

کاربرد لایه زیستی^۱ در بسترهای متخلخل

حسین معیری^{۱*}، جلال شایگان^۲، سید محمود رضایی^۱

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی

۲- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام‌نگار: hossein @aut.ac.ir

چکیده

کشور ما ایران در یک منطقه با آب و هوای گرم واقع شده است. خشکسالی چندسال اخیر نیز سبب شده است تا تأمین آب با کیفیت بالا در حوزه‌های شهری و صنعتی بیش از پیش اهمیت پیدا کند. از این رو بایستی علاوه بر دقت نظر در مصرف آب، از انواع راهکارهای مناسب جهت بازیابی و تصفیه فاضلاب کمک گرفت. در این تحقیق دو راهکار با بهره‌گیری از تشکیل لایه زیستی در سطح جامد (فناوری تشکیل موانع زیستی^۲ و فناوری صافی چکنده^۳) بحث شده و شرح چگونگی تشکیل لایه زیستی در این دو روش، مدلسازی و بکارگیری آنها توضیح داده شده است. در این مطالعه سعی شده است روشهای جدید بهره‌گیری از لایه زیستی بمنظور افزایش بازدهی در کیفیت پساب‌های خروجی در صنایع مختلف نظیر صنعت نفت، صنایع معدنی، متالورژی، سرامیک و هیدرولوژی مورد بحث قرار گیرد. موضوع لایه زیستی بدلیل رشد استفاده از پروتوزها در مجاری و اندام‌های درونی انسان نیز چالش برانگیز شده است. وجود لایه زیستی سبب تجمع باکتریایی^۴ در بدن انسان می‌شود، و می‌تواند سلامتی انسان را به خطر اندازد و حتی خطرات جانی در پی داشته باشد، از این نظر رشد لایه زیستی را می‌توان از دو منظر مثبت و منفی بررسی کرد.

کلمات کلیدی: لایه زیستی، صافی چکنده، مانع زیستی، بستر متخلخل

۱- مقدمه

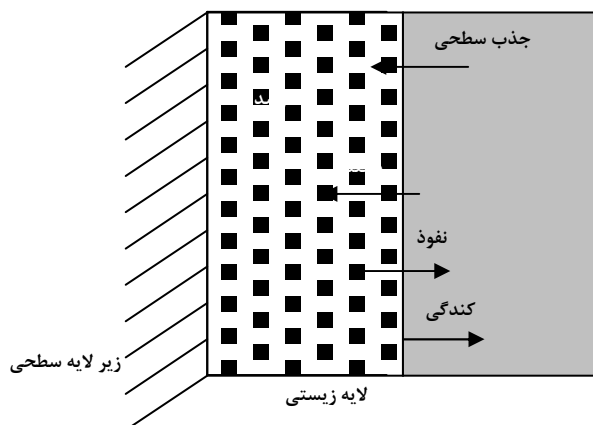
صنایع معدنی با استفاده از لایه زیستی با روش‌های مختلف می‌توانند جداسازی فلزات را از سنگ‌های معدنی تسهیل نمود و برای بازیابی بیشتر نفت از سنگ‌های رسوبی سواحل نفتی می‌توانند از رشد لایه‌های زیستی در خلل و فرج و روزنه‌ها در سنگ‌ها بهره‌گرفت [۱]. اگر پارامترهای هیدرودینامیکی در این روزنه‌ها به خوبی شناخته شوند می‌توان بعضی از روزنه‌های ناخواسته را با تشکیل لایه زیستی مسدود کرد و یا برعکس از رشد ناخواسته لایه‌های زیستی مثلاً در اطراف دستگاه‌های حفاری چاه‌های نفت جلوگیری کرد [۲]. مثال دیگر تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی است. خودپالایی آب‌های

موضوع لایه زیستی در بستر متخلخل رشته جدیدی از علوم محیط زیست است که می‌تواند بخش‌های مختلف صنعتی را به یکدیگر مربوط کند و در واقع یک علم بین رشته‌ای است. لایه زیستی در صنایع کاربردهای مختلفی دارند. در صنایع نفتی می‌توان از رشد ناخواسته لایه زیستی در سنگ‌های رسوبی سواحل نفتی جلوگیری کرد و متعاقباً بازدهی استحصال نفت را افزایش داد و یا در

1. Biofilm
2. Biobarrier
3. Tricking Filter
4. Colony

افزایش می‌کنند و به همین ترتیب پدیده تجمع ادامه پیدا می‌کند و سلول‌های جدید جذب و بعضی از آنها از لایه زیستی جدا می‌شوند. پدیده تشکیل تجمع باکتریایی بر روی سطح ۶ مرحله متوالی را در بر می‌گیرد:

- ۱- اعمالی که ریز اندام‌ها را به سطح نزدیک می‌کند.
 - ۲- اتصال برگشت‌پذیر به سطح
 - ۳- اتصال برگشت‌ناپذیر به سطح
 - ۴- چسبیدن^۳
 - ۵- رشد و تقسیم میکرو ارگانیزم‌های چسبیده به سطح و تشکیل تجمع باکتریایی و لایه زیستی
 - ۶- کندگی و رها شدن
- تشکیل لایه زیستی که از سه فرایند اصلی جذب، تجمع و رشد بوجود می‌آید در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه تشکیل لایه زیستی [۸]

فرایندهای جذب و جدا شدن هنوز بطور کامل شناخته نشده‌اند اما بعضی از پژوهندگان مانند ترولر [۹] از معادلات درجه اول برای مدل‌سازی نهایی (سرعت جدایی سلول‌ها - سرعت جذب سلولی) که بستگی به توده زیستی دارند استفاده کرده‌اند، اسپیتل و همکاران [۱۰] نیز در این مدل‌سازی‌ها عبارت جدیدی برای سرعت بالای جدا شدن سلول‌ها در دوره رشد فزاینده آنها اضافه کرده‌اند. مطالعه در مورد روش‌های انتقال این مواد در مقاله هاروی و همکارانش [۱۱] به صورت مفصل تشریح شده است.

زیرزمینی با تجزیه زیستی مواد آلی در حین عبور از لایه‌های زیستی انجام می‌شود. سرعت تجزیه مواد آلی در آب بستگی زیادی به مشخصات مسیر متخلخل از قبیل نفوذ متوسط سرعت در منافذ و سایر مشخصات مسیر دارد [۳]. اگر از جنبه منفی به پدیده لایه زیستی نظاره کنیم می‌توان گفت که لایه زیستی در بدن انسان ایجاد عفونت و بیماری‌های مختلف می‌کند. حدود ۸۰ درصد از بیماری‌های مزمن التهابی و عفونی از تجمع لایه زیستی در نقاط جراحی‌های پروتز دندان و تعویض استخوان لگن خاصره ایجاد می‌شود [۴].

باید توجه داشت که با درک عمیق عوامل مؤثر در هیدرودینامیک بستر و متغیرهای لایه زیستی در هر یک از حوزه‌های مهندسی نظیر معدن، نفت و پزشکی می‌توان راهکارهای مناسب برای حل مسائل و مشکلات زیستی و بهبود در بازدهی و کارایی بهتر را پیشنهاد نمود. از این جهت درک ارتباط بین هیدرودینامیک بستر و سرعت تشکیل لایه زیستی دارای اهمیت ویژه‌ای است. از جمله متغیرهای هیدرودینامیکی می‌توان از تخلخل بستر، نفوذ و ضریب اصطکاک نام برد.

۲- لایه زیستی و تأثیر تجمع آنها در بستر متخلخل

اغلب ریزاندام‌ها به صورت یک توده بزرگ و قابل توجه در محیط آبی زندگی می‌کنند. خاصیت ریزاندامها در این است که این توده‌ها بوسیله مواد بسیاری خارج سلولی که به آنها EPS^۱ می‌گویند احاطه شده‌اند اگر زیست لایه را به شهر میکرب‌ها تصور کنیم EPS خانه سلول‌های میکروبی می‌باشد [۵] و آنها شرایط زندگی این سلول‌ها را در محیط میکروبی فراهم می‌کنند. در شرایط مناسب، لایه‌های زیستی به یکدیگر متصل و به سطح جامد می‌چسبند [۶]. در سطوح متخلخل در آب مانند هر نوع محیط آبی دیگر، سلول‌های میکروبی به سطح جامد که دارای خلل و فرج فراوان هستند، چسبیده و یا به صورت معلق در محیط شناور می‌باشند که اگر شرایط در محیط فراهم باشد، سلول‌ها جذب شده و رشد کرده و رشد آنها در سطح افزایش می‌یابد. فرایند جذب، به غلظت مواد معلق و پدیده رشد زیست لایه و زیست توده^۲، بستگی به غلظت سلول‌های چسبیده به دیواره دارد [۷]. اگر سرعت جذب سلول‌ها و رشد بیشتر از سرعت رها شده سلول‌ها از سطح باشد، توده‌های زیستی در سطح شروع به

3. Attachment

1. Extracellular Polymeric Substances
2. Biomass Microorganisms

۲-۱ متغیرهای هیدرودینامیکی

در سال‌های اخیر پژوهشگران در بررسی تجمع لایه زیستی ترجیحاً مقاومت هیدرولیکی بوجود آمده از انباشت لایه زیستی را بیشتر از اندازه‌گیری مستقیم عوامل تجمع و فرایندهای مربوط به آن مورد نظر قرار می‌دهند. از قرن نوزدهم، رابطه داریسی^۱ در طراحی انواع فرایندهای تصفیه آب مورد استفاده پژوهندگان بوده است و از اوایل قرن بیستم این رابطه با تغییرات جزئی در آن در طراحی انواع روش‌های با بسترهای متخلخل نظیر صافی چکنده نیز استفاده شده است و جریان سیال در مدل سازی‌ها، به صورت آرام و پایدار ساده‌سازی شده و فرض بر این است که این جریان از روزهایی که به صورت مستقیم و خطوط موازی هستند، عبور می‌کنند. تجمع لایه زیستی سبب انسداد و گرفتگی فضای داخل روزه‌ها و منافذ می‌شود که این انسداد در مشخصات هیدرودینامیکی سامانه تأثیرگذار است.

۲-۲ مدل‌سازی پدیده انتقال در محیط متخلخل

از نتایج آزمایشگاهی و میدانی برای پیش‌بینی مدل جهت انتقال مواد زیستی می‌توان بهره‌گرفت. برای مدل ریاضی در جریان متخلخل از روش‌های انتقال و معادلات نفوذ و همرفت^۲ که ناشی از معادلات ناویر استوک^۳ می‌باشند استفاده می‌شود و معادله پس از ساده‌سازی به اختصار به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x}$$

C، غلظت مواد زیستی در فاز مایع از فاصله x در زمان t و v، سرعت درونی ذرات در نمونه‌ها و D نیز ضریب نفوذ هیدرو دینامیکی می‌باشد.

امروزه نرم‌افزارهای متعددی با انواع مدل‌های ریاضی برای طراحی و ساخت تصفیه خانه‌های فاضلاب‌های صنعتی وجود دارد. هریک از مدل‌های ریاضی با تأکید بر یک یا چند متغیر خاص طراحی می‌شود. فردریک و همکاران، مدل ریاضی خود را برای غلظت‌های بحرانی مولکول‌های پروتئینی موظف در تعیین مکانیزم‌های ارتباطی

(سلول- سلول) برای تشکیل EPS طرح ریزی کرده‌اند [۱۲]. همچنین با استفاده از نرم افزارهای جدید انواع لایه‌های زیستی باتوجه به نوع ریزاندام‌ها و سیستم‌های لایه زیستی چندگانه مطالعه می‌شود و این مدل‌ها با فرض جریان تک بعدی و لایه زیستی تک‌لایه و چند لایه پایه‌ریزی شده است [۱۳]. بعنوان مثال بولتز و همکاران از یک مدل ریاضی با استفاده از نرم افزار Pro2D سامانه تصفیه آب را در دو دمای ۱۲ و ۲۰ درجه سلسیوس طراحی کرده است [۱۴].

۳- روش‌های استفاده از لایه زیستی در جریان‌های متخلخل

گرم‌ترشدن کره زمین و در پی آن خشکسالی جهانی مزید بر علت شده تا تأمین کمبود آب برای کلیه مصارف بیش از پیش نمود پیدا کند. هم چنین باتشدید قوانین زیست محیطی به منظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست، مسأله کنترل انتشار آلاینده‌ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار شده است، از اینرو فناوری‌های مختلف و فراگیر با استفاده از لایه‌زیستی در بسترهای متخلخل که موجب پالایش آب می‌شود، بیشتر مورد توجه قرار گرفته، که در این مقاله به بررسی دو روش زیر می‌پردازیم.

۱- فناوری و پالایش آب‌های زیرزمینی با استفاده از تشکیل موانع زیستی در محیط‌هایی که آلاینده‌های صنعتی بداخل سفره‌های زیرزمینی نفوذ پیدا می‌کند

۲- فناوری صافی چکنده در تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی.

۳-۱ فناوری لایه زیستی در محیط‌های متخلخل برای آب‌های

زیرزمینی با تشکیل موانع زیستی

سفره‌های زیرزمینی در محیط‌هایی که آلاینده‌های صنعتی بداخل زمین نفوذ پیدا می‌کنند بسیار آلوده می‌شوند. روش‌های متعدد (فیزیکی- شیمیایی) برای تجزیه مواد آلاینده زیرزمینی وجود دارد. در روش فیزیکی می‌توان از بکارگیری صفحات ستونی^۴ و در روش شیمیایی می‌توان از بکار بردن دیوارهای تراوا^۵ نام برد.

این‌گونه روش‌ها به صورت گزیده و منتخب عمل کرده و کل محیط آلوده را دربر نمی‌گیرند. ضمن اینکه بعد از مدتی کارائی خود را از

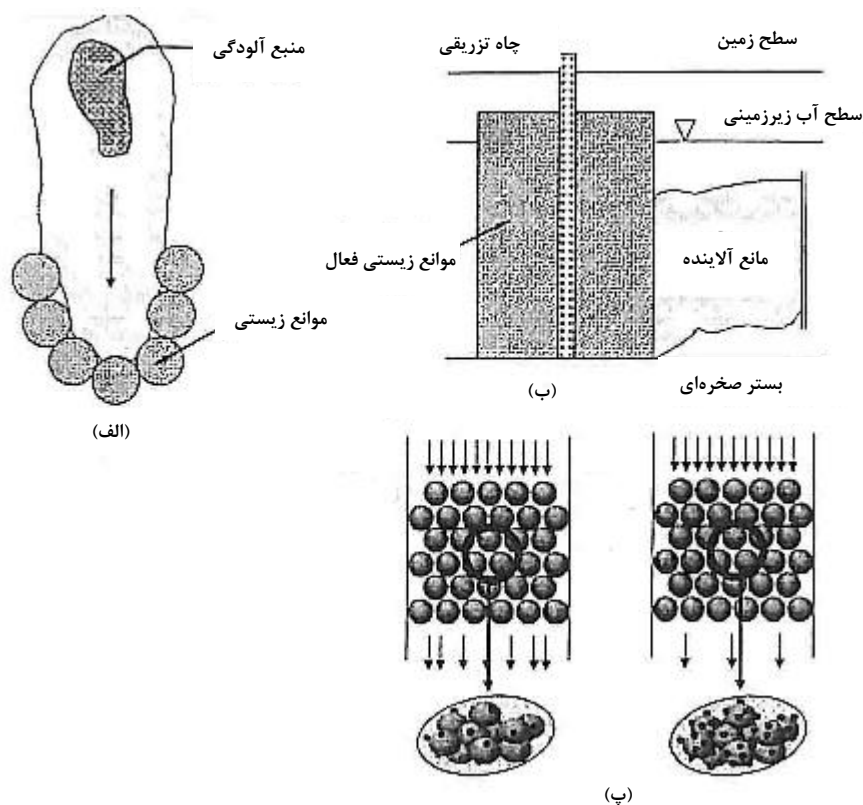
1. Darcy's Law
2. Advection-Dispersion
3. Navier - stock

4. Sheet Pile
5. Permeable Walls

دست می‌دهند. از این نظر فن‌آوری زیستی می‌تواند مؤثرتر در پالایش آب‌های زیرزمینی عمل کرده و مواد مختلف را تجزیه نماید، یکی از این روش‌ها تشکیل مانع زیستی است. موانع زیستی در حذف حلال‌های آلی از آب‌های زیرزمینی بسیار اثرگذار است، بطور مثال از کود گیاهی بعنوان مانع زیستی در حذف آلاینده‌های آلی تراکلرواتیلن و تری کلرواتیلن از آبخوانهای آلوده استفاده شده است که در این روش لجن فعال ایجاد شده از طریق کود گیاهی در مرحله هوای بخوبی آلاینده‌ها را تجزیه می‌کند [۱۵ و ۱۶]. همچنین از این روش برای حذف آلاینده آروماتیک متیل تترا بیوتیل اتر (MTBE) از آبهای زیرزمینی حاوی بنزین در ایالت اوهایو آمریکا نیز بکار گرفته شده است [۱۷]، اسپونار و همکارانش نیز از مانع زیستی برای تجزیه متیل تترا بیوتیل اتر که درصد عمده‌ای از بنزین را تشکیل می‌دهد استفاده نموده اند [۱۸]. کیم و همکارانش از ملاس نیشکر و لجن پسماند از خروجی تصفیه‌خانه‌های پساب صنعتی بعنوان مانع زیستی به صورت مواد تزریقی به محیط آلوده

استفاده کرده‌اند [۱۹]. هانتز از لجن بدست آمده از ترکیب خاکاره و روغن سویا بعنوان ماده تشکیل‌دهنده مانع زیستی استفاده کرد و آلاینده‌های نیتروژنی و سلنیم را در مقیاس آزمایشگاهی از پساب زیرزمینی حذف نمود [۲۰]. مانع زیستی توده‌های آلاینده در لایه زیستی را بخود جذب کرده و EPS تشکیل شده را بخود متصل می‌کند این موانع سبب گرفتگی در بعضی روزنه‌ها هم می‌شود و قابلیت انتقال هیدرولیکی بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۱ و ۲۲] و در آزمایش‌های میدانی گاهی تا ۹۹ درصد کاهش در قابلیت انتقال مشاهده شده است [۲۳]. البته باید توجه داشت که نوع مصرف میکرو ارگانیزم‌های تزریقی بستگی به کیفیت و جنسیت آلاینده‌های پخش شده در مسیر جریان متخلخل در زیرزمین دارد [۲۴].

شکل (۲) طرح‌واره یک مانع زیستی را نشان می‌دهد. چگونگی بدام افتادن ذرات توده‌ای شکل در مانع زیستی بوضوح نمایش داده شده است.

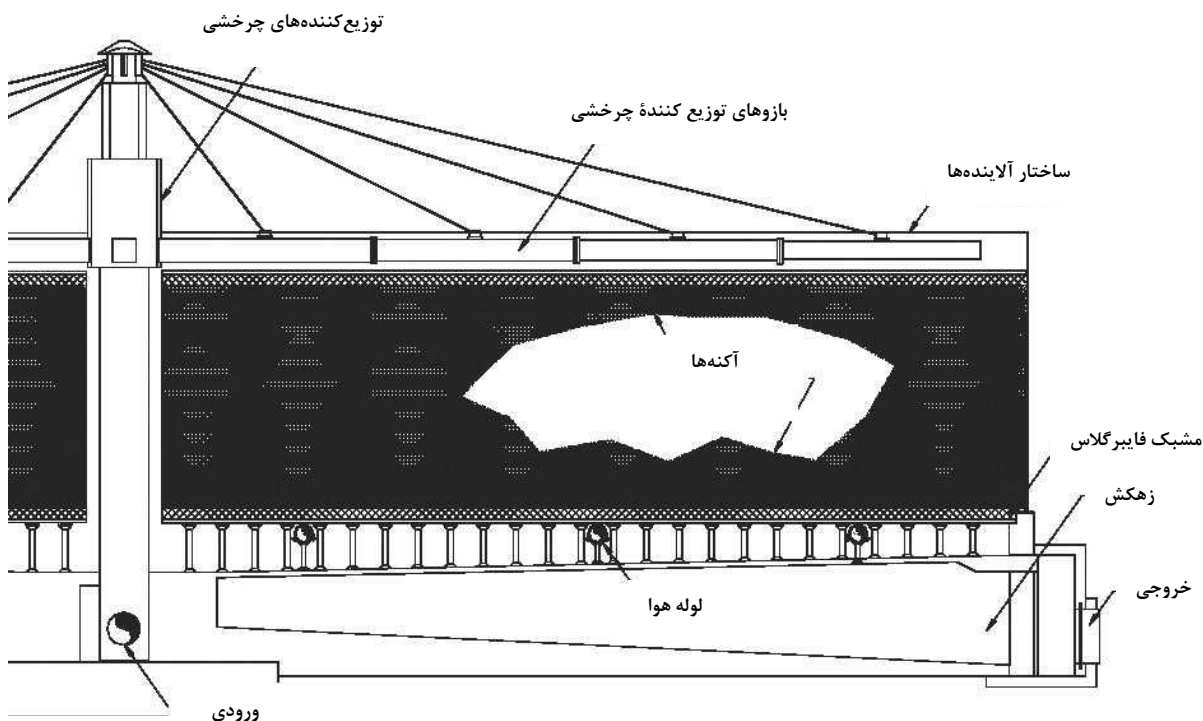


شکل ۲- مراحل تشکیل یک مانع زیستی: (الف) برخورد توده آلاینده به مانع، (ب) چگونگی ورود مواد، از طریق دیواره تزریق (پ) تشکیل لایه زیستی پس از تزریق [۱۹]

۲-۳ فرایند صافی چکنده یا برج‌های زیستی^۱

می‌شود بطور مثال این فرایند در تصفیه آب محیط‌های پرورش ماهی و استخرهای نگهداری ماهیان و آبیان قابلیت زدایش بالایی دارد. در چنین محیط‌هایی بدلیل غلظت کم آلایندها توده زیستی به مقدار کم تولید می‌شود [۲۶]، در نتیجه بایستی از فرایندی استفاده شود که زمان ماند سلول‌های باکتریایی باندازه مناسب و کافی باشد به همین دلیل فرآیند بهره‌گیری از برج زیستی بهترین انتخاب است [۲۷]. مکانیزم و پارامترهای اثر گذار در طراحی صافی چکنده برای شرایطی مانند سرعت، دما و بارگذاری هیدرولیکی توسط ادینگ و همکارانش توصیف شده است [۲۸]. از پدیده صافی چکنده نه تنها در تصفیه آب استفاده می‌گردد بلکه در تصفیه هوای آلوده نیز کاربرد عملی دارد و کاربرد آن به چندین دهه قبل می‌رسد که اوایل تنها برای رفع بوی ناخوشایند گاز خروجی از واحدهای کمپوست در تصفیه خانه‌های فاضلاب بکار می‌رفت [۲۹]، اما در حال حاضر صافی‌های زیستی برای حذف گازهای خروجی از صنایع مختلف با غلظت‌های کم نیز استفاده می‌شود [۳۰]. محققین ایرانی با بکارگیری صافی‌های زیستی برای حذف آلایندها تحقیقات زیادی انجام داده‌اند، شاطر زاده و همکاران از این نوع صافی‌ها برای

روش دیگر در سیستم تصفیه فاضلاب، فرایند صافی چکنده یا برج‌های زیستی است. این پدیده دیربازی است که در صنعت تصفیه فاضلاب جایگزین روش‌های سنتی و قدیمی تر فیلتر چکنده شده است گرچه از اوایل قرن نوزدهم از این فرایند به روش سنتی برای تصفیه فاضلاب استفاده می‌شده ولی در طول این مدت پیشرفت زیادی در ارتقاء روش‌های بکارگیری روش مزبور شده است [۲۵]. برج زیستی از یک بستر ثابت که پر شده از آکنه در داخل بستر مانند سنگ، شن، ماسه، و دیگر موادی که دارای سطوح جانبی زیادی به منظور جذب فاضلاب آلوده را دارند تشکیل شده است. فاضلاب صنعتی یا شهری از طریق افشانک‌های دواری که در بالای سطح بستر قرار می‌گیرند بر روی آکنه‌ها پاشیده می‌شوند و سطحی از لایه زیستی بر روی این مواد شکل می‌گیرد. شرایط هوایی در محیط بوسیله افشانک‌های هوا برقرار می‌شود. شکل (۳) سطح مقطع یک برج زیستی و چگونگی تشکیل لایه زیستی را نشان می‌دهد. نباید از نظر دور داشت که علاوه بر کارایی موثر برج زیستی در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، این سامانه در تصفیه آب نیز استفاده



شکل ۳- نمای یک برج زیستی متعارف [۳۸]

خارجی و دمنده استفاده نمود. صافی چکنده برای حذف آمونیاک به روش زیستی (نیترات‌سازی)^۱ بکار گرفته می‌شود. رشد باکتری‌های هیتروتروف بدلیل غلظت کم مواد آلی در سطح لایه زیستی کند است و بهمین دلیل عمل‌نیترات سازی با درصد بیشتری اتفاق می‌افتد، از این نظر یکی از روش‌های مناسب، استفاده از صافی چکنده است.

امروزه از فناوری‌های متعدد و پیشرفته صافی‌های چکنده، بعنوان پیش تصفیه برای رفع آلودگی فاضلاب‌های صنعتی با بار آلی بهره‌گیری می‌شود در این نوع برج‌ها مواد پلاستیکی پیش ساخته عهده‌دار جذب آلاینده‌ها هستند و دمنده‌های هوا، اکسیژن را از پایین راکتور زیستی و فاضلاب را از بالا به بدخل برج تزریق می‌کنند. شکل (۴) نمونه ساده یک صافی چکنده سنتی را نشان می‌دهد. یک سامانه برج زیستی جدید شامل اجزاء و دستگاه‌های زیر هستند.

- ۱- پمپ توزیع هوا با کنترل سرعت
- ۲- آکنه‌های پلاستیکی
- ۳- سامانه مکانیکی هوادهی با انواع لوله‌های رابط
- ۴- پمپ‌های ورودی و برگشتی فاضلاب
- ۵- پوشش مطمئن سقف مانند برای کاهش بوی نامطبوع ناشی از عملیات تصفیه فاضلاب و جلوگیری از تجمع حشرات

مکانیزم صافی چکنده بخوبی شناخته نشده است. طراحان این نوع سیستم‌ها اکثراً از فرمول‌های تجربی و تجربیات عملی پیشینیان برای طراحی این سامانه استفاده می‌کنند و عملکرد روش (رشد معلق / صافی چکنده)^۲ به صورت تجربی است. دایگر روش‌های مناسب فیلتر چکنده و مزایای بکارگیری آن نسبت به لجن فعال را توضیح داده است [۳۸].

۴-۱ تاریخچه طراحی و ساخت صافی چکنده

تا سال ۱۹۵۰ نصب دستگاه‌ها همانگونه که ذکر شد به صورت تجربی بوده است تا اینکه اِکنفلدر [۳۹] و گالر [۴۰] هر دو به یک پیشرفت عملی و یک تفکر جدید در طراحی صافی‌های چکنده دست پیدا کردند اما در اوایل سال ۱۹۸۰ سازمان محیط زیست آمریکا قوانین جدیدی برای تصفیه فاضلاب تدوین کرد که فاضلاب‌های

حذف ترکیبات سمی و قابل اشتعال مانند سولفید هیدروژن [۳۱]، جانی و دادور برای حذف ترکیبات آروماتیکی جریان‌های آلوده گازی [۳۲] استفاده کرده و نتایج آنرا منتشر کرده اند. نمینی و همکاران نیز با بکارگیری از آکنه‌های اسفنجی با تخلخل بالا و استفاده از ریزاندامهای غیرمعمول در حذف سولفید هیدروژن تحقیق کرده‌اند [۳۳]. محمودی خالدآبادی و همکاران [۳۴] و نورمحمدی و همکاران [۳۵] با استفاده از این روش در فرایندهای نیتریت‌سازی و نیترت زدایی در حذف یونهای مضر آمونیاکی و تبدیل آنها به نیتریت و گاز نیترژن با بازدهی بیش از ۸۰ درصد از صافی زیستی بهره گرفته‌اند. به نظر کارشناسان محیط زیست، صافی‌های زیستی از کارآمدترین زیست واکنشگاههاست. محققان براین باورند که در تصفیه خانه‌های شهری و صنعتی بزرگ و حتی در طرحهای مقدماتی و نوپای تصفیه فاضلاب در مقیاس نیمه صنعتی صافی‌های زیستی کاربرد زیادی دارند. بازدهی و کارایی تجزیه پذیری زیستی مواد تا اندازه‌ای بستگی به پارامترهای غیر زیستی دارد. مثلاً مونو اکسید کربن ماده‌ای است که انحلال پذیری آن در محیط آبی کم است، و حذف آن به روش صافی‌های زیستی یک مورد چالش برانگیز شده است [۳۶]. اکثر مواد آلاینده فرار تا اندازه‌ای قابلیت تجزیه شدن بوسیله باکتری‌ها و جلبک‌ها را دارند [۳۷].

۴-۲ عملکرد صافی چکنده

مواد آلاینده و آلی در فاضلاب صنعتی بوسیله عملیات جذب سطحی و یا جذب شیمیایی در یک سطحی از لایه زیستی تجزیه شده و حذف می‌شوند. آکنه‌ها در فیلتر چکنده باید بطریقی انتخاب شوند که نسبت سطح به حجم زیادی داشته باشند این مواد برای کارایی بهتر، بایستی متخلخل باشند که باضافه سطح خارجی دارای یک سطح درونی قابل ملاحظه نیز برای جذب آلاینده‌ها باشند. گذر آب و اکسیژن محلول از درون مواد متخلخل، اکسیژن را برای تشکیل لایه زیستی فراهم می‌کند این اکسیژن در نهایت مواد آلی را به دی اکسید کربن و آب تجزیه می‌کند. زمانی که ضخامت لایه زیستی به حد کافی رسید مقادیری از لایه از سطح کنده شده که درواقع این لایه به صورت شناور از پساب خروجی نیز باید جدا شود. از این نظر پس از صافی چکنده، حوض ته نشینی برای لجن‌های اضافی جدا شده، تدارک دیده می‌شود. برای اکسیژن مورد نیاز باید از هوای

1. Nitrification
2. Trickle Filter/Suspended Growth

روش (رشد معلق / صافی چکنده) متعاقب روش قبلی نیز کیفیت پساب‌های خروجی را بهتر نمود و این فرایند عمدتاً به اکسایش مؤثرتر مواد آلی بر روی مواد زیستی جامدکمک کرد. در مراحل تصفیه فاضلاب با صافی‌های چکنده سه جزء اصلی وجود دارد:

۱- فاضلاب ورودی بداخل مخزن بوسیله توزیع کننده‌های دوار

۲- تأمین هوای موردنیاز به طرف بالا

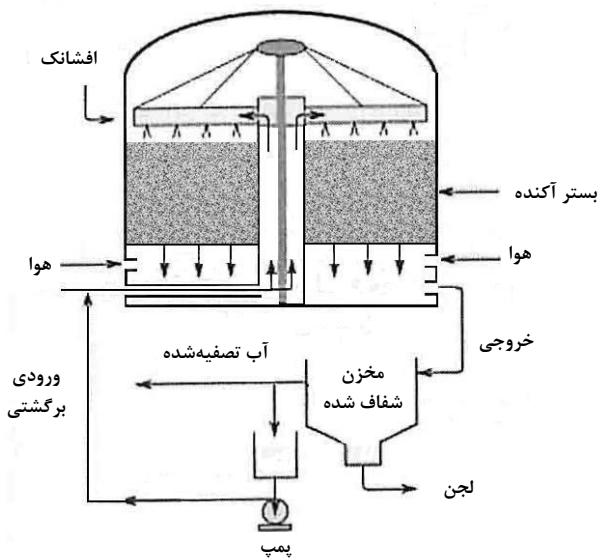
۳- لایه زیستی چسبیده به سطح آکنده‌ها

توزیع کننده‌های فاضلاب به دو نوع افشانک ثابت و توزیع کننده دوار تقسیم می‌شوند. قوه محرکه توزیع کننده به دو صورت هیدرولیکی و الکتریکی فعال می‌شوند. فاضلاب خام بطور غیرمداوم و مقطعی بوسیله توزیع کننده‌ها بر روی مواد دارنده لایه زیستی پاشیده می‌شوند، زمانیکه توزیع کننده‌ها بخوبی عمل نمی‌کنند، پمپاژ هوادهی صورت می‌گیرد و سطح بخشی از زیست لایه در توزیع نامناسب به صورت موثر خیس نخواهد شد و توزیع ناکارآمد سبب عدم تصفیه مناسب شده و بوی تند از قسمت‌های خشک، ناشی از تصفیه ناقص است [۲۵ و ۳۸]. در صافی چکنده برای تشکیل لایه زیستی هماهنگ و یکپارچه و یکنواخت کردن لایه بر روی سطح مواد از یک خط برگشتی استفاده می‌شود [۴۱].

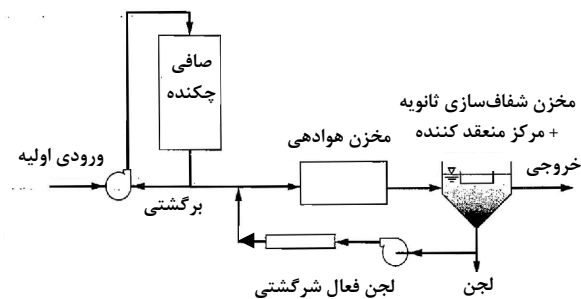
۴-۲ لایه زیستی تشکیل شده بر سطح مواد جامد

انواع مواد دارنده لایه زیستی در صافی چکنده در مقالات متعددی گزارش شده است [۳۸]. گرچه امروزه از مواد با پایه پلاستیک استفاده می‌شود ولی صافی چکنده با مواد سنتی سبک و ریز مثل شن و ماسه اگر بدرستی طراحی شوند نیز کاربرد مؤثر دارند. تعدادی از آکنده‌ها و مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است. در بستر صافی‌های چکنده مواد جامد ریز همراه جریان آب و توده زیستی در شکاف‌ها و خلل و فرج سنگ‌ها بدام می‌افتند و تجمع آنها باعث گرفتگی روزه‌های موجود در آنها می‌شود. هرچند در بسیاری از تصفیه خانه‌ها از این نوع مواد استفاده می‌شود ولی در مجموع مواد پلاستیکی بدلیل سطح زیاد تماس و خلل و فرج زیاد سبب بارگذاری هیدرولیکی بیشتر از فاضلاب و انتقال اکسیژن و هوای آسان‌تر و ضخامت ایده‌آل لایه زیستی مزیت دارند. هر نوع مواد دارنده لایه زیستی باید دارای خصوصیات ماند سطح جانی زیاد، دوام بیشتر، خلل و فرج کافی و قیمت ارزان باشد [۴۲]. در روش

خروجی از تصفیه خانه‌ها باید کیفیت بهتری نسبت به قبل داشته باشند، از این نظر ایده‌های این دو دانشمند نیز می‌بایستی در جهت پالایش بهتر دستخوش تغییر می‌شد. سازمان محیط زیست آمریکا اعلام کرد که برای آلودگی کمتر بایستی تصفیه ثانویه در خروجی پساب‌ها انجام شود و صافی‌های چکنده تا این زمان با استانداردهای تدوین شده سازگار نبود. از این به بعد روش (تماس با سطح جامد / صافی چکنده)^۱ عملاً در سامانه صافی‌های چکنده گنجانیده شد. بدین منظور بعد از عملیات تصفیه در مخزن صافی چکنده، استخر هوادهی کوچک (برای لجن برگشتی) و یک مخزن ته‌نشینی به سیستم تصفیه اضافه شد.



شکل ۴- نمونه ساده و سنتی یک صافی چکنده [۲۲]



شکل ۵- شرح اجمالی فرایند (صافی چکنده / تماس جامدات) (TF/SC)






شکل (۵) نمونه یک سامانه صافی چکنده و لجن فعال را با مخزن ته‌نشینی و لجن برگشتی نشان می‌دهد.

1. Trickle Filter/Solid Contact

این اتصال می‌تواند شرکت داشته باشند که مجموعه‌ای از این ریزاندامها را لایه زیستی می‌نامند. لایه‌های زیستی می‌توانند از مجموعه ای از اجتماع میکروبهها به صورت تک گونه ای و یا مخلوطی از گونه‌های مختلف باکتریایی باشند. البته باید توجه داشت که باکتریها بسته به نوع و مشخصات شان به مواد ضد میکروبی مقاومت نشان می‌دهند. مقاومت لایه‌های زیستی به مواد ضد باکتریایی بیشتر از باکتریهای شناور است، ولی اثر باکتریهای شناور در اندامهای داخلی بدن در بروز بیماریها بیشتر از باکتریها چسبیده شده در سطح می‌باشد [۴۴].

صافی چکنده سنجش دقیق نوع جمعیت ریزاندامها می‌تواند کمک موثری در بکارگیری نوع روش این فرایند داشته باشد. دوت وهمکارانش [۴۳] با استفاده از روش‌های الکتروفوروتیک و باکتری‌های آمونیاکی اکسید شده، انواع ریزاندامهای موجود در آب‌های زیرزمینی و در مجموعه صافی چکنده را تشخیص دادند و با تشخیص انواع آنها در قسمت‌های مختلف سامانه (هوازی و غیر هوازی) عملکرد مناسب صافی چکنده را انتخاب کردند. توانایی باکتریها برای چسبیدن به سطوح، مخصوصاً میکروبهای پاتوژن از خصوصیات ویژه انواع این ریزاندامها می‌باشد، که این عمل در صافی‌های چکنده بخوبی انجام می‌شود. ریزاندامهای مختلفی در

جدول ۱- خواص بعضی مواد واسطه در صافی چکنده [۳۸]

نوع مواد واسطه	مواد	فضای خالی (%)	سطح ویژه (m ² /m ³)	جرم حجمی (kg/m ³)	اندازه اسمی (mm)
قلوه سنگ		۵۰	۶۲	۱۴۴۲	۷۶-۱۲۸
سرباره کوره‌های ذوب		۶۰	۴۶	۱۶۰۰	۲۴-۷۶
پی وی سی (جریان جانبی)		۹۵	۲۲۳ و ۱۰۰	۲۴-۴۵	۶۱۰×۶۱۰×۱۲۲۰
پی وی سی (جریان عمودی)		۹۵	۱۳۱ و ۱۰۲	۲۴-۴۵	۶۱۰×۶۱۰×۱۲۲۰
پلی پروپیلن (جریان مغشوش)		۹۵	۹۸	۲۷	۱۸۵×۵۱

۴-۳ مدل‌سازی و طراحی صافی چکنده

مدلسازی صحیح فیلترهای چکنده با تکیه بر نیترات سازی می‌تواند طراحی درست و عملکرد مناسبی از این روش را در پی داشته باشد. دایگر و همکارانش [۳۸] یک مدل پیشنهادی از روش ترکیبی اکسایش مواد آلی و نیترات سازی ارائه داده است که این مدل بوسیله پارکر و همکارانش (۴۵) هم تأیید شده است.

$$VOR = (S_i + 4/6 S_{NO_3-N}) \left(\frac{Q}{V_m} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right)$$

که در آن:

VOR: سرعت اکسایش ($\text{kg/m}^3\text{d}$)

V_m : حجم مواد پلاستیکی بر حسب m^3

S_i : غلظت جریان ورودی (gr/m^3)

S_{NO_3-N} : غلظت نیترات و نیتريت خروجی (g/m^3)

Q: دبی جریان بر حسب (m^3/d) شامل خط برگشتی

۵- استفاده از صافی چکنده در ایران

تا سال ۲۰۱۰ در کشور ما تعداد ۱۲۹ تصفیه خانه با انواع فناوری‌های مختلف بکارگرفته شده است، این تصفیه خانه‌ها شامل لاگون‌های غیر هوازی (ANL)، لجن فعال (AS)، لاگون‌های هوازی (AL)، استخرهای تثبیت (OP) و واکنشگاه‌های نوبتی (SBR) می‌باشند. در بررسی صدرنژاد [۴۶] آمده است که سامانه صافی چکنده در جنوب شهر تهران به منظور نیترات سازی با ۴ مدول طراحی و نصب گردیده و در حال حاضر بهره برداری می‌شود. ساخت این مجتمع از سال ۲۰۰۳ در زمینی به مساحت ۱۱۰ هکتار به منظور حذف آلاینده‌های نیتروژنی و آلی در شهر ری شروع شده و هدف نهایی آن تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی کلان شهر با پیش‌بینی جمعیت ۱۱ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ می‌باشد. تصفیه خانه شهر ری از دو فرایند ترکیبی لجن فعال و فیلتر چکنده بهره می‌برد که به ترتیب برای حذف مواد کربنی و نیتروژنی موجود در فاضلاب طراحی شده است. صافی چکنده در این تصفیه خانه مواد آمونیاکی را با عملیات نیترات سازی از بین می‌برد. در این فرایند، فاضلاب خروجی از قسمت لجن فعال، بداخل دستگاه صافی چکنده وارد می‌شود و آکنه‌های مورد استفاده در این سامانه سنگ پای طبیعی است. ورودی فاضلاب به این مجموعه ۵۰۰۰۰ مترمکعب در روز است و خروجی نیتروژن از مرحله صافی چکنده به زیر ۱۰ میلی

گرم بر لیتر می‌رسد. بنایی و همکاران [۴۷] در یک تحقیق با بهره‌گیری از شبکه هوش مصنوعی به منظور شبیه‌سازی رفتار سیستم تصفیه خانه، کارکرد طولانی مدت و پایداری فرایند یک سیستم ترکیبی تصفیه فاضلاب متشکل از برج صافی چکنده و مخزن هوادهی لجن فعال در مقیاس صنعتی را در شهرک صنعتی فرامان کرمانشاه مورد ارزیابی داده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به کمبود آب و آلوده بودن آب‌های زیر زمینی ناشی از خشکسالی چندین ساله و افزایش ورودی مواد آلاینده فاضلاب‌های صنعتی و شهری، با در نظر گرفتن شرایط محیطی مناسب می‌توان از موانع زیستی برای حذف آلاینده‌ها استفاده کرد. هم اکنون در جنوب پایتخت که معضل آب‌های زیرزمینی آلوده بیش از پیش نمود پیدا کرده و اختلاط آن با منابع آبی مشکل آفرین شده است، خوشبختانه از تأسیسات صافی چکنده که تنها تصفیه خانه از این نوع در کشور است، بهره برداری شده و آب‌های تصفیه شده جهت مصارف کشاورزی به مزارع دشت ورامین سرازیر می‌شود. هم چنین می‌توان از فرایند صافی چکنده علاوه بر تصفیه فاضلاب کلان شهرهای صنعتی، در تصفیه فاضلاب‌های خروجی صنایع در مقیاس‌های کوچکتر نیز بهره گرفت.

مراجع

- [1] Cunningham, A. B., "Influence of biofilm accumulation on porous media hydrodynamics", science & technology, 1305-1311 (1991).
- [2] MacLeod, F. A., "Plugging of a model rock system by using starved bacteria", Applied and Environmental Microbiology, 54(6):1365-1372 (1988).
- [3] Wilson, B. H., Smith, G. B., Rees, J. F., "Biotransformations of selected alkylbenzenes and halogenated aliphatic hydrocarbons in methanogenic aquifer material: a microcosm study", Environmental science & technology 20(10):997-1002(1986).
- [4] Chang, H. T., Rittmann, B. E., "Comparative study of biofilm shear loss on different adsorptive media", Water Pollution Control Federation, 60(3):362-368(1988).
- [5] Costerton, J. W., Montanaro, L., Acrisola, C. R., "Biofilm in implant infections: its production and Regulation", Int J. Artificial Organisms, 28 (11): 1062-1065(2005).
- [6] Frimmel, F. H., Kammer, F., Flemming H., "Colloidal Transport in Poverous Media", Springer, 119-150(2007).

- [7] Escher, A. R., "Colonization of a smooth surface by *Pseudomonas aeruginosa*: image analysis methods", (1986).
- [8] Wik, T., "Trickling filters and biofilm reactor modelling", *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2:193–212(2003).
- [9] Trulear, M. G., Characklis, W. G., "Dynamics of biofilm processes", *Water Pollution Control Federation*, 54(9):1288–1301(1982).
- [10] Speitel, G., Digiano, F., "Biofilm Shearing under Dynamic Conditions", *Journal of Environmental Engineering*, 113(3):464–475(1987).
- [11] Harvey, R. W., Harms, H., "Transport of microorganisms in the terrestrial subsurface: in situ and laboratory methods", *Manual of Environmental Microbiology*, pp. 753–776(2002).
- [12] Frederick, M. R., Kuttler, C., Hense, B., Eberl, H. J., "A mathematical model of quorum sensing regulated EPS production in biofilm communities", *Theoretical biology & medical modelling*, 8(1):8-16(2011).
- [13] Noguera, D. R., "Biofilm modeling: present status and future directions", *Water science and Technology*, 39(7):273–278(1999).
- [14] Boltz, J. P., Morgenroth, E. Sen, D., "Mathematical modelling of biofilms and biofilm reactors for engineering design", *Water Science and Technology*, 62(8):1821–1836(2010).
- [15] Kao, C. M., Lei, S. E., "Using a peat biobarriers to remediate PCE/TCE contaminated aquifers", *Water research*, 34(3):835–845(2000).
- [16] Kao, C. M., Chen, S. C., Liu, J. K., "Development of a biobarrier for the remediation of PCE-contaminated aquifer", *Chemosphere*, 43(8):1071–8(2001).
- [17] Zein, M. M., Pinto, P. X., Garcia-Blanco, S., Suidan, M. T., Venosa, A. D., "Treatment of groundwater contaminated with PAHs, gasoline hydrocarbons, and methyl tetra-butyl ether in a laboratory biomass-retaining bioreactor", *Biodegradation*, 17:57–69(2006).
- [18] Saponaro, S., Negri, M., Sezenna, E., "Groundwater remediation by an in situ biobarrier: A bench scale feasibility test for methyl tert-butyl ether and other gasoline compounds", *Journal of hazardous*, 167(3):545–552(2009).
- [19] Kim, G., Lee, S., Kim, Y., "Subsurface biobarrier formation by microorganism injection for contaminant plume control", *Journal of bioscience and bioengineering* 101(2):142–8(2006).
- [20] Hunter, W. J., "Removing selenate from groundwater with a vegetable oil-based biobarrier", *Current microbiology* 53(3):244–248(2006).
- [21] Komlos, J., Cunningham, A. B., "Biofilm barrier formation and persistence in variable saturated zones", *Proceedings of the 1998 conference of hazardous waste research*, 200–208(1998).
- [22] Hill, D., Sleep, B. E., "Effects of biofilm growth on flow and transport through a glass parallel plate fracture", *Journal of Contaminant Hydrology*, 56(3-4):227–246(2002).
- [23] Ross, N., Bickerton, G., "Application of biobarriers for groundwater containment at fractured bedrock sites", *Remediation journal*, 12:5–21(2002).
- [24] Ding, A., Zhang, Z., Fu, J., Cheng, L., "Biological control of leachate from municipal landfills", *Chemosphere*, 44:1–8(2001).
- [25] Harrison, J. R., Daigger, G. T., "A comparison of trickling filter media", *Journal of Water Pollution Control Federation*, 679–685(1987).
- [26] Piedrahita, R. H., "Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation", *Aquaculture*, 226(1-4):35–44(2003).
- [27] Bovendeur, J., "Fixed-biofilm reactors applied to waste water treatment and aquacultural water recirculating systems", (1989).
- [28] Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., Klapwijk, A., "Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review", *Aquacultural engineering*, 34(3):234–260(2006).
- [29] Kennes, C., Thalasso, F., "Waste gas biotreatment technology", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72(4):303–319(1998).
- [30] Kennes, C., Veiga, M. C., "Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air", *Journal of biotechnology*, 113(1-3):305–19(2004).
- [۳۱] شاطرزاده، جواد، قشلاقی، رضا و اخوان مهدوی، محمود، "مدل سازی حذف زیستی سولفید هیدروژن از جریانهای گازی در صافی‌های چکنده زیستی"، *نشریه مهندسی شیمی ایران*، ۴۰-۴۷: ۶۸ (۱۳۹۲)
- [۳۲] جانی، فرزاد و دادور، میترا، "مدلسازی شبکه ای بیوفیلتر در تصفیه جریان‌های گازی آلوده به ترکیبات آروماتیک" *نشریه مهندسی شیمی ایران*، ۶۶-۵۷ : ۵۷ (۱۳۸۷).
- [33] Namini, M. T., Heydarian, S. M., Bonakdarpour, B., Farjah, A., "Removal of H2S from synthetic waste gas streams using a biotrickling filter", *Iranian journal of chemical engineering*, 5(3):40-51(2008).
- [34] Mahmoudi Khaledabadi, M., Hosseini, M., Aminirad, H., "Evaluating the trickling filter performance in achieving nitrite pathway using dissolved oxygen analysis", *The 6th international chemical engineering congress and exhibition*, Kish, Iran, (2009).
- [35] Nourmohammadi, D., Esmaeeli, M., Akbarian, H., Ghasemian, M., "Nitrogen Removal in a full scale domestic wastewater treatment plant with activated sludge and trickling filter", *Journal of environmental and public health*, 1:1-6(2013).
- [36] Prado, O. J., Veiga, M. C., Kennes, C., "Removal of formaldehyde, methanol, dimethylether and carbon monoxide from waste gases of synthetic resin-producing industries", *Chemosphere*, 70(8):1357–1365(2008).
- [37] Jin, Y., Veiga, M. C., Kennes, C., "Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 80(5):483–494(2005).
- [38] Daigger, G. T., Boltz, J. P., "Trickling Filter and Trickling Filter-Suspended Growth Process Design and Operation: A State-of-the-Art Review", *Water Environment Research*, 83(5):388–404(2011).
- [39] Eckenfelder, W., "Trickling filtration design and performance", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 128(3):371–383(1963).
- [40] Galler, W. S., Gotaas H. B., "Analysis of biological filter variables", *Jour. San. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engr*, 90(6):59(1964).

- [41] Metcalf, L., Eddy, H. P., Tchobanoglous, G., "Waste Water Engineering: Treatment, Disposal and Reuse", New York, McGraw Hill, 4th ed., ch 9, pp. 430-455(2004).
- [42] Wik, T., Linden, B., "Modeling, control and simulation of recirculating aquaculture systems", Computer Applications in Biotechnology, 2: 141- 148(2005).
- [43] De Vet, W. W. J. M., Dinkla, I. J.T., Muyzer, G., Rietveld, L. C., Van Loosdrecht, M. C. M., "Molecular characterization of microbial populations in groundwater sources and sand filters for drinking water production", Water research, 43(1):182-194(2009).
- [44] امتیازی، گیتی، " میکروبیولوژی و کنترل آلودگی آب، هوا و پساب " اصفهان، مانی، ۱۳۷۹
- [45] Parker, D., Lutz, M., Andersson, B., "Effect of operating variables on nitrification rates in trickling filters", Water environment research, 67:1111-1118(1995).
- [46] Sadrejad, S. A., "Nitrification Processes in Tehran Wastewater Treatment Plant", ISRN Mechanical Engineering, 1-9(2011).
- [47] Banaei, F. K., Zinatizadeh, A. L., Mesgar, M., Salari, Z., "Dynamic performance analysis and simulation of a full scale activated sludge system treating an industrial wastewater using artificial network", International journal of engineering, 26:465-472(2013).