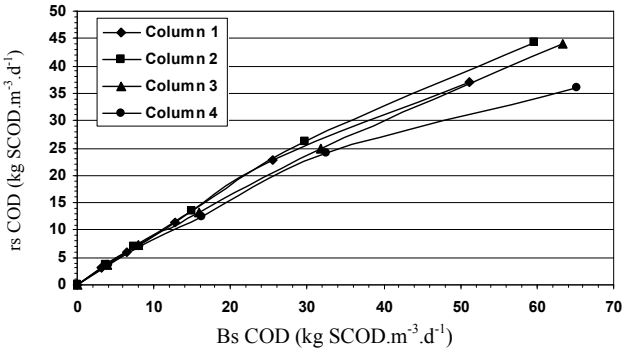


شکل ۶- منحنی بارگذاری آلی راکتور ۳ در ۳۰ درجه سانتی گراد



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

www.SID.ir



شکل ۸- میزان حذف CODمحلول 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

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

در رابطه ۲۰، x و y به ترتیب بیان کنندهٔ سطح مخصوص محیط فیلتر بر حسب $m^2.m^{-3}$ و راندمان حذف بر حسب درصد بوده، a و b ثوابت معادله می‌باشند. جدول ۱۳ شامل مقادیر a و b برای زمانهای ماند مختلف است. در شکل ۹ رابطهٔ 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 می‌توان در انتخاب سطح مخصوص محیط فیلتر استفاده نمود.

نتایج مندرج در جدول ۷ ، VSS خروجی از راکتورها را نشان می‌دهد. 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[1] در یک برازش غیر خطی تک متغیره برازش خوبی به نتایج این جدول از خود نشان داد. ساختار این مدل به صورت رابطه ۲۱، می‌باشد

$$y = \frac{1}{a + bx^C} \qquad (۲۱)$$

که در این رابطه :

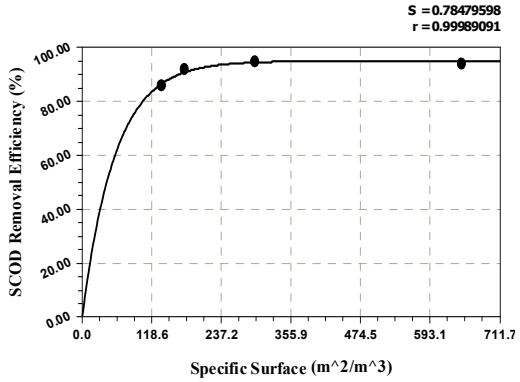
x : زمان ماند هیدرولیکی و y : VSS خروجی از راکتور می‌باشد. در شکلهای ۱۰ تا ۱۳ برازش این مدل بر نتایج جدول ۷ دیده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌گردد مدل برازش خوبی بر نتایج مشاهده شده از خود نشان داده است. بنابراین در یک فیلتر هوادهی شده با سطح مخصوص مشخص می‌توان میزان VSS خروجی را نیز برآورد نمود. در روابط ۱۶ و ۲۱ چنانچه زمان ماند هیدرولیکی به سمت بی‌نهایت 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 پیش‌بینی دقیق‌تر با متغیر نمودن پارامترهایی نظیر درجه حرارت، این مقادیر تغییر خواهند نمود اما نسبت آنها ثابت خواهد ماند.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

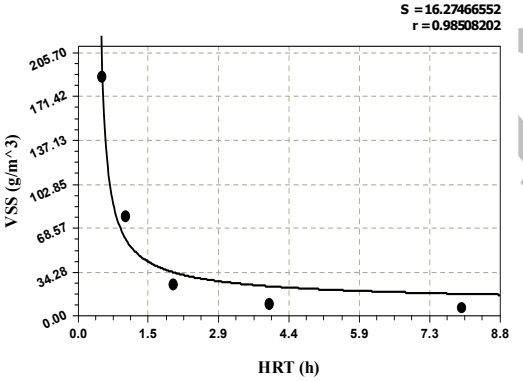
با یک دید کلی می‌توان متوجه شد که فیلترهای هوادهی شده مستغرق در زمانهای ماند هیدرولیکی پایین (حدود ۱ ساعت) نیز کارآیی بسیار خوبی در حذف مواد آلی محلول از خود نشان می‌دهند. شکل ۳ بیانگر این واقعیت است که افزایش سطح مخصوص محیط متخلخل فیلترهای بیولوژیکی مستغرق تا حدی به افزایش کارآیی آن کمک می‌کند و پس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

[1] Harris

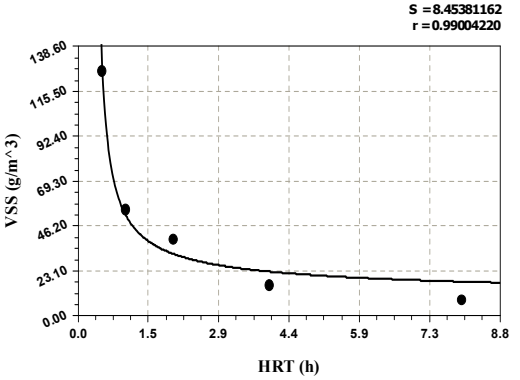
Archive of SID
www.SID.ir



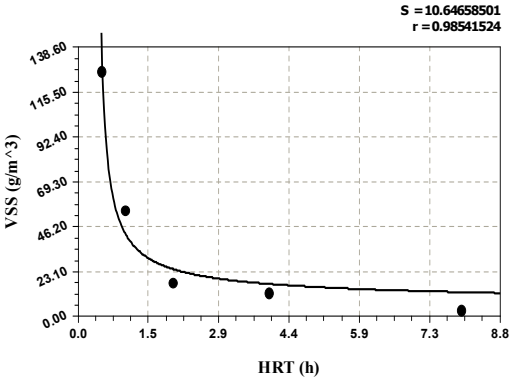
شکل ۹- راندمان حذف SCOD در زمان ماند هیدرولیکی ۸ ساعت



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

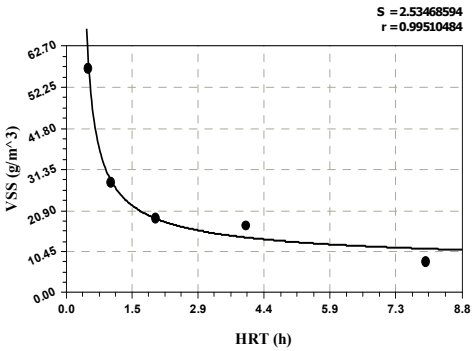


شکل ۱۱- VSS خروجی از فیلتر هوادهی شده ۲ در برابر زمان ماند هیدرولیکی



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

www.SID.ir



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

مشاهده شد که راکتور شمارهٔ ۲ با سطح مخصوص حدود ۳۰۰ مترمربع بر متر مکعب در کلیهٔ حالات (از نظر زمان ماند هیدرولیکی) از بقیه فیلترها پیشی گرفت و نتایج قابل قبولی از خود نشان داد و راکتور شمارهٔ ۱ برخلاف داشتن سطح مخصوص بالاتر در مقایسه با راکتور شمارهٔ ۲ کارآیی کمتری داشت. لازم به ذکر است که راکتور ۲ در بارگذاریهای مشابه، عملکرد مناسب‌تری نسبت به راکتور ۱ از خود نشان داد و این امر می‌تواند به واسطهٔ رشد لایهٔ 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 مادهٔ غذایی به درون لایه بیولوژیکی اتفاق بیفتد که این امر سبب پایین آمدن نسبی کارآیی 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 شمارهٔ ۲ در نرخ بارگذاری ۵۹/۶۱۵ کیلوگرم COD محلول بر متر مکعب در روز کارآیی ۷۴/۴ درصد از خود نشان داد؛ در حالی که وارد نمودن چنین باری در سایر تحقیقات آزمایشگاهی از جمله تحقیقات زینگ[1] [۷] و انگ[2] [۸] تجربه نشده و حتی در موارد شبیه این مقدار نیز سبب کاهش قابل توجه کارآیی روش تصفیه پیشنهادی شده است. لذا با نتایج به دست آمده در بخش حذف مواد آلی، استفاده از فیلتر هوادهی شده مستغرق ۲ در تصفیهٔ پسابهای صنعتی (که احتمالاً قوی نیز هستند) و فاضلابهای شهری که از واحد ته‌نشینی اولیه گذشته باشند، به واسطهٔ حجم کم مورد نیاز و کارآیی بالا مقدور 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 می‌باشد.

[1] Xing
[2] Ong

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.

Archive of SID
www.SID.ir