

# بررسی عملکرد هیبرید نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در کاهش بار آلودگی فاضلابهای با بار آلودگی بالا

بهناز صالحی سیاوشانی<sup>۴</sup>

مهدی برقی<sup>۲</sup>

بهاره صالحی سیاوشانی<sup>۲</sup>

امیر حسام حسنی<sup>۱</sup>

(دریافت ۸۸/۱/۱۴ پذیرش ۸۹/۸/۲)

## چکیده

امروزه با توجه به توسعه صنایع گوناگون نظیر صنایع داروسازی، تولید مواد شیمیایی و پاک کننده‌ها، حجم عظیمی از پساب و فاضلابهای با بار آلودگی بالا، منابع آبهای سطحی و زیرزمینی را تهدید می‌کند. فاضلاب این صنایع با دارا بودن بار آلودگی بالا سبب می‌گردد تا تصفیه آنها نیاز به راه‌کارهای ویژه‌ای داشته باشد. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد سیستم هیبرید نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در حذف بار آلودگی بالای فاضلاب بود. روش کار به این ترتیب بود که در قسمتی از تحقیق، کارایی نانوفیلتراسیون به همراه فرایند جذب سطحی در یک سیستم هیبریدی و در قسمتی دیگر سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی، در حذف بار آلودگی فاضلاب بر حسب COD مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از یک پایلوت نانوفیلتراسیون به ظرفیت ۷/۶ متر مکعب در روز به همراه فیلترهای ۱ و ۵ میکرونی، یک غشای نیمه تراوا و یک پایلوت سیستم هیبریدی با کارتریج‌های حاوی کربن فعال دانه‌ای استفاده گردید و در بار آلودگی و زمان متغیر، پارامترهای دبی ورودی، دبی خروجی و راندمان حذف COD اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در هنگام استفاده از سیستم هیبریدی، راندمان حذف بار آلودگی بیشتر از هنگامی است که از نانوفیلتراسیون به تنهایی استفاده شود. به طوری که حداکثر راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در سیستم هیبریدی به ترتیب برابر با ۹۹ و ۹۵/۸۶ و ۹۲/۹۳ درصد و در سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی برابر با ۸۷/۳۴ و ۵۰ و ۲۹/۴۱ درصد بود. در این تحقیق مشخص شد که با گذشت زمان، دبی خروجی و راندمان حذف بار آلودگی در هر دو سیستم کاهش می‌یابد که این امر به علت وقوع پلاریزاسیون قطبی و گرفتگی در غشا است. اما این مقدار گرفتگی در سیستم هیبریدی بسیار جزئی بوده و به وضوح کمتر از میزان گرفتگی در سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی است. بنابراین سیستم هیبریدی هم بر روی افزایش راندمان حذف بار آلودگی و هم بر روی به تأخیر انداختن زمان وقوع گرفتگی مؤثر است و میزان گرفتگی را به حداقل می‌رساند.

**واژه‌های کلیدی:** نانوفیلتراسیون، کربن فعال، رفلکس جریان، پلاریزاسیون قطبی، راندمان

## Organic Removal Efficiency of the Nanofiltration and Adsorption Hybrid System in High Strength Wastewater

Amir Hessam Hassani<sup>1</sup>

Bahare Salehi Siavashani<sup>2</sup>

Mehdi Borghef<sup>3</sup>

Behnaz Salehi Siavashani<sup>4</sup>

(Received Apr. 3, 2009 Accepted Oct. 24, 2010)

### Abstract

Surface and groundwater resources are increasingly jeopardized by discharges from pharmaceutical, chemical, and detergent plants. The high pollutant load of the effluents from these industries requires specific treatments. The objective of this research was to study and compare the nanofiltration and adsorption hybrid system with the plain nanofiltration system in wastewater treatment. For this purpose, a pilot nanofiltration system with a capacity of 7.6 m<sup>3</sup>/d using 1 and 5 micron filters and a FILMTEC NF90-4040 membrane was used in the first phase of the study. In the second phase, granular activated carbon cartridges were used. Inluent and effluent discharges as well as the COD removal were measured in both systems under variable times and organic load conditions. The results showed that COD removal efficiency was higher in the hybrid system than in the plain nanofiltration one. In the hybrid system, the Maximum in the hybrid system, the COD removal efficiencies achieved for

1- Asist. Prof. of Environment and Energy Faculty, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student of Environmental Eng., Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran

3- Prof., Dept. of Chemistry and Petroleum Eng., Sharif University of Tech., Tehran

4- M.Sc. of Environmental Eng., Sewage and Wastewater, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran (Corresponding Author) 09376412251 mz\_uts@yahoo.com

۱- استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، گرایش آب و فاضلاب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران (نویسنده مسئول) ۰۹۳۷۶۴۱۲۲۵۱ mz\_uts@yahoo.com

organic loads of 1000, 2000, and 3000 mg/L were 99%, 95.86%, and 92.93%, respectively. The same values for the plain nanofiltration system were 87.34%, 50%, and 29.41%, respectively. It was found that polarization and membrane fouling decreased both the effluent flow and the COD removal efficiency with time. Fouling of the membrane was, however, lower in the hybrid system compared to the plain nanofiltration; thus, the hybrid system was associated with higher values of COD removal and delayed membrane fouling.

**Keywords:** Nanofiltration, Activated Carbon, Flow Reflux, Polarization, Efficiency.

مختلف از ۳۰/۵ تا ۷۰ (L/h.m) متفاوت بود. گرفتگی در تمام غشاها به دلیل تجمع ذرات مولکولی نزدیک به سطح فیلتر مشاهده شد [۷].

هدف از انجام این تحقیق بررسی عملکرد سیستم هیبریدی نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در کاهش بار آلودگی بالای فاضلاب بر حسب COD بود.

## ۲- مواد و روشها

این مطالعه در بهمن ماه سال ۱۳۸۷ به مدت شش ماه در آزمایشگاه محیط زیست واقع در دانشکده علوم پایه واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی انجام گرفت. به منظور بررسی حذف بار آلودگی بالای فاضلاب، از پایلوت سیستم غشایی نانوفیلتراسیون به ظرفیت ۷/۶ متر مکعب در روز به همراه فیلترهای ۱ و ۵ میکرونی و یک غشای نیمه تراوی فیلم تک مدل NF90-4040 استفاده شد. مشخصات غشا در جدول ۱ آورده شده است. سایر مشخصات پایلوت عبارتند از

- ۱- مخزن محلول ورودی<sup>۴</sup> با گنجایش ۳۰۰ لیتر
- ۲- دو عدد پمپ سانتریفوژ نوع جی ای موتور<sup>۵</sup> ساخت کشور آمریکا با دبی ۸ لیتر در دقیقه و ارتفاع فشاری ۶۰-۵ متر
- ۳- تجهیزات فرعی شامل شیر، لوله و افشانک
- ۴- فلومترهایی برای اندازه‌گیری جریان تا دبی ۸ لیتر در دقیقه
- ۵- محفظه فشار<sup>۶</sup> استیل که نگهدارنده غشاست
- ۶- فشارسنج به منظور اندازه‌گیری محدوده فشار میکروفیلترها، صفر تا ۱۰ بار
- ۷- فشار سنج برای اندازه‌گیری محدوده فشار نانوفیلتر، صفر تا ۴۰ بار

مطالعه در کل به دو فاز تقسیم گردید. در فاز اول حذف بار آلودگی بالای فاضلاب توسط پایلوت سیستم غشایی نانوفیلتراسیون با مشخصات ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. در فاز دوم برای بررسی حذف بار آلودگی بالای فاضلاب توسط سیستم هیبریدی، قبل از غشای نانو از کربن فعال دانه‌ای در داخل

## ۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی و تعدد صنایع مختلف، پساب حاصل از فرایندهای صنعتی تهدیدی جدی برای محیط زیست به‌شمار می‌رود. در این بین صنایع با بار آلودگی بالا که COD و BOD زیادی دارند، نقش عمده‌ای در آلودگی زیست محیطی ایفا می‌کنند. COD و BOD بالا سبب ایجاد مشکلاتی در تصفیه فاضلاب این صنایع می‌شود که این امر لزوم متمایز کردن روشهای تصفیه فاضلاب این صنایع را بیش از پیش بیان می‌کند [۱ و ۲].

دانش تصفیه فاضلاب نیز همگام با پیشرفت سایر زمینه‌های دانش بشری پیشرفت نموده است و در حال حاضر، تکنولوژی‌های زیادی در خصوص حذف بار آلودگی فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان فرایندهای جذب سطحی و فرایندهایی که از نانوفیلترها بهره می‌گیرند نیز مورد توجه قرار دارد [۳ و ۴].

صنعت تصفیه فاضلاب یکی از مهم‌ترین عرصه‌های استفاده از نانوفیلتراسیون است. توانایی توأمان این فرایند در حذف مواد آلی و غیر آلی به همراه حذف سختی در یک مرحله، باعث شده تا این فرایند جایگاه ویژه‌ای در تصفیه فاضلاب داشته باشد و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی کارایی این غشاها صورت گیرد [۵].

ترابیان و همکاران در سال ۱۳۸۷ طی تحقیقی نشان دادند که نانوفیلتراسیون به تنهایی قادر است کربن کل آلی آب را به کمتر از ۲ میلی‌گرم در لیتر برساند [۶].

کریستین و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه سنت کارینا<sup>۲</sup> در برزیل تحقیقی درباره حذف رنگ و COD به وسیله فناوری غشایی انجام داده‌اند. در این مطالعه کاربرد نانوفیلتراسیون در حذف رنگ و COD موجود در فاضلاب صنایع نساجی بررسی شده است. آزمایش‌های نانوفیلتراسیون در یک پایلوت که در شرایط جریان متقاطع<sup>۳</sup> بهره‌برداری می‌گردید، انجام شد. سه نوع مختلف از غشاها<sup>۳</sup> اسپیرال MP31 و NF45 و DK1073 به ترتیب در این پایلوت مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حذف رنگ در غشاها<sup>۳</sup> NF45 و DK1073 حدود ۹۹ درصد و حذف COD در غشا<sup>۳</sup> MP31 حدود ۷۸ درصد بوده است. در تحقیق مذکور فلاکس آب خروجی از غشا برای فاضلابهای

<sup>4</sup> Filmtec

<sup>5</sup> Feed Tank

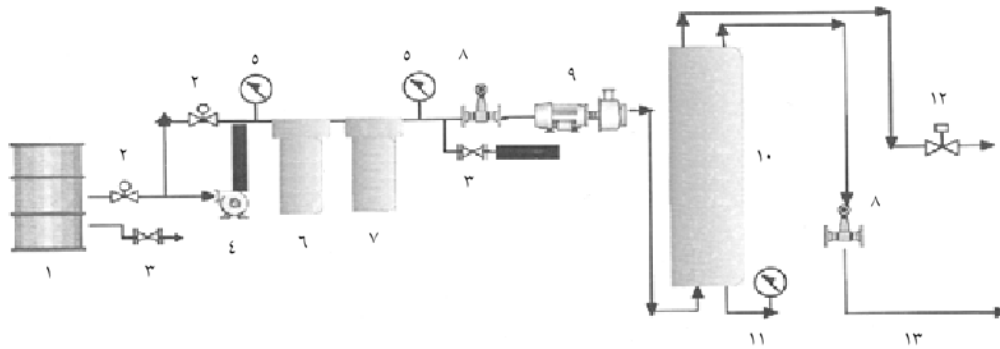
<sup>6</sup> GE Motors

<sup>7</sup> Pressure Vessel

<sup>1</sup> Cristiane

<sup>2</sup> Sants Caterina

<sup>3</sup> Cross Flow



- (۱) منبع تغذیه (حجم=۳۰۰ لیتر)  
 (۲) شیر جریان کنارگذر  
 (۳) شیر خروجی  
 (۴) پمپ فشار پایین  
 (۵) فشارسنج میکروفیلتر  
 (۶) غشا ۵ میکرونی میکروفیلتر  
 (۷) غشا ۱ میکرونی میکروفیلتر  
 (۸) فلومتر  
 (۹) پمپ سانتریفوژ  
 (۱۰) غشا نانوفیلتر  
 (۱۱) فشارسنج غشا نانوفیلتر  
 (۱۲) شیر خروجی  
 (۱۳) شیر خروجی

شکل ۱- شمایی از پایلوت نانوفیلتر و متعلقات آن

جدول ۲- مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده در آنالیز بار آلودگی نمونه‌ها

فرمول شیمیایی	نام مواد شیمیایی
HgSO <sub>4</sub>	سولفات جیوه
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	سولفات نقره
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	واکنش گر اسید سولفوریک
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	محلول استاندارد دی کرومات پتاسیم
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	محلول تیتراکننده سولفات آهن آمونیایی (FAS)
۱۰ و ۱ - فنانتروپین تک آبه FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	محلول شناساگر فروئین

اساس بار آلودگی بر حسب COD مورد نیاز، مقدار مشخصی از ملاس با توجه به فاز تحقیقاتی به مخزن اضافه شد. به این ترتیب بعد از اختلاط محتویات داخل مخزن، بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه گردید. در این تحقیق عوامل مؤثر در حذف بار آلودگی فاضلاب بر حسب COD بررسی شد که شامل تغییرات بار آلودگی در حذف COD و تغییرات زمان در فشار ثابت برابر با ۵ بار بود.

#### ۲-۱ فاز اول: استفاده از سیستم نانوفیلتراسیون در حذف بار آلودگی فاضلاب

در این فاز از تحقیق، حذف بار آلودگی فاضلاب به روش نانوفیلتراسیون مورد بررسی قرار گرفت. طی سه مرحله حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در فشار ثابت ۵ بار، مورد بررسی قرار گرفت و طی مدت زمان ۸ ساعت، هر ساعت ۱ بار نمونه‌برداری از خروجی پایلوت

کارتریج استفاده شد. شکل ۱ شمایی از پایلوت نانوفیلتراسیون و متعلقات آن را نمایش می‌دهد. مواد شیمیایی مورد استفاده در آنالیز بار آلودگی و اندازه‌گیری COD نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. این مواد دارای درصد خلوص آزمایشگاهی و ساخت شرکت مرک<sup>۱</sup> آلمان هستند.

فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق به صورت مصنوعی تهیه گردید. برای تهیه محلولهای مورد آزمایش، حجم معینی از آب شهر در مخزن پایلوت ذخیره شد و برای تأمین بار آلودگی فاضلاب بالا از ملاس کارخانه قند به‌عنوان منبع اصلی کربنه استفاده شد و بر

جدول ۱- مشخصات غشا مورد استفاده

محصول	FILMTEC NF90-4040
سطح فعال غشا	۷/۶ (m <sup>2</sup> )
فشار عملیاتی	۴/۸ (bar) (۷۰ psi)
میزان دبی فیلتر شده	۷/۶ (m <sup>3</sup> /d) (۲۰۰۰ gpd)
درصد حذف نمک	٪۹۷
نوع غشا	Polyamide/Tin film composite
بیشینه دمای عملیاتی	۴۵ °C (۱۱۳ °ft)
بیشینه فشار عملیاتی	۴۱ (bar) (۶۰۰ psi)
بیشینه میزان جریان ورودی	۳/۶ (m <sup>3</sup> /hr) (۱۶ gpd)
بیشینه افت فشار	۱ (bar) (۱۵ psi)
دامنه pH در عملیات دائم	۱۱-۲
دامنه pH در عملیات غیردائم	۱۲-۱
حد تحمل کلر آزاد	< ۱/۰ (ppm)

<sup>1</sup> Merck

انجام و جمع‌آوری گردید. سپس مقدار COD نمونه‌های جمع‌آوری شده در هر سه مرحله اندازه‌گیری و درصد حذف بار آلودگی بر حسب COD در زمان‌های مختلف محاسبه گردید.

## ۲-۲- فاز دوم: استفاده از سیستم هیبریدی نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در حذف بار آلودگی فاضلاب

در این فاز برای حذف بار آلودگی فاضلاب به‌روش هیبرید، مشابه فاز اول عمل شد با این تفاوت که در این فاز، از پایلوت نانوفیلتراسیون به‌همراه کربن فعال در داخل کارتریج، قبل از غشای نانوفیلتر استفاده شد. طی سه مرحله بارهای آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در فشار ثابت ۵ بار از دستگاه عبور داده شد و در مدت زمان ۸ ساعت کارکرد دستگاه، نمونه‌هایی به‌صورت ساعتی از خروجی پایلوت تهیه و جمع‌آوری شد.

پس از اندازه‌گیری بار آلودگی بر حسب COD هر یک از نمونه‌های ذکر شده، راندمان حذف در زمان‌های مختلف کارکرد سیستم هیبریدی محاسبه گردید.

## ۳-۲- روش آنالیز نمونه‌ها

کلیه آزمایش‌های انجام شده براساس دستورالعمل‌های ارائه شده در کتاب روش استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب انجام گرفت و COD هر یک از نمونه‌ها براساس روش رفلاکس باز طبق استاندارد شماره B ۵۲۲۰ اندازه‌گیری گردید [۸]. در جدول ۳، روش انجام هر یک از آزمایش‌ها، محل و زمان نمونه‌برداری و روش حفاظت نمونه‌ها ارائه گردیده است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تأثیر تغییرات زمان بر راندمان حذف بار آلودگی در سیستم نانوفیلتراسیون

در این مرحله هدف، تعیین کارایی غشای نانوفیلتر در حذف بار آلودگی فاضلاب بر حسب COD های معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و تأثیر زمان عبور بر راندمان حذف بود. بر این اساس بارهای آلودگی مختلف از غشای نانوفیلتر عبور داده شد و در زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ ساعت از زمان شروع به کار سیستم، نمونه‌برداری انجام گردید. در تمامی مراحل آزمایش‌ها، فشار دستگاه برابر ۵ بار ثابت نگه داشته شد.

درصد حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و دبی خروجی در زمان‌های ۱ تا ۸ ساعت پس از شروع به کار سیستم در جدول ۴ آورده شده است. درصد حذف در ساعت اول برابر با ۶۸/۴۳ درصد و دبی خروجی برابر با ۳/۵ لیتر

در دقیقه بود. مقدار حذف در ساعت سوم به بیشترین میزان خود یعنی ۸۷/۳۴ درصد با دبی خروجی معادل ۳/۹ لیتر در دقیقه رسید. پس از ساعت سوم، افت دبی خروجی صورت گرفت که سبب افت راندمان حذف نیز شد. به‌طوری که راندمان حذف در ساعت ششم به کمترین میزان خود یعنی ۲۶/۵۶ درصد با دبی خروجی برابر با ۲/۷ لیتر در دقیقه رسید. این امر نشان دهنده وقوع پدیده گرفتگی در غشا بود. سپس به تدریج با گذشت زمان، میزان حذف به ۲۷/۹۵ درصد با دبی خروجی ۲/۹ لیتر در دقیقه در ساعت هشتم افزایش پیدا کرد.

در ارتباط با بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز، راندمان حذف از ۵۰ درصد در ساعت اول به ۴ درصد در ساعت هشتم کاهش یافت که نشان‌دهنده پدیده گرفتگی در غشا با گذشت زمان بود و سبب شد تا دبی خروجی از ۳/۵ لیتر در دقیقه در ساعت اول به ۲/۲ لیتر در دقیقه در ساعت هشتم کاهش یابد.

این پدیده در راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز مشاهده گردید. به‌طوری که راندمان حذف از ۲۹/۲۲ درصد در ساعت اول به ۱۰ درصد در ساعت هشتم کاهش یافت که در این حالت نیز دبی خروجی از ۳/۲ لیتر در دقیقه در ساعت اول به ۲ لیتر در دقیقه در ساعت سوم رسید. در تحقیقی مشابه توسط کریستین و همکاران، راندمان حذف COD از فاضلاب صنایع نساجی به‌وسیله پایلوت نانوفیلتراسیون بررسی گردید و نشان داده شد که راندمان حذف COD برابر با ۸۷ درصد است. در این مطالعه فلاکس جریان عبوری برای فاضلابهای مختلف از  $30/5 \text{ L/h.m}^2$  تا ۷۰ متغیر بود و پدیده گرفتگی نیز به‌علت تجمع ذرات مولکولی در سطح غشا مشاهده گردید [۷].

### ۳-۲- تأثیر تغییرات زمان بر راندمان حذف بار آلودگی در سیستم هیبریدی

در این فاز از دستگاه نانوفیلتر با میکروفیلترهای کربن فعال استفاده شد. در هر مرحله بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در فشار ثابت ۵ بار از دستگاه عبور داده شد و در زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ ساعت از زمان شروع به کار سیستم، نمونه‌برداری انجام گردید. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، راندمان حذف بار آلودگی در ساعت اول برابر با ۹۳ درصد و دبی خروجی برابر با ۳/۹ لیتر در دقیقه بود و روندی رو به رشد را تا ساعت پنجم طی نمود و به بیشترین میزان خود برابر ۹۹ درصد رسید. دبی خروجی نیز در این ساعت برابر ۴/۶ لیتر در دقیقه بود. در ساعت ششم، دبی خروجی به

جدول ۳- محل و زمان نمونه برداری از هر سیستم

سیستم	نوع نمونه	محل نمونه برداری	زمان نمونه برداری
نانوفیلتراسیون	ورودی	داخل مخزن خوراک ورودی	پس از پر کردن مخزن
	خروجی	جریان آب تصفیه شده خروجی از فیلتر نانو	ساعت کاری ۱ تا ۸ یک ساعت به یک ساعت
جذب سطحی	خروجی	جریان فاضلاب خروجی از فیلتر نانو	یک نمونه بعد از ۸ ساعت
	ورودی	فاضلاب ورودی	قبل از افزودن کربن فعال در زمان صفر
	خروجی	فاضلاب مخلوط شده با کربن بعد از زمان تماس مناسب	ساعت کاری ۱ تا ۸ یک ساعت به یک ساعت - بعد از ۲ ساعت

جدول ۴- تأثیر زمان بر راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD در سیستم نانوفیلتراسیون

زمان نمونه برداری (ساعت)	COD معادل ۱۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)		COD معادل ۲۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)		COD معادل ۳۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)	
	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)
۱	۶۸/۴۳	۳/۵	۵۰	۳/۵	۲۹/۲۲	۳/۲
۲	۷۵/۲۴	۳/۶	۳۳/۳۴	۳/۳	۲۹/۴۱	۳/۳
۳	۸۷/۳۴	۳/۹	۲۵	۳/۱	۲۳/۵۲	۳/۱
۴	۷۰	۳/۵	۱۲/۳۴	۲/۸	۱۷/۶	۲/۸
۵	۵۱/۸	۳/۴	۵/۳	۲/۶	۱۷/۶	۲/۸
۶	۲۶/۵۶	۲/۷	۵	۲/۵	۱۵	۲/۵
۷	۲۷/۷۱	۲/۹	۴/۴	۲/۳	۱۲	۲/۲
۸	۲۷/۹۵	۳	۴	۲/۲	۱۰	۲

جدول ۵- تأثیر زمان بر راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD در سیستم هیبریدی

زمان نمونه برداری (ساعت)	COD معادل ۱۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)		COD معادل ۲۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)		COD معادل ۳۰۰۰ (میلی گرم در لیتر)	
	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)	درصد حذف (درصد)	دبی خروجی (L/min)
۱	۹۳	۳/۹	۹۱/۵۸	۳/۱	۸۸/۷	۲/۷
۲	۹۵/۳۳	۴/۲	۹۵/۱۷	۳/۵	۹۱/۱۳	۲/۹
۳	۹۶	۴/۳	۹۵/۸۶	۳/۷	۹۲/۱۸	۳/۲
۴	۹۸	۴/۴	۹۴/۹	۳/۴	۹۲/۹۳	۳/۴
۵	۹۹	۴/۶	۹۴/۸	۳/۴	۹۱/۱۳	۲/۹
۶	۹۵/۳۳	۴/۲	۹۴/۵۸	۳/۲	۹۱/۴۳	۳
۷	۹۶	۴/۳	۹۴/۶	۳/۲	۹۱/۸۲	۳/۱
۸	۹۶/۷	۴/۳	۹۴/۷	۳/۳	۹۲/۲۵	۳/۳

خروجی ۳/۱ لیتر در دقیقه بود و در ساعت سوم به ۹۵/۸۶ درصد و دبی خروجی ۳/۷ لیتر در دقیقه رسید. با گذشت زمان در ساعت چهارم، دبی خروجی به دلیل وقوع گرفتگی به ۳/۴ لیتر در دقیقه رسید و در نتیجه راندمان حذف به ۹۴/۹ درصد کاهش یافت.

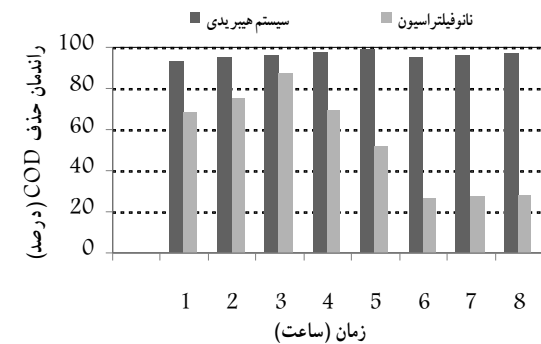
۴/۲ لیتر در دقیقه کاهش یافت و راندمان حذف به ۹۵/۳۳ درصد رسید که نشان دهنده وقوع پدیده گرفتگی در غشا بود. راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در ساعت اول برابر با ۹۱/۵۸ درصد و دبی

راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در ساعت اول برابر با ۸۸/۷ درصد و دبی خروجی برابر ۲/۷ لیتر در دقیقه بود. این میزان در ساعت چهارم به حداکثر خود یعنی ۹۲/۹۳ درصد رسید و دبی خروجی برابر ۳/۴ لیتر در دقیقه بود. در اینجا نیز در ساعت پنجم دبی خروجی به ۲/۹ لیتر در دقیقه کاهش یافت که بیانگر وقوع گرفتگی در غشا و کاهش راندمان حذف به ۹۱/۱۳ درصد بود.

در مطالعه مشابهی که بر روی بررسی کارایی سیستم هیبریدی نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در حذف رنگ در صنایع نساجی صورت گرفت، نشان داده شده است که راندمان حذف COD پس از عبور فاضلاب از سیستم بیش از ۹۹ درصد است و غلظت رنگ باقی مانده به کمتر از ۱ ppm می‌رسد [۹].

۳-۳- مقایسه عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون با سیستم هیبریدی نانوفیلتراسیون و جذب سطحی در حذف بار آلودگی  
نتایج به دست آمده نشان داد که راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۲۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در سیستم هیبریدی بیشتر از سیستم نانوفیلتراسیون است.

شکل ۲ مقایسه راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر را در دو سیستم نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در تمام مدت کارکرد سیستم هیبریدی، راندمان حذف بالاتر بوده و بیشترین راندمان حذف در ساعت پنجم و برابر ۹۹ درصد بود. در حالی که بیشترین راندمان حذف در سیستم نانوفیلتراسیون در ساعت سوم و برابر با ۸۷/۳۴ درصد بود.

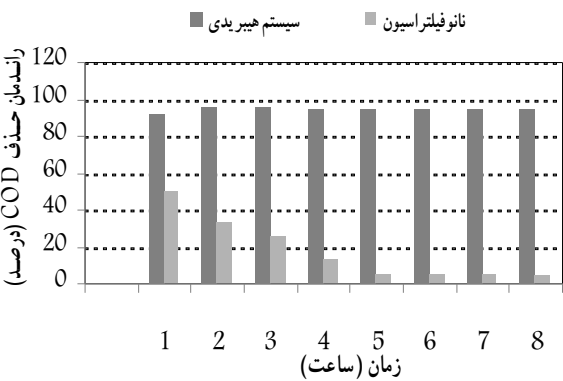


شکل ۲- مقایسه سیستم نانوفیلتراسیون با سیستم هیبریدی در راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر

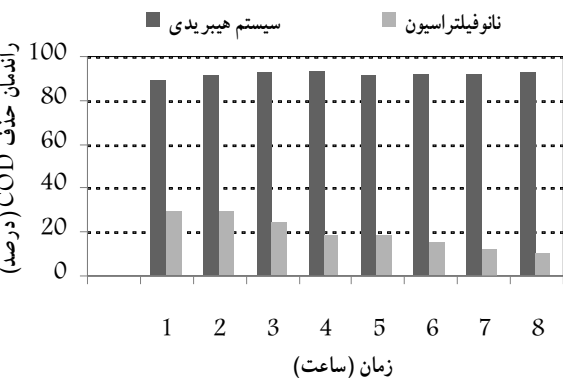
در ارتباط با راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل با ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز بیشترین راندمان حذف در سیستم هیبریدی بعد از ۳ ساعت و برابر با ۹۵/۸۶ درصد و در سیستم نانوفیلتراسیون در ساعت اول و برابر با ۵۰ درصد به دست آمد (شکل ۳).

مقایسه راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در دو سیستم نشان داد که بیشترین راندمان حذف در سیستم هیبریدی در ساعت چهارم و برابر با ۹۲/۹۳ درصد و در سیستم نانوفیلتراسیون در ساعت دوم و برابر با ۲۹/۴۱ درصد بود (شکل ۴).

در هنگام استفاده از سیستم هیبریدی، راندمان حذف بار آلودگی بیشتر از هنگامی است که از سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی استفاده می‌گردد. همچنین در سیستم هیبریدی بعد از گذشت زمان بیشتری از شروع به کار دستگاه، گرفتگی اتفاق می‌افتد. البته این مقدار گرفتگی بسیار جزئی بوده و به‌طور واضحی کمتر از میزان گرفتگی در سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی است. به‌طور کلی می‌توان گفت سیستم هیبریدی هم بر روی افزایش راندمان حذف بار آلودگی و هم بر روی به تأخیر انداختن زمان وقوع گرفتگی مؤثر است و میزان گرفتگی را به حداقل می‌رساند. این امر به‌علت هیبرید نانوفیلتراسیون و جذب سطحی است که سبب می‌گردد پدیده گرفتگی کاهش پیدا کرده و راندمان سیستم افزایش یابد.



شکل ۴- مقایسه سیستم نانوفیلتراسیون با سیستم هیبریدی در راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر



شکل ۳- مقایسه سیستم نانوفیلتراسیون با سیستم هیبریدی در راندمان حذف بار آلودگی بر حسب COD معادل ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر

بر طبق مطالعه مشابهی بر روی سیستم هیبریدی حاصل از ترکیب نانوفیلتراسیون و جذب سطحی، مشخص شده است که ترکیب دو فرایند نانوفیلتراسیون و جذب سطحی به وسیله جاذب پودری، اثرات مثبتی بر کیفیت نفوذ و پرشدگی دارد [۱۰].

#### ۴- نتیجه گیری

۱- راندمان حذف بار آلودگی در سیستم هیبریدی بیشتر از سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی است.

۲- با افزایش بار آلودگی فاضلاب ورودی در هر دو سیستم نانوفیلتراسیون و سیستم هیبریدی، میزان حذف کاهش می یابد. زیرا بر اساس مدل های موجود در مورد عملکرد غشا نانوفیلتراسیون، فلاکس ماده حل شده با گرادیان غلظت در سطح متناسب است. در نتیجه با افزایش بار آلودگی ورودی، بار آلودگی در سطح غشا افزایش یافته و احتمال انباشت آلودگی نیز بالاتر می رود و در نتیجه

مقدار بیشتری از بار آلودگی از میان غشا نفوذ می کند و حذف کاهش می یابد.

۳- با گذشت زمان، دبی خروجی و راندمان حذف بار آلودگی در هر دو سیستم کاهش می یابد. این امر به علت کاهش دبی خروجی از غشا به سبب وقوع گرفتگی در آن است که در نتیجه راندمان حذف نیز کاهش می یابد.

۴- در سیستم هیبریدی به علت هیبرید نانوفیلتراسیون و جذب سطحی و در نتیجه عملکرد کربن فعال به عنوان جاذب، گرفتگی غشا بعد از گذشت زمان بیشتری از شروع به کار دستگاه اتفاق می افتد که این مقدار گرفتگی نیز بسیار جزئی بوده و کمتر از میزان گرفتگی ایجاد شده در سیستم نانوفیلتراسیون به تنهایی است.

به طور کلی می توان گفت سیستم هیبریدی هم بر روی افزایش راندمان حذف بار آلودگی و هم بر روی به تأخیر انداختن زمان وقوع گرفتگی مؤثر است و میزان گرفتگی را به حداقل می رساند.

#### ۵- مراجع

- 1- Torabian, A., Shokuhi, M., and Ghadimkhani, A. (2006). "An investigation on nitrate removal mechanism from drinking water by nanofiltration in different operational pressure and water ionic combination." *Nine National Public Health Conf.*, Isfahan, Iran. (In Persian)
- 2- Mesdaghinia, A., Farokhi, M., Naseri, S., and Yazdan Bakhsh, A. (2004). "Improvement of 2-4-6 trichlorophenol biodegradation by fenton process." *J. of Hakim*, 7, 33-40. (In Persian)
- 3- Rashidi Mehrabadi, A., Akbari, H., and Torabian, A. (2006). "A study of nanofiltration in Arsenic removal from drinking water." *First Professional Environmental Eng. Conf.*, Tehran, Iran. (In Persian)
- 4- Madaeni, S. (2002). *Membranes and membrane process.*, 1<sup>st</sup> Ed., Taghbostan Pub., Razi University, Kermanshah. (In Persian)
- 5- Torabian, A., Shokuhi Harandi, M., Nabi Bidhendi, Gh., Ghadimkhani, A., and Safaifar, M. (2006). "Nitrate removal from drinking water by nanofiltration in different operational situation." *J. of Water and Wastewater*, 61, 51-61. (In Persian)
- 6- Torabian, A., Nabi Bidhendi, Gh., Ghadimkhani, A., and Etemadi, M. (2008). "Peroxidation effects on total organic carbon removal by nanofiltration." *J. of Water and Wastewater*, 68, 19-24. (In Persian)
- 7- Cristiane, N.L., Carlos, C., and Humberto, G. (2005). "Color and COD retention by nanofiltration membranes." *Desalination*, 172, 77-83.
- 8- APHA., AWWA., and WPCF. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18<sup>th</sup> Ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington D.C.
- 9- Chakraborty, S., Basu, J. K., and DasGupta, S. (2005). "Treatment of a textile effluent: Application of a combination method involving adsorption and nanofiltration." *Desalination*, 174, 73-85.
- 10- Johannes, M., Thomas, M., and Ludger, H. (2002). "Nanofiltration and adsorption on powdered adsorbent as process combination for the treatment of severely contaminated wastewater." *Desalination*, 147, 361-366.