

Investigation of Submerged Membrane Reactor in Removal of Water Turbidity Using Poly-Aluminum Chloride Coagulant with Coagulation Aids of Polyelectrolyte and Lime

F. Hashemzadeh¹, A. H. Hassani², A. Torabiyani³, S. M. Borgheie⁴, A. H. Hamsee⁵

1. PhD Student in Environmental Engineering (Water and Wastewater), Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Prof., Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding Author) amirhesamhassani7@gmail.com

3. Prof., Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

4. Prof., Dept. of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

5. Prof., Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received Nov. 29, 2020 Accepted Apr. 21, 2021)

To cite this article:

Hashemzadeh, F., Hassani, A. H., Torabiyani, A., Borgheie, S. M., Hamsee, A. H. 2021. "Investigation of submerged membrane reactor in removal of water turbidity using poly-aluminum chloride coagulant with coagulation aids of polyelectrolyte and lime"
Journal of Water and Wastewater, 32(4), 93-107. Doi: 10.22093/wwj.2021.259574.3084. (In Persian)

Abstract

In recent years, the development of submerged membrane systems has led to the significant development of ultrafiltration/water purification markets. The study aimed to investigate the efficiency of Poly-Aluminum Chloride coagulant in removing turbidity using a submerged membrane reactor for simultaneous coagulation and flocculation of filtration and determine the optimal values of its performance parameters. In this study, the Poly-Aluminum Chloride coagulant along with lime and polyelectrolyte for water coagulation and flocculation was firstly evaluated by the Jar test in different turbidities. Also, pH (5-10), Poly-Aluminum Chloride (1-50 mg/L), and coagulant aids of lime (0.5-15 mg/L) and polyelectrolyte (0.1 to 2 mg/L) were examined. Then, a pilot-scale submerged membrane reactor was designed for coagulation, flocculation, and membrane filtration processes. Pilot experiments were used as closed systems, and then different parameters of flux, aluminum concentration in the treated water, and

membrane fouling were investigated. Jar test results showed that Poly-Aluminum Chloride had a great performance in removing turbidity. In addition, the use of lime and polyelectrolyte coagulant aids improved the turbidity removal process by 3%. Furthermore, pH=8 was selected as the optimal range, and the best flux performance was obtained at turbidity less than 100NTU in a submerged membrane pilot. The flux reduction in eight hours of operation time was only 5% while this increased to 50% in turbidity above 200NTU. The turbidity removal percentages were reported to be constant and higher than 99.5%. The removal rate of total aluminum by the membrane process has been over 99%, and the type of membrane fouling is surface sediment and is reversible. Results indicated that the submerged membrane reactor along with coagulation and flocculation could be applied as an efficient method in water treatment with different turbidity.

Keywords: Coagulation and Flocculation, Water Treatment, Turbidity, Ultrafiltration, Membrane.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۴، صفحه: ۹۳-۱۰۷

بررسی کارایی پایلوت مستغرق غشایی (MSR) در حذف کدورت از آب با استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به همراه کمک منعقدکننده‌های پلی الکترولیت و آهک

فرزاد هاشم‌زاده^۱، امیرحسام حسنی^۲، علی ترابیان^۳، سید مهدی برقی^۴، امیرهومن حمصی^۵

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، گرایش آب و فاضلاب، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
- ۲- استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) amirhesamhassani7@gmail.com
- ۳- استاد، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۴- استاد، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی شریف تهران، ایران
- ۵- استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۹/۹/۹ پذیرش ۱۴۰۰/۲/۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

هاشم‌زاده، ف.، حسنی، ا.ح.، ترابیان، ع.، برقی، س.م.، حمصی، ا.ه.، ۱۴۰۰. "بررسی کارایی پایلوت مستغرق غشایی (MSR) در حذف کدورت از آب با استفاده از منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به همراه کمک منعقدکننده‌های پلی الکترولیت و آهک" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۴)، ۹۳-۱۰۷.

Doi: 10.22093/wwj.2021.259574.3084

چکیده

در سال‌های اخیر توسعه سیستم‌های غشایی غوطه‌ور منجر به توسعه درخور توجه بازار اولترافیلتراسیون/تصفیه آب شده است. هدف از این پژوهش بررسی کارایی تصفیه آب‌ها با کدورت‌های مختلف با استفاده از پایلوت مستغرق غشایی به منظور انعقاد و لخته‌سازی فیلتراسیون هم‌زمان و تعیین مقدار بهینه پارامترهای عملکردی آن بود. در این پژوهش برای تصفیه آب با کدورت‌های مختلف در ابتدا آزمون جارست به بررسی منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به همراه آهک و پلی الکترولیت برای انعقاد و لخته‌سازی در هر کدورت پرداخته شد. پارامترهای pH معادل ۵ تا ۱۰، پلی آلومینیوم کلراید ۱ تا ۵۰ میلی گرم در لیتر و کمک منعقدکننده‌های آهک ۰/۵ تا ۱۵ میلی گرم در لیتر و پلی الکترولیت ۰/۱ تا ۲ میلی گرم در لیتر بررسی شدند. در مرحله بعد پایلوت مستغرق غشایی برای انعقاد و لخته‌سازی و فیلتراسیون غشایی طراحی شد. آزمایش‌های پایلوت به صورت سیستم بسته بهره‌برداری شد و پارامترهای شار جریان، میزان آلومینیوم در آب تصفیه شده، نحوه گرفتگی غشاها در تصفیه آب بررسی شدند. نتایج آزمایش جارست نشان داد پلی آلومینیوم کلراید عملکرد مطلوبی را در حذف کدورت داشته است. همچنین استفاده از آهک و پلی الکترولیت باعث افزایش ۳ درصدی در درصد‌های حذف شده‌اند. pH برابر ۸ نیز به عنوان pH بهینه انتخاب شد. پایلوت مستغرق غشایی در کدورت‌های کمتر از ۱۰۰ NTU بهترین عملکرد از نظر شار جریان را داشت. شار جریان در ۸ ساعت زمان بهره‌برداری تنها ۵ درصد کاهش یافت در حالی که در کدورت‌های بالای ۲۰۰ NTU کاهش شار تا ۵۰ درصد نیز گزارش شده است. درصد‌های حذف کدورت ثابت و بیش از ۹۹/۵ درصد، میزان حذف آلومینیوم کل نیز توسط فرایند غشایی بیش از ۹۹ درصد، نوع گرفتگی غشاها از نوع رسوبات سطحی با قابلیت برگشت پذیری بود. این پژوهش نشان داد از پایلوت مستغرق غشایی هم‌زمان با انعقاد و لخته‌سازی می‌توان به عنوان یک روش کارآمد و قابل انعطاف به منظور تصفیه آب با کدورت‌های مختلف استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: انعقاد و لخته‌سازی، تصفیه آب، کدورت، الترافلتراسیون، غشا



۱- مقدمه

آب شهری که آب ورودی با بار آلودگی کمی دارند است، بنابراین می‌توان با شار جریان زیاد و طول عمر غشای طولانی بهره‌برداری شود. کاربرد دوم در بیوراکتورهای غشایی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی است که در تصفیه فاضلاب استفاده می‌شود (Lu et al., 2015).

برای بهبود عملکرد غشاها از نظر گرفتگی و زمان بهره‌برداری و همچنین بهبود کیفیت جریان خروجی، فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی^۸ پیش از ورود جریان به غشاها در نظر گرفته می‌شود (Kirschner et al., 2019).

فرایند انعقاد در تصفیه آب جایگاه ویژه‌ای دارد به طوری که پژوهش‌های زیادی پیرامون نوع ماده منعقدکننده برای حذف کدورت انجام شده است. برای انتخاب منعقدکننده مناسب و همچنین غلظت مناسب آن در فرایندهای تصفیه آب در شرایط مختلف از آزمایش‌های جارست^۹ استفاده می‌شود (Van Reis and Zydney, 2007).

در فرایند زلال‌سازی شیمیایی با فراهم کردن انرژی اختلاط لازم، تنظیم pH محیط، با افزودن ماده یا مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده مناسب مانند منعقدکننده‌های معدنی، کلوروفریک^{۱۰}، پلی‌آلومینیوم کلراید^{۱۱}، پلی‌الکترولیت^{۱۲} و آهک^{۱۳}، به آب خام باعث ناپایدار شدن ذرات کلوییدی خواهد شد. در پی ناپایدار شدن سیستم کلوییدی، این ذرات می‌توانند به هم نزدیک شده و در فرایند لخته‌سازی، مجتمع و درشت شوند و لخته‌هایی را تشکیل دهند که به خاطر افزایش نسبت جرم به حجم، ته‌نشینی و حذف نسبتاً سریع آنها میسر می‌شود (Yong et al., 2019).

بر همین اساس مواد آلی، کدورت و کلوییدهای کوچک در لخته‌های حجم زیادی تجمع می‌یابند و لایه رسوباتی که به راحتی از سطح غشا شسته می‌شوند را تشکیل داده که رسوب‌گذاری غشا تا حد زیادی کاهش می‌یابد (Rekabdar et al., 2014).

با این حال سیستم‌های انعقاد و لخته‌سازی هم‌زمان با فیلتراسیون غشایی فعلی به طور معمول در تصفیه آب خام با

در سال‌های اخیر فناوری‌های غشایی مانند میکروفیلتراسیون^۱، اولترافیلتراسیون^۲، نانوفیلتراسیون^۳ و اسمز معکوس^۴ در فرایندهای تصفیه آب به دلیل هزینه انرژی کم، حذف آلاینده‌های زیاد و نیاز به مساحت کمتر توجه صنعتگران و پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Ang et al., 2015).

اغلب ترکیبات آلاینده تشکیل‌دهنده منابع آبی با کدورت‌های زیاد وزن مولکولی زیادی دارند و به راحتی به وسیله اولترافیلتراسیون جدا می‌شوند، به همین دلیل استفاده از اولترافیلتراسیون غشایی امروزه کاربرد بسیاری پیدا کرده است. فرایندهای اولترافیلتراسیون نه تنها از نظر تصفیه و کیفیت آب عملکرد خوبی دارند، بلکه به عنوان گزینه اصلی در بازچرخانی آب از پساب در مناطقی که دسترسی به آب سطحی سالم ندارند مطرح می‌شوند (Chae et al., 2009).

توسعه غشاها و غوطه‌ور اولترافیلتراسیون از روش‌های مهمی است که پژوهشگران در صنایع و تصفیه آب و فاضلاب در یک دهه اخیر بسیار به آن توجه کرده‌اند. در این سیستم‌ها ماژول‌های غشایی^۵ در داخل مخزن راکتور قرار می‌گیرند. غشاها می‌توانند صفحاتی صاف، لوله‌ای و یا ترکیبی از هر دو باشند. شست‌وشوی معکوس نیز توسط هوادهی سطح غشا و جریان آب برگشتی بوده که این عمل با استفاده از آب تصفیه شده به صورت معکوس به درون غشاها انجام می‌شود و باعث کاهش گرفتگی^۶ روی سطح غشاها می‌شود (Cui et al., 2003).

به طور کلی سیستم‌های غشایی غوطه‌ور به صورت کم فشار و پرفشار بهره‌برداری می‌شوند که هر یک از آنها بر اساس کیفیت و مشخصه‌های هیدرولیکی جریان استفاده می‌شوند (Choksuchart et al., 2002).

کاربردهای مهم فرایندهای غشایی غوطه‌ور^۷ شامل: اول حذف کدورت، باکتری، ویروس و آلودگی‌های مشابه در تصفیه‌خانه‌های

- ¹ Microfiltration
- ² Ultrafiltration
- ³ Nanofiltration
- ⁴ Reverse Osmosis (RO)
- ⁵ Membrane Modules
- ⁶ Fouling
- ⁷ Submerged Membrane

⁸ Coagulation and Flocculation

⁹ Jar Test

¹⁰ Ferric Chloride (FeCl₃)

¹¹ Poly-Aluminum Chloride (PAC)

¹² Polyelectrolyte(PE)

¹³ CaO



با کدورت‌های مختلف با استفاده از پایلوت مستغرق غشایی^۱ بدون استفاده از فشار به منظور انعقاد، لخته‌سازی و فیلتراسیون غشایی هم‌زمان بررسی شد.

۲- روش کار

۲-۱- آزمون جارتست

در این پژوهش برای تصفیه آب با کدورت‌های مختلف ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU در ابتدا توسط آزمون جارتست به بررسی پارامترهای pH بهینه، بهینه منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید و کمک منعقدکننده‌های پلی‌الکترولیت و آهک و نحوه اثر هر کدام در حذف کدورت‌ها پرداخته شد. برای تهیه آب با کدورت‌های مختلف خاک رس را پس از الک کردن در هاون به صورت ذرات ریز در آورده، سپس توسط ترازو با دقت یک هزارم شرکت Sartorius Practum مدل 1S-213 وزن کرده و در آب شهر تهران حل شد و پس از نیم ساعت ته‌نشینی، آب رویی آن به‌عنوان محلول تهیه کدورت‌های مختلف، استفاده شد. از محلول ساخته شده محلول‌های رقیق‌تر کدورت با استفاده از آب مقطر تهیه شد (Tassinari et al., 2015). سپس به هر ۶ بشر دستگاه جارتست ۵۰۰ میلی‌لیتر از نمونه مورد آزمایش با کدورت تعیین شده اضافه شد. پارامترهای pH، مقدار بهینه منعقدکننده و کمک منعقدکننده به‌عنوان پاسخ فرایند سنجش شدند.

در مرحله اول برای تعیین بهینه میزان pH، آزمایش جارتست با کدورت ۱۰ NTU انجام شد. در بشرهای ۱ تا ۶ به ترتیب ۵۰۰ میلی‌لیتر از محلول با کدورت ۱۰ NTU اضافه شد. سپس به‌وسیله دستگاه مولتی‌متر مدل HQ40 شرکت هچ^۲ تنظیم pH به ترتیب ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ انجام شد. ماده منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید با خلوص ۹۹ درصد ساخت کشور چین با غلظت مشخص ۵ میلی‌گرم در لیتر به بشرهای ۱ تا ۶ اضافه شد، سپس نمونه زیر دستگاه جارتست مدل WiseStir JT-M6 شرکت DAIHAN brand مانند شکل ۱ قرار گرفت و عمل اختلاط سریع با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه و به مدت یک دقیقه و اختلاط آرام با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. پس از انجام عمل اختلاط آرام، نمونه برای مدت ۳۰ دقیقه به‌منظور انجام ته‌نشینی در

کدورت‌های کمتر از ۴۰ NTU کاربرد دارند و تصفیه آب با کدورت‌های زیاد با استفاده از انعقاد و لخته‌سازی به‌همراه راکتورهای غشایی غوطه‌ور با فشار کم به‌طور کامل بررسی نشده است (Choksuchart et al., 2002).

علاوه بر این موارد استفاده از تزریق حباب هوا در نزدیکی غشاها باعث افزایش تنش برشی شده و نیاز به انرژی کم می‌شود و تلاطم لازم برای کنترل و از بین بردن ذرات از سطح غشا اثر مثبت خواهد گذاشت (Trinh and Kang, 2011).

این روش اثر مثبت و قابل توجه‌تری را برای افزایش شار نفوذ در مدت طولانی فیلتراسیون نشان می‌دهد.

در همین راستا ساکول و کونیچنی در پژوهشی به بررسی فرایند انعقاد و لخته‌سازی قبل از فیلتراسیون غشایی پرداختند. آنها دریافتند که فرایند انعقاد پیش از فیلتراسیون در احتباس ذرات و آلودگی‌ها در تشکیل سوسپانسیون کلوئیدی کمک کرده است (Sakol and Konieczny, 2004).

گویگی و همکاران نیز به تأثیر انعقاد در فرایند هم‌زمان لخته‌سازی و اولترافیلتراسیون در تصفیه آب‌های سطحی پرداختند. نتایج نشان داد این فرایند می‌تواند در تصفیه آب‌ها با کیفیت کم هم استفاده شود به طوری که میزان آب تصفیه شده و رسوب غشا نسبت به حالت متداول (عدم استفاده از لخته‌سازی) کاهش چشمگیری داشته است. استفاده از انعقاد و لخته‌سازی قبل از اولترافیلتراسیون باعث افزایش کیفیت نفوذ شده و میزان حذف DOM توسط مرحله انعقاد کنترل می‌شود (Guigui et al., 2002).

ژیانگ و همکاران در پژوهشی به بررسی نقش پیش تصفیه انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه آب دریاچه توسط سیستم اولترافیلتراسیون تحت فشار پرداختند. آنها دریافتند که استفاده از فرایند انعقاد و لخته‌سازی به‌عنوان پیش تصفیه، نه تنها آب آشامیدنی با کیفیت خوب از آب با کدورت‌های مختلف به دست می‌آید، بلکه شار جریان نفوذی از غشا تحت فشار در حدود $190 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ تا ۲۰۰ و دوره رسوب‌زدایی شیمیایی غشاها تا حد زیادی طولانی‌تر شده است (Xiangli et al., 2008).

در این پژوهش استفاده از منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید به‌همراه کمک منعقدکننده‌های پلی‌الکترولیت و آهک در تصفیه آب

¹ Membrane Submerged Reactor (MSR)

² Hach



غلظت‌های مختلف آهک ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ mg/L و پلی‌الکترولیت ۱/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲ mg/L تعیین شده است تا از میان آنها کمترین غلظت از ماده کمک منعقدکننده آهک و پلی‌الکترولیت (مقدار بهینه) به منظور حذف کدورت مشخص شود. به این ترتیب هر کدورت ۶ مرحله آزمایش و در مجموع ۳۶ مرحله آزمایش انجام شده است. ابتدا از غلظت ۰/۵ mg/L آهک در حضور غلظت‌های ۱/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ mg/L پلی‌الکترولیت استفاده شد. به همین ترتیب در ۶ مرحله باقی، دیگر غلظت‌های آهک در حضور غلظت‌های تعیین شده پلی‌الکترولیت و پلی‌آلومینیوم کلراید در pH بهینه با هم در آزمایش جارتست ترکیب شده تا بهینه پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه پلی‌الکترولیت و آهک در بیشترین درصد‌های حذف کدورت مشخص شود.

۲-۲- آزمایش‌های پایلوت مستغرق غشایی

پایلوت مستغرق غشایی برای انعقاد و لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلتراسیون غشایی هم‌زمان مطابق جدول ۱ طراحی و توسط شرکت رشاب طرح ساخته شد. غشاهای استفاده شده از جنس پلی‌اتر سولفون^۲ با اندازه منافذ ۰/۰۴ میکرون و شار آب خالص در غشاهای اولترافیلتراسیون استفاده شده برای هر غشا ۲۰ L/m².h ساخت برند رایزینگ‌سان^۳ کشور چین بود. فرایند انعقاد و لخته‌سازی بر اساس بهینه مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده در کدورت‌های مختلف به دست آمده به همراه فیلتراسیون غشایی به صورت سیستم بسته بهره‌برداری شد. پارامترهای شار جریان، درصد حذف کدورت، میزان آلومینیوم در هنگام فرایند انعقاد و لخته‌سازی و آب تصفیه شده خروجی و نوع گرفتگی غشاها در تصفیه آب با کدورت‌های مختلف بررسی شد.

آب با کدورت مشخص بر اساس حجم قسمت غشایی آماده و به درون پایلوت ریخته شد. سپس پمپ هوا روشن و هم‌زمان با اختلاط سریع در پایلوت بهینه پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه پلی‌الکترولیت و آهک متناسب به دست آمده در کدورت مورد نظر آن به آب اضافه شد.

شرایط سکون نگه داشته شد و از هر کدام از بشرها یک نمونه برداشت شد و با استفاده از کدورت‌سنج مدل Turb 355، شرکت WTW، کدورت نمونه اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از نتایج آزمایش انجام شده، برای کدورت ۵۰ NTU نیز تکرار شد. با مشخص کردن pH بهینه در مرحله بعد هدف شناسایی و تعیین بهینه ماده منعقدکننده در کدورت‌های مختلف است. آزمایش‌های جارتست در بازه ۱ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر پلی‌آلومینیوم کلراید در حضور pH بهینه به دست آمده برای کدورت‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU مطابق روش ذکر شده انجام شد تا بهینه میزان پلی‌آلومینیوم کلراید برای کدورت‌های ذکر شده تعیین شود. برای تعیین نحوه اثر کمک منعقدکننده پلی‌الکترولیت کاتیونی با خلوص بیش از ۹۹ درصد شرکت تیانون^۱ کشور چین و بررسی نحوه تأثیر آن در درصد‌های حذف کدورت در حضور بهینه پلی‌آلومینیوم کلراید و pH بهینه در دو کدورت ۵۰ و ۱۰۰ NTU آزمایش جارتست با غلظت‌های ۱/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۲ mg/L پلی‌الکترولیت ادامه یافت. در آخرین مرحله از آزمایش‌های جارتست به بررسی کمک منعقدکننده آهک پرداخته شده است. با به دست آمدن pH بهینه و بهینه پلی‌آلومینیوم کلراید در کدورت‌های مختلف از آزمایش‌های جارتست قبلی، اکنون به بررسی اضافه شدن هم‌زمان کمک منعقدکننده‌ها (آهک و پلی‌الکترولیت) در حضور بهینه منعقدکننده اصلی (پلی‌آلومینیوم کلراید) پرداخته شد.



Fig. 1. A view of the Jar test to determine the optimum coagulant in the turbidity of 500 NTU

شکل ۱- نمایی از آزمایش جارتست برای تعیین بهینه ماده منعقدکننده در کدورت ۵۰۰ NTU

¹ Tianrun

² Polyethersulfone (PES)

³ RisingSun Membrane

جدول ۱- مشخصات فنی پایلوت مستغرق غشایی

Table 1. Technical specifications of submerged membrane reactor

Pilot technical specifications		
Dimensions(Cm)	L	78
	W	20
	H	50
	Thickness	0.5
Material	Plexiglass	
Membrane volume(L)	35	
Height (Cm)	7	
Dimensions of membrane plates (Cm)	L	35
	W	25
	Thickness	1
Membrane material	PESU with 0.04 microns of pore size	
Type and number of air blowers	7 deep tubular aerators of large bubbles	
Air supply source	HAILEA ACO-308 air pump model	
Pressure gauge	Vacuum pressure in suction and membrane fouling	

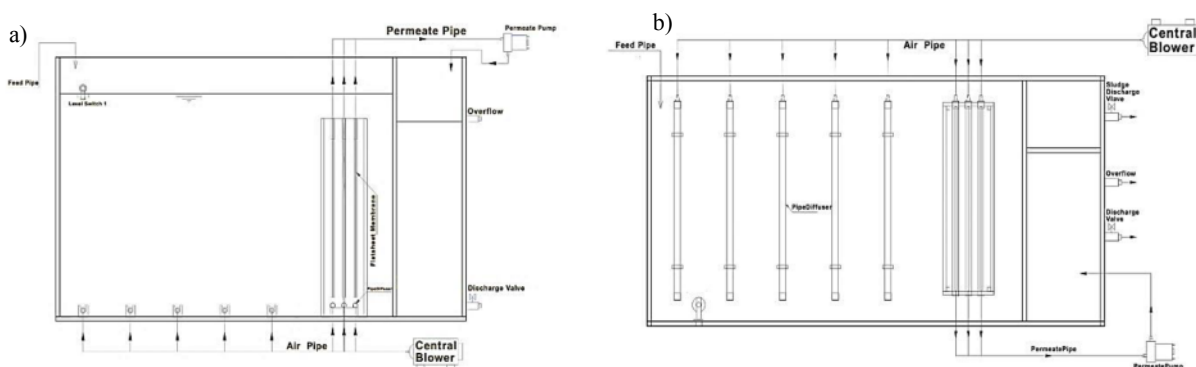


Fig. 2. Schematic of the submerged membrane reactor

a) View from the front of the pilot and b) View from inside the pilot

شکل ۲- شماتیک پایلوت مستغرق غشایی (a) دید از روبه رو پایلوت و (b) دید از داخل پایلوت

میزان گرفتگی غشاهای و پارامترهای مرتبط توسط نمودارهای مقایسه‌ای تعیین و تجزیه و تحلیل شود. شماتیک این پایلوت در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری شار جریان ابتدا با آب مقطر فیلتراسیون غشایی انجام شد، سپس شار جریان در فواصل زمانی مناسب در هر کدورت اندازه‌گیری و طبق معادله ۱ محاسبه شد

$$J = \frac{Q}{A} \tag{1}$$

که در آن

J شار جریان آب تصفیه شده، Q جریان آب خروجی و A سطح مقطع غشاهای است.

در این مرحله ۱ تا ۲ دقیقه مواد موردنظر با آب مخلوط شدند (مرحله اختلاط سریع) تا مواد منعقدکننده با آب به خوبی مخلوط شوند و برهم خوردگی کامل اتفاق بیفتد. سپس مقدار هوا برای مرحله اختلاط آرام توسط شیرهای تنظیم هوا کاهش یافت و به مدت ۱۰ دقیقه مرحله اختلاط آرام ادامه داشت تا فلاک‌های حاصل از مرحله انعقاد تشکیل شده و به آرامی درشت شوند (مرحله اختلاط آرام). در مرحله آخر هوا قطع شده تا میزان کدورت ورودی پس از لخته‌سازی در ورودی به غشاهای مشخص شود.

در مرحله آخر آب توسط ۳ پمپ مکنده تعبیه شده برای هر فلت شیت غشایی در یک جریان ثابت ۱۰۰ میلی لیتر در دقیقه تنظیم شده تا کدورت خروجی نهایی، میزان دبی عبوری از غشا،



۰/۰۰۸ تا ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر را دارد. برای اندازه‌گیری آلومینیوم از روش رقیق‌سازی محلول استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- pH بهینه

نتایج آزمایش جارتست در تعیین pH بهینه در شکل ۳ در دو کدورت ۱۰ و ۵۰ NTU نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در pH برابر ۸ بیشترین درصد حذف کدورت اتفاق افتاد و به عنوان pH بهینه انتخاب شد. در این pH درصد حذف کدورت در کدورت ۱۰ و ۵۰ به ترتیب ۹۰ و ۸۰ درصد بود که بیشترین درصد حذف در بین تمامی pH های مورد آزمایش بود. pH محلول خوراک عامل مهمی است که بر تراوایی از میان غشاهای اولترافیلتراسیون تأثیرگذار است، به خصوص با پلی‌الکترولیت‌ها، برای مثال اسید پلی‌اکریلیک با غشاهای اولترافیلتراسیون اغلب به خوبی در pH حدود ۵ و بیشتر دفع می‌شود، اما از میان همان غشاهای در pH حدود ۳ و کمتر، کاملاً تراواست. این رفتار دفع با تغییر pH به علت تغییر در ساختار پلی‌اسید است (Zhao et al., 2014).

در غشاهای با ساختار پلی‌اتر سولفون به طور معمول در pH های خنثی، غشای اولترافیلتر بهتر عملکرد را دارند که نتایج پژوهش انجام شده نیز بر درستی این مطلب صدق کرده است (Shen et al., 2020).

گوییگی و همکاران به بررسی اثر انعقاد و لخته‌سازی با

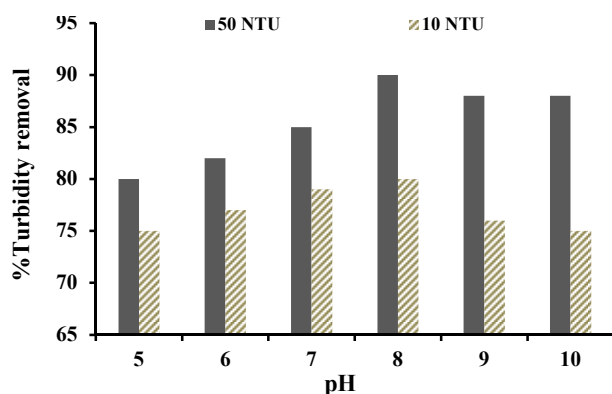


Fig. 3. Determination of optimal pH by Jar test in 10 and 50 NTU Turbidity

شکل ۳- تعیین pH بهینه توسط آزمون جارتست

در کدورت‌های ۱۰ و ۵۰ NTU

برای تعیین منحنی شار جریان بر حسب زمان، اندازه‌گیری شار جریان با فواصل کم بوده و این فواصل به مرور افزایش یافت. پس از ۸ ساعت فیلتراسیون غشایی، پس از قطع کردن جریان فیلتراسیون، اقدام به شست‌وشوی معکوس غشاهای توسط آب تمیز شد. به این ترتیب که در ابتدا روی سطح غشاهای توسط برقراری جریان هوا شسته می‌شود. سپس جهت جریان آب به صورت معکوس وارد شده و توسط آب لوله کشی شهری به مدت ۱ تا ۲ دقیقه برای باز شدن منافذ گرفتگی غشاهای شستشو داده شد. میزان درصد گرفتگی غشاهای از معادله ۲ محاسبه می‌شود

$$\%Fouling = \frac{(J_{initial} - J_{Final})}{J_{initial}} \quad (2)$$

که در آن

$J_{initial}$ بیشترین شار جریان عبوری از غشاهای، J_{final} شار جریان آب تصفیه شده خروجی است.

در نهایت میزان درصد حذف کدورت از معادله ۳ محاسبه شده است

$$\%Removal = \frac{Turb_{initial} - Turb_{final}}{Turb_{initial}} \quad (3)$$

که در آن

$Turb_{initial}$ کدورت جریان انعقاد و لخته‌سازی شده قبل از ورود به غشاهای و $Turb_{final}$ کدورت نهایی جریان در آب فیلتر شده خروجی است.

استفاده از منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید این الزام را برای اندازه‌گیری آن در پایلوت مستغرق غشایی ایجاد می‌کند. غلظت آلومینیوم در آب به میزان بیش از ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر ممکن است یک فاکتور خطر برای ابتلا به بیماری آلزایمر باشد. حداکثر مجاز آلومینیوم در آب آشامیدنی ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر است (Hoekstra et al., 2008).

در پایلوت مستغرق غشایی میزان آلومینیوم کل در فرایند انعقاد و لخته‌سازی (قبل از ورود جریان به غشا) و پس از فرایند فیلتراسیون غشایی توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل DR 6000 ساخت شرکت HACH اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه دستگاه اسپکتروفتومتر ذکر شده توانایی اندازه‌گیری آلومینیوم در محدوده



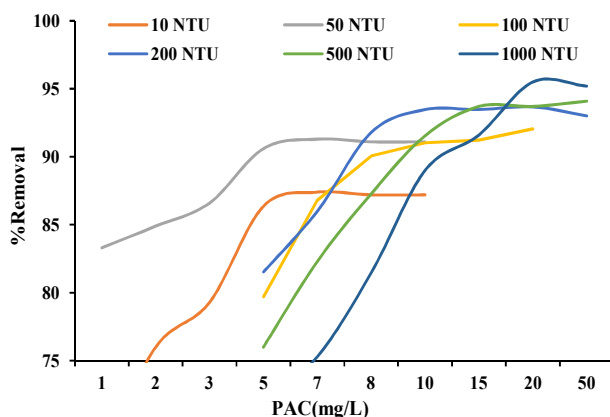


Fig. 4. Results of Jar test for turbidity 10, 50, 100, 200, 500, and 1000 NTU in determining the optimal concentration of PAC coagulant

شکل ۴- نتایج جارتست برای کدورت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU در تعیین غلظت بهینه منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید

حذف در غلظت‌های زیاد پلی‌الکترولیت و آهک رخ داده است. شکل ۵ نمودارهای نتایج درصد حذف کدورت‌های مختلف برای تعیین غلظت بهینه پلی‌الکترولیت و آهک توسط آزمون جارتست را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد آهک و پلی‌الکترولیت باعث افزایش ۱ تا ۳ درصدی حذف کدورت شده‌اند. در کدورت ۱۰۰۰ NTU در حضور پلی‌آلومینیوم کلراید، پلی‌الکترولیت و آهک به ترتیب ۱، ۵۰، ۱۵ میلی‌گرم در لیتر، درصد حذف ۹۹/۵ به دست آمد که در مورد دیگر کدورت‌ها اتفاق نیفتاده است. نتایج آزمون جارتست نشان داد وجود آهک و افزایش میزان آن باعث قلیبایی شدن محیط (رسیدن محیط انعقاد و لخته‌سازی به pH برابر ۸) و به حذف کدورت کمک کرده است. در نتیجه دیگر نیاز به تنظیم pH نبود و خود آهک به عنوان تنظیم‌کننده pH محیط بین ۷/۵ تا ۸ عمل کرده است. نتایج حاصل شده با پژوهش‌های آنهگری و همکاران مطابقت داشته است. آنها در پژوهشی با عنوان بررسی اثر منعقدکننده‌ها بر گرفتگی غشا در فرایند تصفیه پساب پیش از اسمز معکوس پرداختند. در فرایند اسمز معکوس انعقاد از نمک‌های سولفات آلومینیوم، کلرید آلومینیوم، سولفات آهن فرو و کلرید آهن فرو برای تصفیه پساب‌های سنتزی پیش از ورود به غشاها استفاده شد. نتایج نشان داد بهترین عملکرد در فرایند انعقاد مربوط به منعقدکننده‌های آلومینیوم‌دار به همراه آهک در غلظت ۱۰۰ ppm بود که نتایج به دست آمده از این پژوهش را تأیید

پلی‌آلومینیوم کلراید در سیستم‌های غشایی تصفیه آب پرداختند. در آزمایش‌های جارتست بازه pH معادل ۵ تا ۸ را آزمایش کردند که pH برابر ۷/۵ بیشترین درصد حذف با کدورت ۲۴/۵ NTU و DOC ۵۴ میلی‌گرم در لیتر بوده است (Guigui et al., 2002). در پژوهش دیگری ژیانگ لی و همکاران از انعقاد و لخته‌سازی به عنوان پیش تصفیه در آب‌های سطحی استفاده کردند که بهترین pH گزارش شده در حذف کدورت و مواد آلی از آب ۸ بود که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت (Xiangli et al., 2008).

۳-۲- بهینه منعقدکننده اصلی پلی‌آلومینیوم کلراید

شکل ۴ میزان درصد حذف کدورت در غلظت‌های مختلف پلی‌آلومینیوم کلراید در آزمون جارتست را نشان می‌دهد. از شکل ۴ می‌توان دریافت با افزایش میزان کدورت میزان ماده منعقدکننده مصرفی نیز بالطبع افزایش یافته است. بهینه ماده منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید برای کدورت‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU به ترتیب برابر با ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. برای تعیین بهینه ماده منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید تنها عامل درصد حذف در نظر گرفته نشده و عوامل دیگری مانند شکل ظاهری لخته‌های تشکیل شده و میزان ته‌نشینی نیز مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۴ نشان می‌دهد در کدورت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU میزان مصرف ماده منعقدکننده به ۲۰ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر رسیده که دو برابر میزان استفاده شده در کدورت ۲۰۰ NTU بوده است. همچنین افزایش غلظت منعقدکننده باعث افزایش درصد حذف شده به خصوص در کدورت‌های بیش از ۲۰۰ NTU. دلیل این امر را می‌توان به افزایش کدورت و مواد کلوئیدی دانست که طی فرایند انعقاد و لخته‌سازی میزان برخورد ذرات با یکدیگر بیشتر بوده و لخته‌های بیشتر و سنگین‌تری تشکیل شده است (Farahbakhsh et al., 2003).

۳-۳- بهینه پلی‌الکترولیت و آهک به همراه ماده منعقدکننده اصلی پلی‌آلومینیوم کلراید

آزمایش‌های جارتست برای تعیین بهینه میزان پلی‌الکترولیت و آهک با استفاده از بهینه پلی‌آلومینیوم کلراید به دست آمده انجام شد. در جدول ۲ خلاصه نتایج به دست آمده از نتایج آزمایش‌ها، آمده است. طبق پیش‌بینی‌ها با افزایش کدورت بیشترین درصد‌های



جدول ۲- بهینه نتایج آزمایش جار تست برای کدورت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU در

تعیین غلظت بهینه منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه آهک و پلی‌کترولیت

Table 2. Optimal results of Jar test for turbidity 10, 50, 100, 200, 500, and 1000 NTU in determining the optimal concentrations of PAC coagulant with CaO and PE

Turbidity(NTU)	pH	Optimal PAC (mg/L)	Optimal PE(mg/L)	Optimal CaO(mg/L)	%Removal
10	8	5	0.3	1	96.3
50	8	7	0.3	3	95.6
100	8	10	0.5	5	96.7
200	8	15	0.7	5	96.8
500	8	20	1	10	98.4
1000	8	50	1	15	99.5

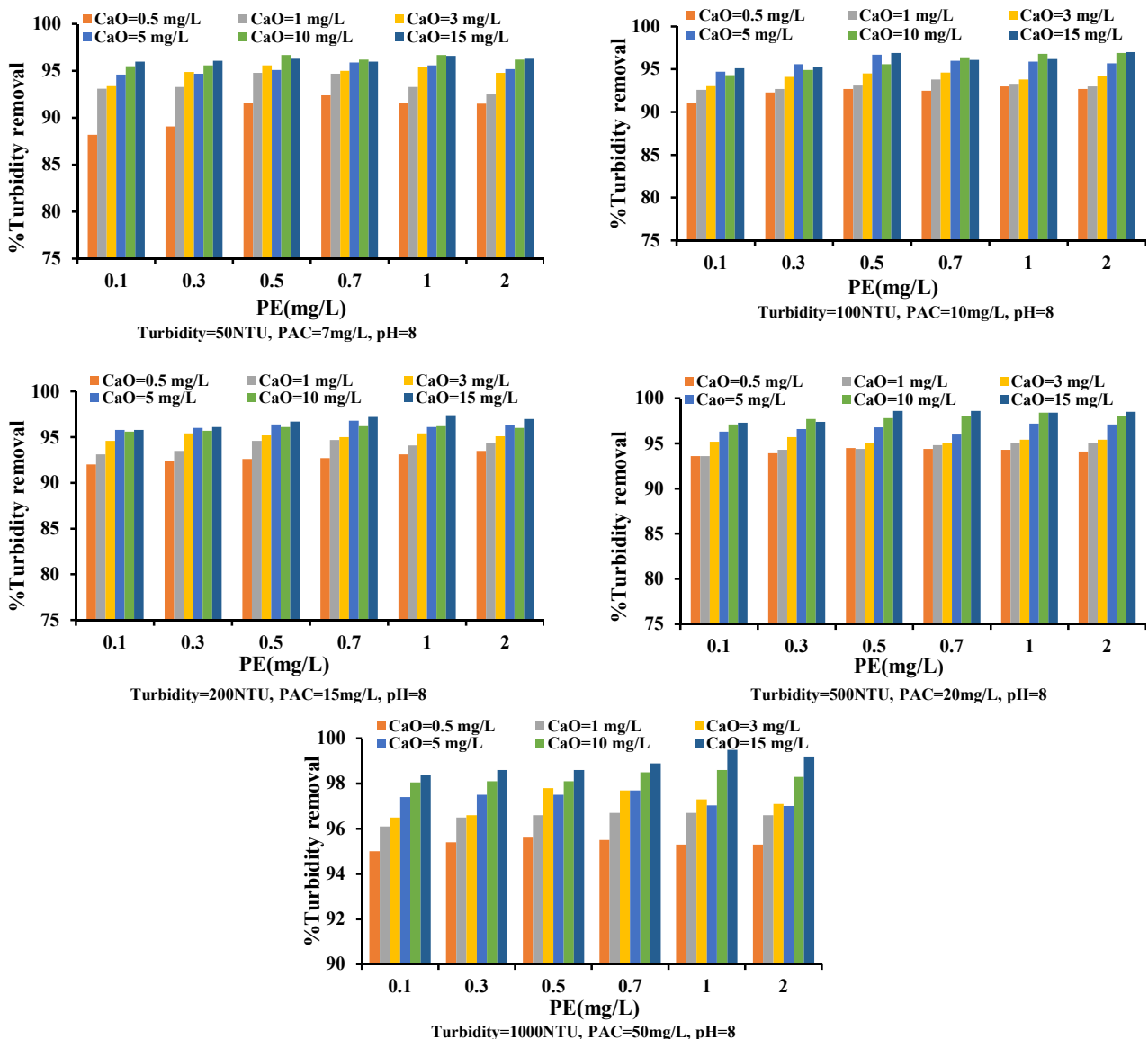


Fig. 5. %Turbidity removal to determine the optimal concentration of PE in the presence of different concentration of CaO, optimal PAC and pH=8

شکل ۵- درصدهای حذف کدورت برای تعیین غلظت بهینه پلی‌کترولیت در حضور غلظت‌های مختلف آهک بهینه‌های پلی‌آلومینیوم کلراید و pH=8



می‌کند (Ahangari et al., 2020).

کاهش شار در مدت زمان موردنظر از کدورت ۱۰۰ NTU شروع به افت کرده به طوری که پس از ۸ ساعت به ترتیب در کدورت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ شار جریان به ترتیب ۴۹ و ۴۲، ۲۰ و ۱۱ درصد کاهش داشته است. همان طور که مشخص است در کدورت‌های ۱۰۰۰ و ۵۰۰ کاهش شار با شیب بیشتر اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده تجمع رسوبات بر روی سطح غشا است. با کاهش شار، فشار خوراک یا نرخ خوراک‌گردشی برای جبران شار پایین افزایش یافته و مساحت سطح بیشتری از غشا استفاده شده است. هنگامی که شار تا مقدار زیادی کاهش یابد، سیستم متوقف شده، غشاها توسط آب و هوا شسته و تمیز می‌شوند و فرایند دوباره آغاز می‌شود. همچنین در آزمایش فیلتراسیون غشایی درصد‌های حذف کدورت نیز ثابت و ۹۹/۵ درصد بوده است.

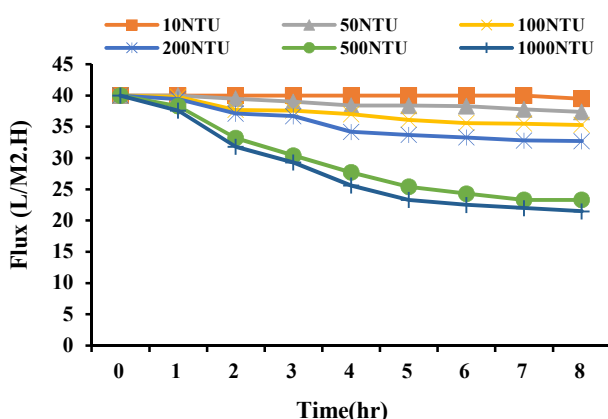


Fig. 6. Flux changes vs. operation time in different turbidities (in the presence of optimal PAC, CaO and PE, pH=8)

شکل ۶- تغییرات شار جریان برحسب زمان کارکرد غشاها در کدورت‌های مختلف (در حضور منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید، آهک و پلی‌کترولیت، pH=۸)

این نتایج با پژوهش‌های زیاده‌کاران با عنوان بررسی تصفیه آب آشامیدنی توسط سیستم اولترافیلتراسیون تحت فشار و کاربرد آن در کشور چین هم‌خوانی دارد. در این پژوهش آب‌های مختلف با مشخصات مختلف توسط الترافیلتراسیون غشایی آزمایش شدند اما پیلوت استفاده شده تحت فشار بوده است. نمودار شار جریان در کدورت‌های ۲۰، ۱۱۰ و ۴۵۰ در زمان ۶۰ دقیقه رسم شد که افت شار به دست آمده با نتایج حاصل از پیلوت مستغرق

همچنین باقرزاده و همکاران در پژوهش دیگر با عنوان بررسی اثر فرایند انعقاد شیمیایی و افزایش آهک بر ارتقای کیفیت پساب خروجی از برکه‌های تثبیت دانشگاه علوم پزشکی کاشان را انجام داده‌اند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر مواد منعقدکننده مختلف و آهک بر بهبود کیفیت پساب خروجی از برکه‌های تثبیت دانشگاه علوم پزشکی کاشان انجام شد. اثر سه نوع ماده منعقدکننده شامل آلوم، سولفات فریک و کلرور فریک به همراه آهک در دوزهای متفاوت بر عواملی همچون کدورت و مواد معلق از طریق آزمایش جار بررسی و آنالیز شد. بیشترین درصد حذف به دست آمده مربوط به آلوم در دوز ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بود که میزان آن ۹۴/۵ درصد برای مواد معلق و ۹۲/۱ درصد برای کدورت بود که با نتایج به دست آمده با پژوهش پیش‌رو هم‌خوانی داشته و منعقدکننده بر پایه آلومینیوم عملکرد مناسبی را داشته است (Neamati et al., 2015).

۳-۴- شار جریان

شار جریان به عنوان عامل بسیار مهم در تعیین وضعیت و نحوه کارکرد غشاها مطرح می‌شود. با به دست آوردن تغییرات شار جریان می‌توان گرفتگی غشاها را پیش‌بینی و زمان شستشوی معکوس غشاها را تخمین زد (Tang et al., 2018).

برای به دست آوردن تغییرات شار جریان در کدورت‌های مختلف، در یک حجم جریان خروجی ثابت (۱۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه برای هر غشا) فرایند فیلتراسیون غشایی را در کدورت‌های مختلف انجام داده و در بازه ۸ ساعته به طور مرتب تغییرات حجم جریان آب خروجی از غشاها اندازه‌گیری شد. شکل ۶ تغییرات شار جریان برحسب زمان کارکرد غشاها در کدورت‌های مختلف با حضور منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه آهک و پلی‌کترولیت را نشان می‌دهد. شکل ۶ نشان داد شار جریان در کدورت‌های ۵۰ و ۱۰۰ طی مدت ۸ ساعت افت ناچیزی داشته و از بیشترین مقدار شار $40 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ به حدود ۳۸ رسیده است که عملکرد خوب فرایند فیلتراسیون غشایی در حذف کدورت‌های پایین در حضور منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه پلی‌کترولیت و آهک است.



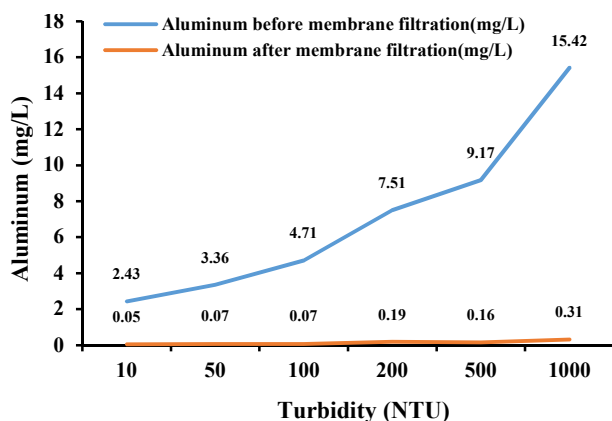


Fig. 7. Changes in the concentration of aluminum in the flocculation stage and after membrane filtration in different turbidities

شکل ۷- تغییرات میزان آلومینیوم در مرحله لخته‌سازی و پس از فیلتراسیون غشایی در کدورت‌های مختلف

می‌شود. این لایه ژل یک سد ثانویه در مقابل جریان عبوری از میان غشاها تشکیل داده و در نتیجه فشار مورد نیاز برای بقای شار افزایش می‌یابد. هنگامی که شار جریان کاهش پیدا کرد غشا مملو از رسوب سطحی در نظر گرفته شد. در این پژوهش شست‌وشوی معکوس غشا با استفاده از هوادهی سطح فلت شیت‌های اولترافیلتراسیون و جریان آب تمیز معکوس شده به مدت ۱ تا ۲ دقیقه انجام شد. همچنین پس از آزمایش در هر کدورت خاص، غشاها از پایلوت خارج و رسوبات سطحی غشا توسط آب شسته شدند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

هنگامی که غشاها برای جداسازی محلول‌های ماکرومولکولی یا کلوییدی ذرات خاک رس استفاده می‌شوند، شار با زمان افت پیدا کرده و در کدورت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ NTU تا حدود $8 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ در مدت زمان ۱۰ ساعت کاهش یافته است. این در حالی است که تا کدورت‌های ۱۰۰۰ NTU افت شار پس از ۱۰ ساعت تنها ۲۰ درصد بوده است.

همان طور که در بخش ۳-۱ اشاره شد، pH محلول از عوامل مهم در گرفتگی غشا اولترافیلتراسیون است. در pH برابر ۸ (بهینه) در اثر فرایند انعقاد و لخته‌سازی فلاک‌های سنگین و درشت ذرات خاک رس به همراه پلی‌آلومینیوم کلراید، پلی‌الکترولیت و آهک تشکیل شده که باعث ایجاد لایه ژل مانند از خاک رس شده روی سطح غشاها شده‌اند. گرفتگی‌های سطحی با تمیزسازی دوره‌ای غشا دفع شده و غشاها تمیز شده دوباره در معرض محلول با

غشایی مشابه است (Xia et al., 2005).

همچنین در پژوهشی دیگر که توسط آنتو و همکاران با عنوان بهینه‌سازی شرایط عملیاتی در یک سیستم اولترافیلتراسیون غشایی انجام شد. آنها عملکرد سیستم اولترافیلتراسیون توسط غشای پلیمری تحت شرایط بهینه را بررسی و میزان TSS، کدورت و TOC را آزمایش کردند. نتایج حذف ۹۸ درصدی کدورت NTU ۹۰ و کاهش شار ۵۶ درصدی در مدت زمان ۴۸۰ دقیقه را نشان داده است که با نتایج به دست آمده از پایلوت مستغرق غشایی هم‌خوانی دارد (Antov et al., 2012).

بایستیستا و همکاران در پژوهش به نقش منعقدکننده‌های طبیعی در حذف کدورت از آب توسط اولترافیلتراسیون مستغرق تحت فشار پرداختند که در این پژوهش در درصد حذف کدورت NTU ۶۸ بیش از ۹۸ درصد و افت شار جریان پس از یک ساعت زمان بهره‌برداری ۵۰ درصد بود. این در حالی است که در پایلوت MSR به دلیل عدم وجود فشار، افت شار در کدورت ۱۰۰۰ NTU به ۵۰ درصد کاهش یافته و زمان افت شار طولانی‌تر شده است (Baptista et al., 2015).

۳-۵- تغییرات آلومینیوم کل خروجی از غشا در کدورت‌های مختلف

در مرحله لخته‌سازی و پس از فیلتراسیون غشایی برای اطمینان از عدم فرار لخته‌ها و غلظت استاندارد، آلومینیوم اندازه‌گیری شد. همان طور که نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد آلومینیوم کل خروجی از غشا برای کدورت‌های مختلف در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. طبق استانداردها میزان آلومینیوم توسط پایلوت مستغرق غشایی به خوبی حذف و به حد مجاز استاندارد رسیده است. تنها در کدورت ۱۰۰۰ NTU آلومینیوم بیشتر از حد مجاز (به میزان ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر) استاندارد بوده است (Federation and Association, 2005).

۳-۶- گرفتگی غشا

در آزمایش‌های انجام شده در پایلوت مستغرق غشایی فشار اولیه وارد شده در امتداد غشاها در زمان‌های اولیه بسیار کوچک و در حد صفر است. با گذشت زمان افت شار به دلیل تشکیل یک لایه ژل مانند رسوب سطحی از حل‌شونده‌های باقیمانده در سطح غشا ایجاد



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نقش منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید به همراه کمک منعقدکننده‌های پلی‌کترولیت و آهک در فرایند انعقاد و لخته‌سازی هم‌زمان با فیلتراسیون مستغرق غشایی در تصفیه آب پرداخته شد.

نتایج آزمایش جار تست نشان داد برای حذف کدورت از آب منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید عملکرد مناسبی را در حذف کدورت به دلیل درصدهای حذف بالا (به تنهایی بیش از ۹۰ درصد)، نوع لخته‌ها و لجن تشکیل شده داشته است. همچنین استفاده از آهک و پلی‌کترولیت باعث افزایش ۳ درصدی در درصدهای حذف شده‌اند.

pH برابر ۸ نیز به عنوان pH بهینه که بیشترین درصد حذف کدورت اتفاق افتاده انتخاب شد. فرایند انعقاد و لخته‌سازی هم‌زمان با فیلتراسیون غشایی در حضور بهینه منعقدکننده و کمک منعقدکننده‌ها در کدورت‌های کمتر از ۱۰۰ NTU بهترین عملکرد از نظر شار جریان را داشته است، به طوری که افت شار در ۸ ساعت زمان بهره‌برداری تنها ۵ درصد کاهش یافته و از $40 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ به $38 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ رسید. این در حالی است که در کدورت‌های بیش از ۲۰۰ NTU کاهش شار تا ۵۰ درصد و به $12/9 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ رسید. با افزایش زمان بهره‌برداری از غشاها درصدهای حذف کدورت ثابت و بیشتر از ۹۹/۵ درصد گزارش شده است.

میزان حذف آلومینیوم نیز توسط فرایند غشایی بیش از ۹۹ درصد بوده است و نوع گرفتگی غشاها از نوع رسوبات سطحی با قابلیت برگشت‌پذیری است. این پژوهش نشان داد از پایلوت مستغرق غشایی هم‌زمان با انعقاد و لخته‌سازی می‌توان به عنوان یک روش کارآمد و قابل‌انعطاف به منظور تصفیه آب‌هایی با کدورت‌های مختلف از منابع آبی استفاده کرد.

۵- قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران برای فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی و حمایت مادی و معنوی شرکت آب و فاضلاب منطقه ۳ استان تهران به منظور اجرای این پژوهش اعلام می‌کنند.

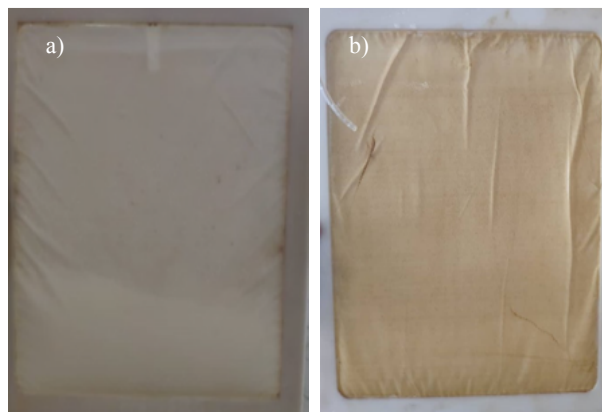


Fig. 8. Ultrafiltration Flat sheet membrane used in MSR Pilot. a) Membrane in clean state, b) Membrane in fouling condition and surface sediments

شکل ۸- نمایی از فلت شیت اولترافیلتر استفاده شده در پایلوت مستغرق غشایی (a) غشا در حالت تمیز، (b) غشا در حالت گرفتگی و رسوبات سطحی

کدورت‌های مختلف قرار گرفت. نکته مهم دیگر نوع و شکل مولکول ذرات خاک رس است که ساختار چندوجهی داشته و مولکول ذرات خاک رس توانایی حرکت مارپیچی از میان حفرات غشا را ندارند. این در حالی است که مولکول ذرات دیگر با ساختار خطی مانند مولکول پلی دکستران با اندازه مشابه از میان حفرات غشا عبور کرده و باعث ایجاد گرفتگی برگشت‌ناپذیر می‌شوند (Shen et al., 2020). بار ذرات عامل مهم دیگری است.

بسیاری از مواد کلوییدی از جمله خاک رس بار منفی دارند که ناشی از گروه‌های کربوکسیل، سولفونیک و یا دیگر گروه‌های اسیدی است. با توجه به اینکه اکثر غشاها بار سطحی منفی دارند، چسبندگی لایه ژل کلوییدی به غشا کاهش می‌یابد که به تداوم فلاکس بالا و پیشگیری از رسوب سطحی غشا کمک می‌کند و بار مثبت بر روی سطح غشا دارای اثرات معکوس است (Wu et al., 2019).

بر این اساس در این پژوهش غشاها پس از شست‌وشوی معکوس در هر کدورت، دوباره آزمایش شدند. عدم کاهش شار ماکسیمم (اولیه) در هر بار آزمایش نشان داد گرفتگی غشاها از نوع رسوبات سطحی بوده و کاهش شار دائمی نبوده است.



References

- Ahangari, H. G., Pourmoghadas, H. & Fahiminia, M. 2020. Optimization of wastewater refinery in Shokoohiyeh industrial city of Qom before entering RO system using chlorophyll, alum and PAC coagulators. *Journal of Water and Wastewater*, 31(1), 76-85. (In Persian)
- Ang, W. L., Mohammad, A. W., Hilal, N. & Leo, C. P. 2015. A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants. *Desalination*, 363, 2-18.
- Antov, M. G., Šćiban, M. B. & Prodanović, J. M. 2012. Evaluation of the efficiency of natural coagulant obtained by ultrafiltration of common bean seed extract in water turbidity removal. *Ecological Engineering*, 49, 48-52.
- Baptista, A. T. A., Coldebella, P. F., Cardines, P. H. F., Gomes, R. G., Vieira, M. F., Bergamasco, R., et al. 2015. Coagulation–flocculation process with ultrafiltered saline extract of *Moringa oleifera* for the treatment of surface water. *Chemical Engineering Journal*, 276, 166-173.
- Chae, S. R., Yamamura, H., Choi, B. & Watanabe, Y. 2009. Fouling characteristics of pressurized and submerged PVDF (polyvinylidene fluoride) microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system under low and high turbidity conditions. *Desalination*, 244, 215-226.
- Choksuchart, P., Héran, M. & Grasmick, A. 2002. Ultrafiltration enhanced by coagulation in an immersed membrane system. *Desalination*, 145, 265-272.
- Cui, Z., Chang, S. & Fane, A. 2003. The use of gas bubbling to enhance membrane processes. *Journal of Membrane Science*, 221(1-2), 1-35
- Farahbakhsh, K., Adham, S. S. & Smith, D. W. 2003. Monitoring the integrity of low-pressure membranes. *Journal-American Water Works Association*, 95, 95-107.
- Federation, W. E. & Association, A. P. H. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.
- Guigui, C., Rouch, J., Durand-Bourlier, L., Bonnelye, V. & Aptel, P. 2002. Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production. *Desalination*, 147, 95-100.
- Hoekstra, E. J., Aertgeerts, R., Bonadonna, L., Cortvriend, J., Drury, D., Goossens, R., et al. 2008. *The advice of the Ad-Hoc working group on sampling and monitoring to the standing committee on drinking water concerning sampling and monitoring for the revision of the council directive 98/83/EC*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR, 23374.
- Kirschner, A. Y., Cheng, Y. H., Paul, D. R., Field, R. W. & Freeman, B. D. 2019. Fouling mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 574, 65-75.
- Lu, D., Zhang, T. & Ma, J. 2015. Ceramic membrane fouling during ultrafiltration of oil/water emulsions: roles played by stabilization surfactants of oil droplets. *Environmental Science and Technology*, 49, 4235-4244.
- Neamati, B., Fadaei, A., Sadighi, M., Sedehi, M. & Mengelizadeh, N. 2015. The study of enhanced coagulation process efficacy and direct filtration's effectiveness on elimination of natural organic materials from surface waters. *Journal of Shahrekord Uuniversity of Medical Sciences*, 17, 66-75.
- Rekabdar, F., Gheshlaghi, A., Hemmati, M., Reyhani, A. & Rajaei, F. 2014. The optimization of operating conditions in a membrane ultrafiltration system using Taguchi approach. *Journal of Petroleum Research*, 24, 108-120.



- Sakol, D. & Konieczny, K. 2004. Application of coagulation and conventional filtration in raw water pretreatment before microfiltration membranes. *Desalination*, 162, 61-73.
- Shen, X., Gao, B., Guo, K. & Yue, Q. 2020. Characterization and influence of floc under different coagulation systems on ultrafiltration membrane fouling. *Chemosphere*, 238, 124659.
- Tang, C. Y., Yang, Z., Guo, H., Wen, J. J., Nghiem, L. D. & Cornelissen, E. 2018. Potable water reuse through advanced membrane technology. *Environmental Science and Technology*, 52, 10215-10223.
- Tassinari, B., Conaghan, S., Freeland, B. & Marison, I. 2015. Application of turbidity meters for the quantitative analysis of flocculation in a jar test apparatus. *Journal of Environmental Engineering*, 141, 04015015.
- Trinh, T. K. & Kang, L. S. 2011. Response surface methodological approach to optimize the coagulation–flocculation process in drinking water treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1126-1135.
- Van Reis, R. & Zydny, A. 2007. Bioprocess membrane technology. *Journal of Membrane Science*, 297, 16-50.
- Wu, Y., Zhang, Z., He, P., Ren, H., Wei, N., Zhang, F., et al. 2019. Membrane fouling in a hybrid process of enhanced coagulation at high coagulant dosage and cross-flow ultrafiltration for deinking wastewater tertiary treatment. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1027-1035.
- Xia, S., Li, X., Liu, R. & Li, G. 2005. Pilot study of drinking water production with ultrafiltration of water from the Songhuajiang River (China). *Desalination*, 179, 369-374.
- Xiangli, Q., Zhenjia, Z., Nongcun, W., Wee, V., Low, M., Loh, C., et al. 2008. Coagulation pretreatment for a large-scale ultrafiltration process treating water from the Taihu River. *Desalination*, 230, 305-313.
- Yong, M., Zhang, Y., Sun, S. & Liu, W. 2019. Properties of polyvinyl chloride (PVC) ultrafiltration membrane improved by lignin: hydrophilicity and antifouling. *Journal of Membrane Science*, 575, 50-59.
- Zhao, S., Huang, G., Cheng, G., Wang, Y. & Fu, H. 2014. Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to reverse osmosis membranes. *Desalination*, 344, 454-462.

