



راندمان حذف دترجنت‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز

به روش لجن فعال

عطاله رجب پور دهخوارقانی *

گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

امیر زارعی

گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

رضا ایمانی باللوجه

گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

چکیده:

سورفاکتانت‌ها یا عوامل فعال سطحی در واقع مواد شیمیایی آلی هستند که با تجمع در سطح مشترک گاز- مایع یا جامد- مایع، خصوصیات آب را تغییر می‌دهند و با کاهش کشش سطحی آب، عمل پاک‌کنندگی را تسریع می‌کنند. سورفاکتانت‌ها در واقع اصلی‌ترین و مهم‌ترین مواد شیمیایی در دترجنت‌ها هستند که تقریباً ۵-۳۰٪ وزن دترجنت‌ها را تشکیل می‌دهند. با تخلیه مستقیم فاضلاب خام یا پساب‌های تصفیه‌شده، دترجنت‌ها به محیط وارد می‌شوند و با ایجاد آلودگی در منابع آب، کیفیت آن‌ها را کاهش می‌دهند و هزینه‌های تصفیه را بالا می‌برند. مطالعه حاضر با توجه به حد مجاز تخلیه دترجنت‌ها بر اساس استانداردهای تخلیه پساب برای آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی و هم‌چنین مورد استفاده در کشاورزی کنترل کارایی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز انجام شد. در این مطالعه تجربی نمونه‌برداری از فاضلاب خام و هم‌چنین پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز در شش هفته و هر هفته شش نمونه برداری انجام شد. مقدار سورفاکتانت‌های آنیونی با روش MBAS^۱ مشخص و با استانداردها مقایسه گردید. بر اساس یافته‌های پژوهش مقدار دترجنت‌ها در فاضلاب خام ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز در محدوده ۱/۲۳ تا ۵/۲۳ میلی‌گرم در لیتر و در پساب تصفیه ۰/۰۹۳ تا ۰/۲۶۳ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. راندمان حذف در این تصفیه‌خانه حدود ۹۳٪ بود. با توجه به نتایج این بررسی و مقایسه راندمان حذف بالای دترجنت از فاضلاب و با دستیابی به استاندارد تخلیه فاضلاب به محیط زیست مشاهده می‌شود که مقادیر دترجنت در پساب خروجی کم‌تر از استاندارد تخلیه به آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد، بنابراین به تصفیه پیشرفته نیاز نخواهد بود.

کلید واژه: تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز، لجن فعال، حذف دترجنت‌ها

* Email: Rajabpour_ata@yahoo.com
^۱ Methylene Blue Active Substances

مقدمه

حاوی $C_{10}H_{22}$ تا $C_{15}H_{33}$ می‌باشند، به عنوان بهترین منابع ساخت بخش آبگریز محسوب می‌شوند و دارای ایزومرهای مختلفی می‌باشند که برحسب نیاز با روشهای مختلف استخراج می‌شوند [۷]، [۹].

از آنجا که باکتری‌های^۱ فاضلاب قادر به تجزیه بعضی از دترجنت‌ها مانند برخی دترجنت‌های کاتیونی و آلکیل سولفونات‌ها نیستند، این مسأله باعث به وجود آمدن توده‌های کف بر روی سطح دریاچه‌ها و رودخانه‌ها می‌گردد. از این رو به منظور جلوگیری از ایجاد مزاحمت و نازیبایی‌های حاصل از پیدایش کف فراوان، کارشناسان بهداشتی، مقررات خاصی را وضع کردند و با اعمال فشار بر سازندگان مواد پاک‌کننده آنها را وادار به تهیه و عرضه محصولاتی قابل تجزیه نمودند و به این ترتیب سازندگان باید محصولاتی را تولید کنند که اثرات زیست محیطی کمتری داشته باشد و در شرایط بی‌هوازی و بدون تجمع در ارگانسیم تجزیه شوند. ولی با وجود دستورالعمل‌های قانونی و به دلیل تصفیه ناکافی فاضلابها یا زمان ماند کوتاه در فرایندهای تصفیه بیولوژیکی، هنوز این ترکیبات و متابولیت‌های حاصل از آنها در آبهای سطحی یافت می‌شوند [۶]، [۹]، [۱۱].

دترجنت‌ها از نظر قابلیت تجزیه بیولوژیکی به دو دسته تقسیم شده‌اند:

۱- دترجنت‌های نرم مانند آلکیل سولفات‌ها، استرها و آمیدها که در اثر تصفیه بیولوژیکی فاضلاب تجزیه می‌شوند و ایجاد اشکال نمی‌کنند و حتی به عنوان مواد مغذی برای رشد باکتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و در مقابل اکسایش بیوشیمیایی از خود مقاومت زیادی نشان نمی‌دهند.

۲- دترجنت‌های سخت مانند آلکیل بنزن سولفونات شاخه‌ای (LABS) [البته LABS قابل تجزیه است ولی سرعت تجزیه بیولوژیکی آن بسیار پایین است] و آلکیل فنوکسی پلی ایتین گلیکول که نه به عنوان ماده مغذی توسط باکتری‌ها مصرف می‌شوند و نه در اکسایش بیوشیمیایی تجزیه می‌شوند و به صورت دست نخورده باقی

اولین دترجنت مصنوعی در سال ۱۹۱۶ در آلمان و در ایالات متحده آمریکا نیز در سال ۱۹۴۶ ساخته شد. کشف دترجنت‌ها در واقع به منظور پاسخگویی به نیاز به عوامل پاک‌کننده غیر صابونی بود که برخلاف صابون با نمک-های معدنی آب ترکیب نمی‌شوند و ترکیبات نامحلول نمی‌دهند [۱]، [۲].

در سال ۱۹۶۰ بیشترین سورفاکتانتی که در دترجنت‌ها گزارش شد، آلکیل بنزن سولفونات خطی (LABS)^۱ بود که به دلیل مقاومت به تجزیه بیولوژیکی مشکلات تصفیه فاضلاب را افزایش داد ولی از سال ۱۹۶۷ به بعد مصرف آن در برخی کشورها متوقف شد و به جای آن از اسیدهای کربوکسیلیک و آلکیل بنزن سولفونات خطی (LABS) که در برابر تجزیه بیولوژیکی مقاومت چندانی ندارد، استفاده شد [۳]. امروزه از سورفاکتانت‌های آنیونی به مقدار زیادی استفاده می‌شود ولی در آینده انتظار می‌رود انواع غیر یونی و آمفوتر جایگزین آن شوند.

سورفاکتانت‌ها از نظر ساختمان شیمیایی مولکول‌هایی نسبتاً بزرگ با ساختاری تقریباً مشابه و دو قطبی هستند. هر مولکول منفرد متشکل از یک قسمت آبدوست (هیدروفیل) قطبی و یک قسمت آبگریز (هیدروفوب) غیر قطبی و لیوفیل است. بار الکتریکی این دو قسمت نیز متفاوت است و به همین دلیل سورفاکتانت‌ها می‌توانند مواد قطبی و غیرقطبی را جذب کنند. مواد اولیه برای تولید این دو قسمت نیز متفاوت می‌باشند [۴]، [۶].

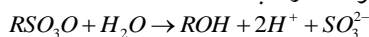
منابع نفتی اغلب منابع مهمی برای ساخت سورفاکتانت‌ها هستند و امروزه سورفاکتانت‌ها را از انواع مختلف مواد شیمیایی، مواد نفتی و مواد روغنی و مشتقات آنها می‌سازند. قسمت آبدوست شامل گروه‌های کربوکسیل، هیدروکسیل، سولفات و سولفونات است که برای ساخت آن از تری اکسید سولفور، اسید سولفوریک، اکسید اتیلن، کربوکسیلات، ترکیبات ازته، پلی اکسید اتیلن، سوکروز و پلی‌پیتیدها استفاده می‌شود. قسمت آبگریز نیز معمولاً یک هیدروکربور پارافینی یا اولفین خطی یا شاخه‌ای (هیدروکربن‌ها با ۲۰-۸ اتم کربن) یا مخلوطی از آن دو می‌باشد. معمولاً نفتا و نفت سفید که

^۱ Linear Alkyl Benzene Sulfonate

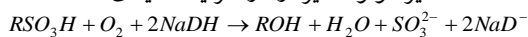
طرف زنجیره یا زنجیره شاخه‌ای با دی متیل نمی‌توانند به وسیله میکروارگانیزم‌ها در اکسیداسیون β شرکت کنند و تجزیه با کاهش یک اتم کربن انجام می‌گیرد (اکسیدان- α)؛ در تجزیه LABS اکسیداسیون زنجیره آلکیل در گروه متیل نهایی (اکسیداسیون- α) نیازمند حضور اکسیژن معمولی است [۳]، [۱۵].

مرحله دوم در تجزیه LABS، تجزیه گروه سولفونات است. سه مکانیسم برای تجزیه سولفونات به صورت زیر ارائه شده است [۳]:

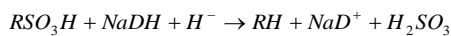
۱- تجزیه سولفونات در آب:



۲- کاتالیز مونواکسیژناز در شرایط اسیدی:



۳- واکنش احیا در تجزیه سولفونات



در صورتی که هر یک از مکانیسم‌های تجزیه LABS غالب شوند، سولفیت تولید می‌شود که می‌تواند در محیط به سولفات اکسید شود. تجزیه گروه آلکیل سولفونات LABS، اسیدهای فنیل استیک یا بنزوئیک را آزاد می‌کنند. اکسیداسیون اسید فنیل استیک توسط میکروب‌ها می‌تواند منجر به تولید اسیدهای فوماریک و استواستیک شود [۳].

مرحله سوم تجزیه LABS، شکست حلقه بنزنی است که به اکسیژن مولکولی نیاز دارد و در نهایت می‌تواند به کاتکول تبدیل شود [۳].

به طور کلی دترجنت‌های مصنوعی مانند سدیم الکیل بنزن سولفونات (SABS) و سدیم N-دودسیل بنزن سولفونات (LABS) به دلیل خصوصیات فیزیکی شیمیایی ویژه خود به مقدار زیاد راندمان سیستم‌های تصفیه فاضلاب و همچنین میزان انتقال اکسیژن به این سیستم‌ها را کاهش می‌دهند که این کاهش انتقال اکسیژن می‌تواند گاهی ۳۰-۴۰٪ راندمان سیستم لجن فعال را پایین بیاورد و از طرف دیگر زمان ماند مورد نیاز فرایند لخته سازی را افزایش و راندمان حذف BOD نهایی را کاهش می‌دهد [۱۶]، [۱۷].

بر اساس تحقیقی که به منظور بررسی تجزیه سورفاکتانت آنیونی (LABS) صورت گرفت، از یک سیستم پایلوت لجن فعال استفاده شد. غلظت دترجنت در

می‌مانند. به این ترتیب با چسبیدن میکروارگانیزم‌ها به طور همزمان به دو اتم کربن زنجیره‌های جانبی با وجود داشتن کربن نوع سوم (کربنی که فقط گروه‌های آلکیل به آن می‌چسبند). فرایند تجزیه بیولوژیکی این دترجنت‌ها متوقف می‌شود [۴]، [۱۲]، [۱۳].

آلکیل بنزن سولفونات خطی (LABS) از بزرگترین گروه سورفاکتانت‌های آنیونی است که در انواع دترجنت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و با ۹۷-۹۹٪ تجزیه به عنوان یک سورفاکتانت با قابلیت تجزیه بیولوژیکی در نظر گرفته شده است. مقادیر LABS در فاضلاب‌های خانگی در حدود ۲۱-۳۰ mg/l به دست آمده است. بر اساس نمونه‌های گرفته شده از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، مقادیر LABS در نمونه‌های پساب حدود ۰/۰۷۱-۰/۰۱۹ mg/l (میانگین ۰/۰۳۹ mg/l) و در لجن اولیه که به صورت هوازی هضم شده و همچنین در لجن فعال به ترتیب ۲/۱-۴/۳ g/kg و ۰/۰۸۶-۰/۰۰۹ g/kg و در خاکهای اصلاح شده با لجن فعال ۲/۵-۴۰/۳ mg/kg (میانگین ۲۵ mg/kg) به دست آمده است [۳]، [۶]، [۹].

به طور کلی میزان حذف LABS در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شامل جذب در ذرات لجن (برای تصفیه‌خانه‌های مختلف مقدار جذب ۳-۱۵٪ با حذف کلی ۹۵-۹۹٪ و تجزیه بیولوژیکی ۹۳-۹۷٪ است و میزان حذف آن از فاضلاب در حدود ۸۵٪ گزارش شده است. از آنجا که LABS معمولاً در شرایط آنوکسیک تجزیه نمی‌شوند، بنابراین مقدار آن در لجن فاضلاب در حد g/kg یافت می‌شود ولی در شرایط هوازی تجزیه بیولوژیکی آن به سرعت انجام می‌گیرد [۱۴].

روند تجزیه LABS شامل تجزیه زنجیر خطی آلکیل، گروه سولفونات و در نهایت حلقه بنزنی است. تجزیه آلکیل با اکسیداسیون گروه نهایی متیل (اکسیداسیون- α) به الکل، آلدئید و به اسید کربوکسیلیک شروع می‌شود. در این واکنشها آنزیم‌ها به وسیله الکان مونواکسیژناز و دو دهیدروژناز کاتالیز می‌شوند. سپس اسید کربوکسیلیک می‌تواند در اثر اکسیداسیون- β ، دو اتم کربن به چرخه اسید تری کربوکسیلیک به صورت استیل کوآنزیم A وارد کند. در زنجیره‌های آلکیل شاخه‌ای گروه متیل در یک

استخراج با استات اتیل انجام شد. به این ترتیب که ۶۰ گرم کلراید سدیم و ۰/۲ گرم هیدروژن کربنات سدیم در ۲۰۰ میلی لیتر نمونه صاف شده، حل شد. بعد از آن محلول با دو برابر استات اتیل استخراج گردید (حجم کل به ۵۰ میلی لیتر رسید). مرحله استات اتیل حاوی سورفاکتانت غیر یونی، ۱۰-۳۰ قسمت اکسید اتیلن دارد.

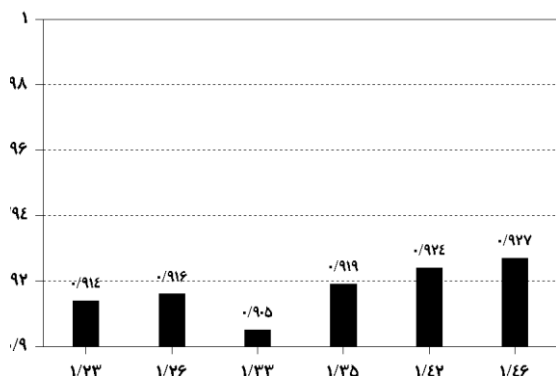
تعیین غلظت کل سورفاکتانت‌های غیر یونی در محلول‌های استات اتیل نیز به روش غیر مستقیم تنسامتریک (Tensametric) صورت گرفت و نتایج با استفاده از تریتون ایکس صد به عنوان سورفاکتانت مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیب معمول فاضلاب خانگی که وارد تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز می‌شود، در جدول ۱ نشان داده شده است.

یافته‌ها

هر مرحله از نمونه برداری شش روز و به مدت شش هفته به طول انجامید. میانگین نتایج حاصل از آنالیز فاضلاب خام ورودی و پساب در جدول ۲ ارائه شده است. هم چنین تغییرات درصد حذف دترجنت‌ها در نمودارهای ۱ تا ۶ نشان داده شده‌اند. جدول ۳ میانگین BOD و COD در فاضلاب ورودی و پساب را نشان می‌دهد.

جدول ۱: ترکیب معمول فاضلاب خانگی ورودی به تصفیه‌خانه

آلاینده	COD	BOD	TKN	TSS	Tot. P	دترجنت‌ها
غلظت mg/l)	۴۱۷	۲۳۰	۴۸	۲۵۵	۱۶	۲/۸۵



نمودار ۱- تغییرات درصد حذف دترجنت از فاضلاب شهری در مرحله اول

فاضلاب ورودی در محدوده ۱۵-۵۰۰ میلی‌گرم برحسب LABS و راندمان حذف در این سیستم در محدود ۶۸-۹۰٪ حاصل گردید [۱۷].

مطالعه حاضر با هدف بررسی راندمان تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز در کاهش دترجنت‌ها انجام شد. لازم به ذکر است که بر روی فاضلاب خام ورودی و پساب خروجی از تصفیه‌خانه، آزمایش‌های BOD₅ و COD نیز انجام شد تا ارتباط بین دترجنت باقیمانده و مواد شیمیایی و آلی باقیمانده در پساب نیز بررسی شود.

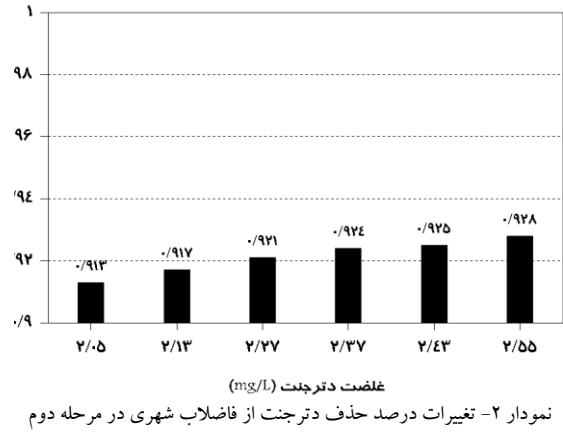
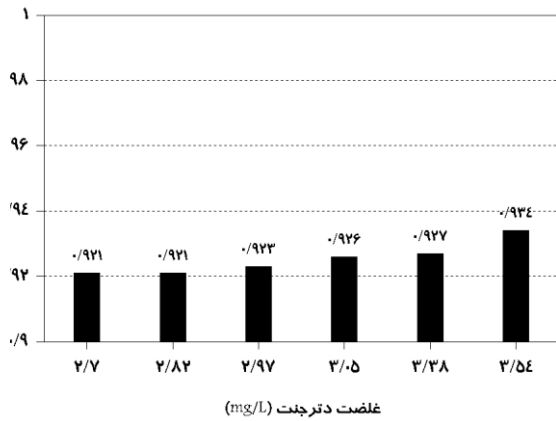
مواد و روش‌ها

در این مطالعه تجربی از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تبریز در شش هفته نمونه برداری شد (هر هفته شش نمونه) و مورد آزمایش قرار گرفت.

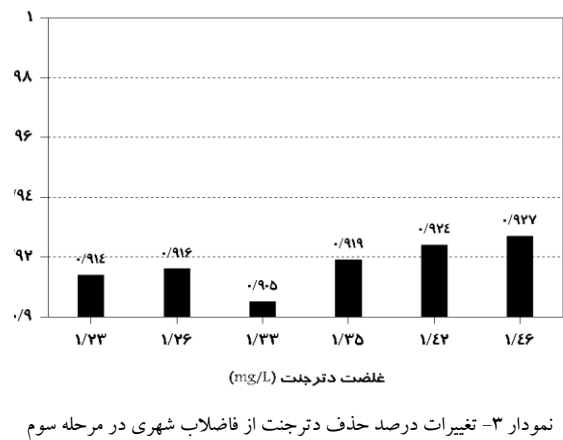
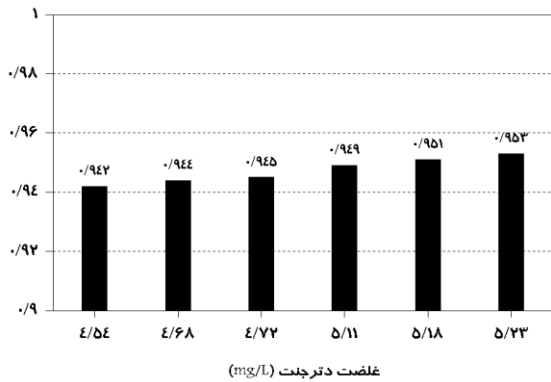
تصفیه‌خانه در سال ۱۳۶۸ احداث و در سال ۱۳۷۴ به بهره‌برداری رسید و مناطق ۲ و ۵ شهر تهران را با مساحت ۷۰۰ هکتار و جمعیت ۸۵۰۰۰ نفر تحت پوشش قرار داده است. به هنگام طراحی، سرانه مصرف آب (LPCD) ۳۵۰-۴۰۰ گالن در نظر گرفته شد. از این رو قابلیت تحت پوشش قرار دادن جمعیتی تا ۱۳۰۰۰۰ نفر را دارا می‌باشد. ظرفیت طراحی تصفیه‌خانه $3,000,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ، حداکثر جریان فاضلاب ورودی 2200 L/s است. این تصفیه‌خانه دارای چهار حوض ته‌نشینی اولیه، چهار حوض هوادهی و هشت حوض ته‌نشینی ثانویه می‌باشد.

به منظور تعیین مقدار سورفاکتانت‌های آنیونی از روش MBAS استفاده شد. این روش بر اساس تشکیل یک ملح آبی رنگ در هنگام واکنش متیلن بلو با سورفاکتانت‌های آنیونی می‌باشد. این ملح در کلرفرم محلول است و شدت رنگ حاصله در مرحله آلی، بعد از انجام عمل استخراج با غلظت اولیه دترجنت در آب یا فاضلاب متناسب است. سپس شدت رنگ حاصله با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۵۲ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود.

جداسازی سورفاکتانت‌های غیر یونی از نمونه‌های فاضلاب خام و تصفیه شده و مایعات تصفیه شده از طریق



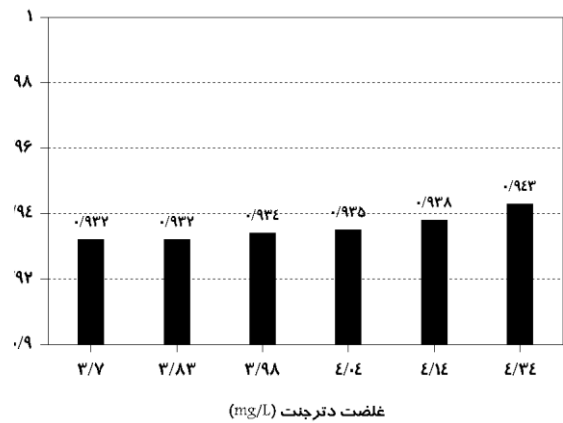
نمودار ۵- تغییرات درصد حذف دترجنت از فاضلاب شهری در مرحله پنجم



نمودار ۶- تغییرات درصد حذف دترجنت از فاضلاب شهری در مرحله ششم

جدول ۲: مقادیر دترجنت در فاضلاب خام و پساب و مقایسه راندمان حذف در تصفیه فاضلاب (مرحله اول)

راندمان تصفیه	دترجنت MBAS، mg/l		نمونه
	پساب	فاضلاب خام	
۹۱/۷	۰/۱۱۰	۱/۳۴	۱
۹۲/۱	۰/۱۷۹	۲/۳۰	۲
۹۱/۹	۰/۱۱۷	۱/۴۶	۳
۹۳/۲	۰/۲۶۰	۳/۸۳	۴
۹۴/۷	۰/۲۵۷	۴/۹۱	۵
۹۲/۵	۰/۲۲۷	۳/۰۷	۶



نمودار ۴- تغییرات درصد حذف دترجنت از فاضلاب شهری در مرحله چهارم

جدول ۳: میانگین مقادیر BOD₅ و COD در فاضلاب خام ورودی و راندمان حذف آن در تصفیه‌خانه فاضلاب

آلاینده	فاضلاب خام	پساب	راندمان حذف
BOD ₅ (mg/l)	۲۰۲	۱۸	۹۱/۱
COD (mg/l)	۲۸۳/۲	۲۲/۸	۹۱/۹

مقادیر COD در فاضلاب خام ۲۸۳ mg/l و در پساب خروجی از تصفیه‌خانه ۲۲/۸ mg/l بود که میانگین حذف ۹۱/۹ را نشان می‌دهد.

منابع:

- [1] دبیری اصفهانی، م.، پتروشیمی، تهران: سپهر، ۱۳۶۴.
- [2] <http://www.cleaning101.com/cleaning/history/>.
- [3] Scott, M.J., Jones, M.N., 2002, The biodegradation of surfactants in the environment., *Bochimica. Acta.*, 15 (8): 235-51.
- [4] ایماندل، کک، گندزداها و ضدعفونی‌کننده‌ها و کاربرد آنها در بهداشت محیط زیست، تهران، آینه کتاب؛ ۱۳۷۵.
- [5] دبیری، م.، آلودگی محیط زیست، هوا-آب-خاک (صوت. چاپ اول)، تهران، اتحاد؛ ۱۳۶۴.
- [6] http://www.mst.dk/udgiv/publications/2001/87-7944,595-9/forord_eng.htm.
- [7] <http://www.cleaning101.com/cleaning/chemistry/soapchemistry2.html>.
- [8] <http://www.suncitysoap.com/chemistry3.html>.
- 9-Torben M.D., 2001, Environmental and health assessment of substances in household detergents and cosmetic detergent products., *Environmental- Proj., Danish EPA*; 615.
- [10] Scroder ,H.F., 2000, Surfactants: standard determination methods., *Wat. Sci. Technol.*, 42 (7): 391-98.
- [11] Redisher R.G., 1990, *Surfactant Biodegradation.*, New York: Marcel- Decker; 663-83.
- [12] Babit S.M., 1994, Mody, H.D., *Textile industry wastewater effects.*, *Water Sewage*, 11(4): 98-102.
- [13] <http://www.zetatalc.com/health/theal17C.htm>.
- [14] Forter, C.E., 1990, *Treatment of Industrial Effluents*, New York, Avijiit Dasgupta.
- [15] Mc. Avog D.C., Eckholt, R.A., 1993, Rapaprt C., *Fate of linear alkylbenzene sulfonate in the environment.*, *Env. Tox. Chem.*, 18 (6): 977-89.
- [16] <http://www.huntsman.Com/surface-sciences/showpage.cfm?pageID=706>.
- [17] Ludwig, H.F., 1998, Evaluation of the use of anionic detergents (LABS)., *Water Res.*, *Watrag*, 22 (2): 58-90.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در فاضلاب خام ورودی مقادیر دترجنت در مراحل اول تا ششم نمونه‌گیری به ترتیب برابر بود با ۱/۲۳-۱/۴۶، ۲/۱۳-۲/۵۵، ۲/۳۸-۳/۵۴/۶۱، ۴/۳۴-۴/۵۴، ۵/۲۳-۵/۵۴ و ۳/۵۴-۳/۷۰ میلی‌گرم در لیتر LBAS. مقادیر دترجنت در پساب خروجی از تصفیه‌خانه در مراحل اول تا ششم نمونه‌گیری به ترتیب برابر ۰/۱۰۵-۰/۱۲۶، ۰/۱۷۶-۰/۱۸۳، ۰/۱۰۸-۰/۱۳۱، ۰/۲۴۷-۰/۲۶۳، ۰/۲۴۶-۰/۲۶۳ و ۰/۲۱۳-۰/۲۴۶ و ۰/۲۴۶-۰/۲۶۳ میلی گرم در لیتر (LABS) به دست آمد.

راندمان حذف دترجنت در تصفیه‌خانه شهر تبریز با سیستم لجن فعال در مراحل اول تا ششم نمونه برداری به ترتیب عبارت بود از: ۹۰/۵-۹۲/۷، ۹۱/۳-۹۲/۸، ۹۰/۳-۹۲/۸، ۹۲/۸، ۹۳/۲-۹۴/۳، ۹۴/۲-۹۵/۳ و ۹۲/۱-۹۳/۴٪. به این ترتیب با مقایسه راندمان حذف بالای دترجنت از فاضلاب در سیستم لجن فعال و با دستیابی به استاندارد تخلیه به محیط زیست مشاهده می‌شود که مقادیر دترجنت در پساب خروجی کمتر از استاندارد تخلیه به آبهای سطحی (mg/l) (۱/۵) و استاندارد تخلیه به آبهای زیرزمینی (۰/۵ mg/l) می‌باشد. بنابراین به تصفیه پیشرفته نیازی نخواهد بود..

جدول ۳ نشان می‌دهد که در فاضلاب خام ورودی، مقادیر BOD₅، ۲۰۲ mg/l و ۱۸ mg/l در خروجی بوده است که میانگین حذف ۹۱/۱٪ را نشان می‌دهد. هم چنین