

استفاده از غشاهای نانوفیلتراسیون با هدف حذف فلز سنگین جیوه از آب و بررسی خاصیت آنتی باکتریالی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۴

کد مقاله: ۸۸۳۶۷

صدیقه حاجی زاده^{۱*}، محمدرضا مستعان^۲

چکیده

در این پژوهش غشاهای پلیمری برای حذف جیوه از آب در فرآیند نانوفیلتراسیون مورد مطالعه قرار گرفت. غشای نانوفیلتراسیون توسط پلیمریزاسیون بین سطحی ساخته شد. سپس غشاهای ساخته شده با افزودن متفاوت مقدار نانوکریستال سلولز (CNC) برابر با غلظت‌های ۰، ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی با کدهای (NF، NF0.1، NF0.5 و NF1) مشخص شدند. با استفاده از آنالیز FT-IR صحت ترکیب نانوکریستال سلولز در لایه غشا بررسی شد و مورفولوژی غشاها با استفاده از SEM بررسی شد. نتایج نشان داد که بعد از گذشت زمان ۲۰۰ دقیقه شار عبور آب از غشای NF تقریباً ۲۶۰ L/m².hr و شار عبور آب از غشا NF1 ۱۴۸ L/m².hr می باشد. بالاترین درصد حذف جیوه در pH برابر با ۸ بدست آمد که این مقدار برای غشاهای NF و NF1 به ترتیب ۶۱/۹۲ و ۹۲/۱۴ درصد بدست آمد. بیشترین مقدار حذف جیوه در غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF0.5 برابر ۹۶/۴۵ در زمان ۴۵ دقیقه حاصل شد و کمترین مقدار حذف جیوه برابر ۴۹/۳۳ درصد در غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF بدست آمد. افزایش ویژگی ضد رسوب غشای NF 0.5 می‌تواند از طریق افزایش خاصیت آب دوستی سطح غشای NF 0.5 و یا منفی بودن بار سطح ذرات نانوکریستال سلولز انجام گیرد. غشای NF0.5 می‌تواند حدود ۲۲/۵ درصد مقدار شار آب را در مقایسه با ۷/۵ درصد غشا NF بازیابی کند و این نشانگر عملکرد بالاتر غشای NF0.5 در بهبودی شار آب عبوری از غشا است. با توجه به نتایج تست آنتی‌باکتریالی یک حلقه مهار کننده مهمی در اطراف غشا با غلظت نانوسلولز ۰/۵ درصد تشکیل شده است که نشان می‌دهد این غشای خاصیت ضد باکتری اشریشیا کلی (E.coli) قابل توجهی دارد.

واژگان کلیدی: غشاهای نانوفیلتراسیون، فلز سنگین، جیوه، خاصیت آنتی باکتریالی

۱- گروه زیست شناسی میکروبیولوژی، آزمایشگاه میکروبیولوژی، اداره کل استاندارد بوشهر، بوشهر، ایران (نویسنده مسئول)
Sedegheh.h66@yahoo.com.

۲- اداره کل استاندارد بوشهر، بوشهر، ایران.

۱- مقدمه

با رشد شهرنشینی و صنعتی شدن سریع شهرها، مشکل انتشار فلزات سنگین در اکوسیستم حتی در غلظتهای ناچیز، در بسیاری از نقاط جهان باعث افزایش نگرانی شده است. قوانین سخت‌گیرانه در مورد حضور فلزات سنگین در آب و فاضلاب در بسیاری از کشورها برای کنترل آلودگی آب، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱]. جیوه یک فلز مایع بسیار سمی برای انسان، حیوانات و بسیاری از گیاهان است [۲]. ورود مقادیر بالای آن به بدن انسان موجب سرطان پوست، ریه و مثانه می‌شود [۳-۵]. بسیاری از مناطق کره زمین به این ماده آلوده هستند زیرا جیوه به طور طبیعی در آب و خاک وجود دارد و در اثر فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و معدنکاری نیز به وجود می‌آید [۶]. برای حفاظت در برابر سمیت این ماده، سازمان جهانی بهداشت (WHO)، و بسیاری از مؤسسات قانونگذار بین‌المللی مقدار غلظت ۰/۰۱ میلی‌گرم در لیتر را برای حداکثر مجاز غلظت آرسنیک در آب پیشنهاد دادند [۷]. فرآیندهای غشایی به دلیل داشتن مزایایی نظیر کاهش انرژی مورد نیاز جداسازی و امکان دستیابی به ضریب آلودگی‌زدایی بالا، انتخاب‌پذیری بیشتر در مقایسه با سایر روش‌های جداسازی عدم نیاز به افزودنی‌های خاص، هزینه پایین در فرآیندهای تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین مطرح می‌شوند. یک غشا مانند یک سد فیزیکی گزینش پذیر می‌تواند تعریف شود به طوری که دو فاز را از یکدیگر جدا کرده و تحت تأثیر نیروی محرکه غشایی عبور بعضی از ترکیبات موجود در محلول را از روی سطح غشا محدود می‌کند [۸]. فرآیند نانوفیلتراسیون یک فرآیند بسیار پیچیده بوده و وابسته به میکروهیدرودینامیک و رخدادهای بین سطحی در سطح غشا و درون نانوحفرات غشا است [۸]. در این پژوهش سعی بر استفاده از غشاهای نانوفیلتراسیون با هدف حذف فلز سنگین جیوه از آب و بررسی خاصیت آنتی باکتریالی که مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. غشاهای تهیه شده به وسیله تکنیک‌های مختلف شناسایی مانند طیف سنجی مادون قرمز فوریه، پراش پرتو ایکس و ... مورد بررسی و شناسایی قرار گرفت. در ادامه از این غشاهای نانوفیلتراسیون اصلاح شده با نانوکریستال سلولز برای حذف جیوه در محیط آبی مورد استفاده قرار گرفت.

۲- تجربی

۲-۱- مواد

برای ساخت غشای کامپوزیت از پلیمرهای پلی سولفون Udel P-2700 (پلیمرهای پیشرفته Solvay)، ۱ متیل ۲ پیرولیدون ($NMP > 95\%$)، پلی ونیل پیرولیدین ($PVP > 97\%$) ساخت شرکت سیگما آلدریج، تری مزوتیل کلرید (TMC)، ۹۹ درصد، پیرازین (PIP)، ۹۹ درصد و ان هگزان (۹۹ درصد) از شرکت مرک (Merk) تهیه شد. نانوکریستال سلولز (CNC) ۵ (خلوص بیش از ۹۵ درصد) با ابعاد کمتر از ۴۰ نانومتر از شرکت سیگما آلدریج تهیه شد. برای تهیه محلول جیوه با غلظت‌های متفاوت از نمک نترات جیوه ($Hg(NO_3)_2$) ساخت شرکت مرک (Merk) استفاده شد. همچنین برای تنظیم محیط بازی و اسیدی محلول آبی از هیدرواکسید سدیم (NaOH) و اسید هیدروکلریک (HCl) با خلوص ۹۹ درصد استفاده گردید.

۲-۲- تهیه غشاهای نانوفیلتراسیون

ابتدا مقدار مشخص حلال NMP ($82\% W_t$) درون بشر ریخته شد و بعد مقدار مشخص PVP ($0.5\% W_t$) اضافه شد و با همزن مغناطیسی هم‌زده و بعد روی همزن مغناطیسی قرار داده و آرام آرام پلی سولفون ($17.5\% W_t$) اضافه شد (برای جلوگیری از چسبندگی آرام آرام اضافه می‌کنیم) و در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت روی همزن قرار می‌دهیم تا کامل حل شود و سپس در جایی ساکن قرار داده شد تا حباب‌ها از محلول بتدریج خارج شود. سپس محلول، با استفاده از فیلم کش مخصوص قالب‌گیری، بر روی یک صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر ریخته شد و به سرعت درون حمام انعقاد آبی در دمای اتاق قرار گرفت تا در اثر وارونگی فازی، غشا از صفحه شیشه‌ای جدا شود. سپس غشا به حمام آب دیگری انتقال داده شد، تا هرگونه ماده باقیمانده و ذرات آب آن از بین برود. سپس چند ساعتی درون آب قرار داده و بعد لایه‌های پلی‌امیدی را روی آن می‌نشانیم. محلول آلی TMC با غلظت ۰/۱۵ درصد جرمی در آن هگزان بعد از گذشت ۲۴ ساعت تحت هم‌زدن مغناطیسی تهیه شد. غلظت‌های متفاوت (۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد جرمی) از نانوکریستال سلولز (CNC) را به محلول آلی TMC اضافه می‌گردد و به مدت ۱ ساعت تحت تابش امواج صوتی قرار داده شد. محلول آبی PIP با غلظت ۲ درصد جرمی در آب مقطر بعد از گذشت ۲۴ ساعت تحت

- 1 - N-methyle2Pyrrolidone (NMP)
- 2 - Poly Vinyle Pyrrolidone (PVP)
- 3 - Trimesoyl chloride
- 4 - piperazine
- 5 - Cellulose Nano Crystals (CNC)

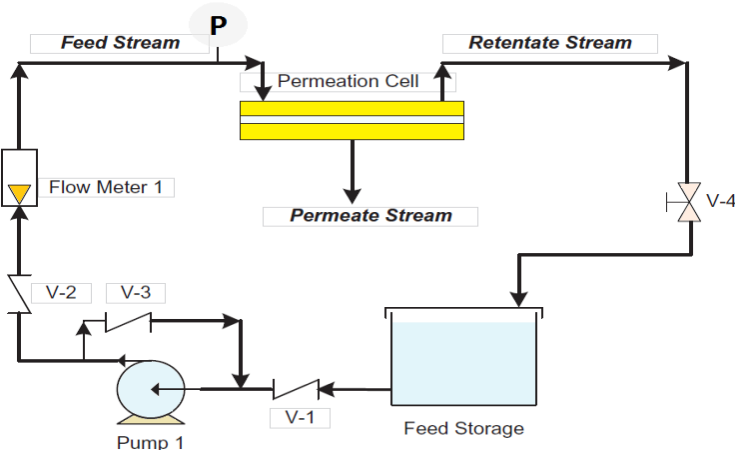
همزدن مغناطیسی تهیه شد. زیرلایه (پلی سولفون) را روی قاب قرار می‌دهیم و ۲۰ سی سی از محلول آبی PIP را به آن اضافه می‌کنیم تا کاملاً در محلول غوطه ور شود. زدودن محلول اضافی بعد از مدت زمان ۲ دقیقه انجام شده و با غلطک صاف شاد. ۲۰ سی سی از محلول آلی TMC با غلظت مشخص از نانوکریستال سلولز (CNC) محلول در آن را به قاب اضافه شد، بعد از مدت زمان یک دقیقه باقیمانده محلول را خالی کرده و غشا را درون آون در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد تا خشک شود. بعد از خشک شدن غشا را در اتانول خالص به مدت ۳ دقیقه قرار می‌دهیم. غشاهای PSF براساس بارگذاری غلظت متفاوت نانو کریستال با کدهای NF، NF0.1، NF0.5، NF1 و نامگذاری شدند.

۳-۲- تعیین ویژگی‌های غشا

طیف سنج ATR-FTIR مدل (UATR, Perkin-Elmer US) به منظور حصول اطمینان از ساختار شیمیایی غشا استفاده شد. طیف در محدوده $4000-500\text{CM}^{-1}$ انجام گرفت. غشاهای نانوفیلتراسیون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و سپس توسط FT-IR مورد آزمایش قرار گرفت. مورفولوژی غشاها با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی نشر میدانی مدل Shimadzu، هیتاچی، ژاپن ارزیابی شدند. در این آزمایش‌ها از زاویه‌یاب (دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس نوری OCA15plus, Germany, DATA Physics) استفاده شد و زاویه قطرات آب با سطح غشا اندازه‌گیری شد. برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری زاویه تماس در ۱۰ نقطه از سطح غشا مورد بررسی قرار گرفت و میانگین آن‌ها به عنوان زاویه تماس با آب گزارش شد.

۴-۲- ارزیابی عملکرد غشای نانوفیلتراسیون

شکل ۲ سیستم نانوفیلتراسیون را برای ارزیابی عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون را نشان می‌دهد. این سیستم شامل، مخزن خوراک، شیر خروجی مخزن، پمپ انتقال سیال، شیر مربوط به جریان برگشتی، دی‌سنج، فشارسنج، سل مخصوص غشا و شیر ورودی به مخزن خوراک می‌باشد. مساحت غشا بکار رفته $14/62$ سانتی‌متر مربع می‌باشد. فرآیند نانوفیلتراسیون در شرایط عملیاتی، فشار ۶ بار، دی ۲ لیتر بر دقیقه و دمای محیط درجه سانتی‌گراد انجام شد.



شکل ۲. نمای از سیستم نانوفیلتراسیون برای ارزیابی عملکرد غشاها.

عملکرد غشاهای ساخته شده برای حذف جیوه از آب توسط سیستم نانوفیلتراسیون اندازه‌گیری شد. ابتدا محلول مادر ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از جیوه با انحلال نمک نیترات جیوه ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$) در آب دوبار تقطیر تهیه شد. سپس از محلول مادر ساخته شده غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر ساخته شد. همچنین pH های محلول آبی کادمیم در ۱۰-۳ تنظیم شد. برای این منظور از NaOH ۰/۱ مولار و HCl ۰/۱ مولار استفاده شد. برای اندازه‌گیری شار عبور آب خالص از غشای نانوفیلتراسیون، آب خالص به مدت ۶۰ دقیقه از غشا عبور داده شد و شار عبوری اندازه‌گیری شد. سپس محلول حاوی نمک جیوه جایگزین آب خالص شد. آزمایش عبور محلول نمک نیترات جیوه ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$) در شرایط مختلف انجام شد. غلظت فلز سنگین جیوه در فاز نفوذکننده توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. لذا برای بدست آوردن شار آب عبوری از غشا نانوفیلتراسیون از معادله (۱) و (۲) استفاده شود [۹].

$$J = \frac{\Delta V}{A_m \cdot \Delta t} \quad (1)$$

$$A = \frac{J}{\Delta P} \quad (2)$$

که در روابط بالا A_m مساحت مؤثر غشا، ΔV حجم آب نفوذ کرده در غشا، Δt زمان و ΔP اختلاف فشار می‌باشد. همچنین برای میزان دفع فلز سنگین (Rejection) از رابطه (۳) استفاده شود [۹].

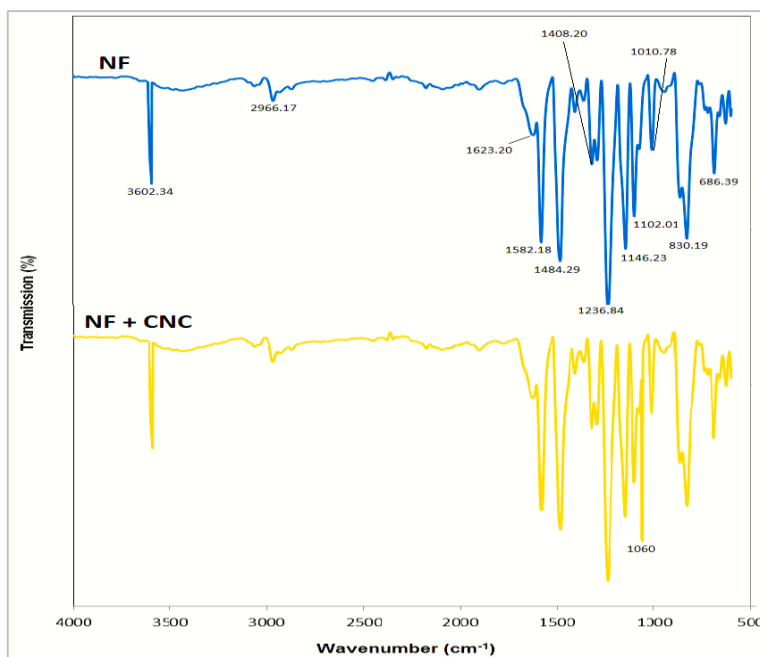
$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (3)$$

که در این رابطه C_p و C_f به ترتیب غلظت فلز سنگین نفوذ کرده و غلظت فلز سنگین در خوراک است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز طیف سنجی FT-IR

شکل ۲۳ طیف FT-IR غشای خالص و غشای نانوکامپوزیت در حضور CNC را نشان می‌دهد. پیک‌های 1150 cm^{-1} مربوط به کشش متقارن O=S=O و 1300 cm^{-1} مربوط به کشش نامتقارن O=S=O و پیک 1530 cm^{-1} مربوط به کشش حلقه آروماتیک C=C که به واسطه گروه‌های پلیمر PSF می‌باشد. پیک بین 3200 و 3600 cm^{-1} به ارتعاشات کششی O-H مربوط می‌شود که نشان دهنده حضور گروه‌های هیدروکسیل است. پیک 2902 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی متقارن C-H است. پیک‌های 1643 و 1431 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کشش O-H که مربوط به جذب آب و ارتعاش کشش CH_2 است. پیک 1060 cm^{-1} بر روی ارتعاشات C-O-C مربوط به باند سلولز است و حضور نانوکریستالهای سلولز را در غشا تایید می‌کند.



شکل ۲. طیف FT-IR غشای NF و غشای NF0.1

۳-۲- آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس (EDX)

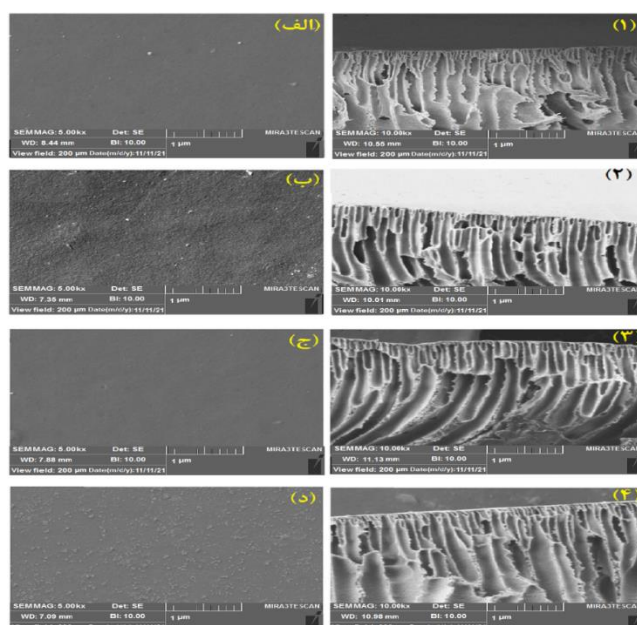
نتایج مربوط به پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) در جدول ۲ نشان داده شده است. طیف EDX از غشای اصلاح نشده نشان دهنده سه قله در اطراف انرژی‌های اتصال است که با اتم‌های کربن (C)، اکسیژن (O) و گوگرد (S)، است. از آنجایی که نانوذرات سلولز نیز از همین عناصر تشکیل شده است، آنالیز طیف‌های غشای نانوکامپوزیت حاصل از پلی سولفون و نانوذرات سلولز درصدی متفاوت از این عناصر را نشان می‌دهد.

جدول ۲: نتایج مربوط به پراش انرژی پرتو ایکس (EDX)

کل	Element(wt%)			غشا
	C	O	S	
۱۰۰	۸۰/۷۷	۱۵/۹۵	۲/۹۵	NF
۱۰۰	۸۱/۲۱	۱۵/۶۹	۳/۱	NF0.1

۳-۳- مورفولوژی و مشاهده غشاها

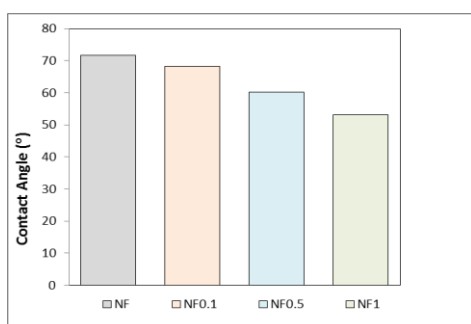
مورفولوژی غشا و نوع اتم‌های روی سطوح زیرلایه و لایه‌ی پوسته‌ای با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی نشر میدانی ارزیابی شدند. تصاویر SEM ساختار مقطع سطح غشاهای ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با اضافه کردن CNC با غلظت‌های مختلف به سطح غشا خالص یک حالت کلوخه‌ای به واسطه وجود نانوذرات ایجاد می‌شود. بعلاوه، وجود لکه‌های سفید رنگ در سطح غشاهای نانوکامپوزیت وجود CNC با غلظت‌های متفاوت در سطح غشا را تایید می‌کند. تجمع این نانوکریستال در سطح غشا موجب مسدود شدن منافذ غشا و کاهش نرخ نفوذ در غشا می‌شود.



شکل ۳. تصاویر SEM سطح بالای غشاها، (الف، ب، ج و د) و مقطع عرضی (۱، ۲، ۳ و ۴) غشا NF، غشا NF0.1، غشا NF0.5 و غشا NF1

۳-۴- زاویه تماس با آب

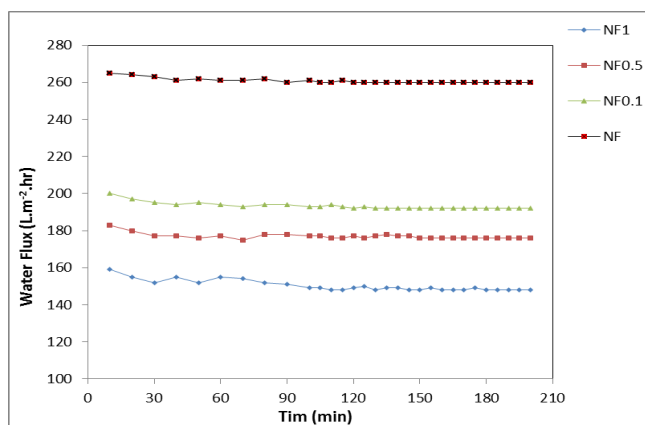
مقادیر زاویه تماس سطح فوقانی غشاها اندازه‌گیری شد و نتایج در شکل ۴ گزارش شده است. با افزودن نانوسلولز با غلظت‌های مختلف به سطح غشاهای نانوکامپوزیت زاویه تماس سطح غشا با آب کاهش یافته است. کاهش زاویه تماس آب به معنی افزایش آب‌دوستی غشای نانوکامپوزیت می‌باشد. دلیل افزایش آب‌دوستی غشای نانوکامپوزیت وجود نانوذرات آب‌دوست CNC در سطح فوقانی و ساختار غشا می‌باشد [۲۳]. همانطور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، زاویه تماس آب با غشا ساخته شده بدون حضور CNC برابر با $72/4^\circ$ بود که با افزودن ۱ درصد وزنی CNC به $53/2^\circ$ کاهش یافت.



شکل ۴. زاویه تماس بین آب و غشاها

۳-۵- نتایج شار آب خالص عبوری از غشاهای نانوفیلتراسیون

شکل ۵ شار عبور جریان آب خالص غشاهای نانوفیلتراسیون بر حسب زمان را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که شار عبور آب خالص (NF) از غشای نانوکامپوزیت با حضور نانوکریستال سلولز بیشتر است. که دلیل می‌تواند حضور نانوکریستال سلولز آب دوست با غلظت‌های متفاوت در سطح غشا خالص (NF) باشد. لذا حضور نانوکریستال سلولز می‌تواند باعث ایجاد حفرات بیشتری بر روی سطح غشاها شود. همانطور که در شکل ۵ مشخص است روند شار عبور آب خالص از غشاها در ابتدا با افزایش زمان کاهش یافته و بعد از مدتی تقریباً ثابت می‌شود. کاهش شار عبور آب در ابتدای فرآیند می‌تواند به دلیل ناپایدار بودن سیستم در زمان‌های ابتدایی فرایند باشد. در انتهای فرآیند نانوفیلتراسیون و بعد از گذشت زمان ۲۰۰ دقیقه شار عبور آب از غشای NF تقریباً $L/m^2 \cdot hr$ ۲۶۰ و شار عبور آب از غشا NF1 $L/m^2 \cdot hr$ ۱۴۸ می‌باشند.

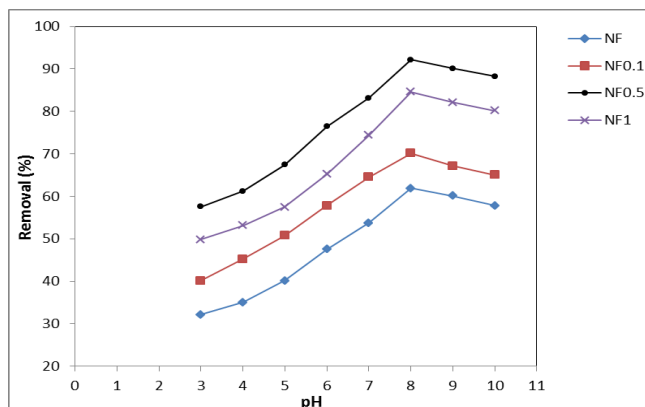


شکل ۵. شار عبور آب خالص از غشاهای نانوفیلتراسیون بر حسب زمان آزمایش

۳-۶- نتایج حذف جیوه با استفاده از غشاهای نانوفیلتراسیون

۳-۶-۱- تأثیر pH

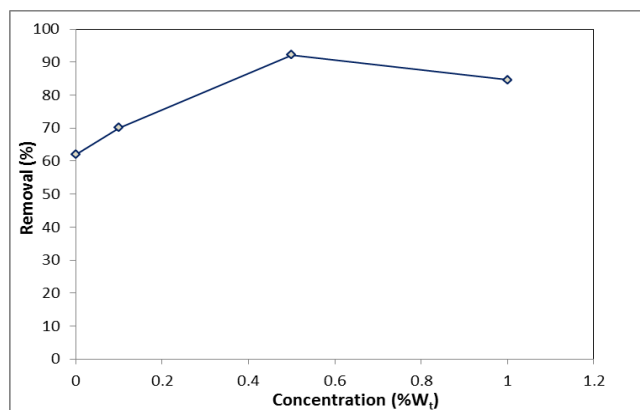
تأثیر pH محلول بر روی میزان حذف جیوه توسط غشاهای نانوفیلتراسیون در شرایط عملیاتی فشار ۶ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، غلظت اولیه جیوه ۵ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش pH از ۲ تا ۸ درصد حذف جیوه با غشاهای متفاوت افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر pH از ۸ تا ۱۰ میزان حذف جیوه با شیب کم روند کاهشی پیدا می‌کند. در pH های بالای ۸ آنیون‌های OH^- محیط افزایش می‌یابند و این امر منجر به رقابت آن‌ها با غشاها در جذب یون‌های جیوه می‌گردد بنابراین، میزان جذب یون‌های جیوه توسط غشاها کاهش می‌یابد. در بازه قلیایی بالاتر از ۸ رسوبدهی نقش بسزایی در حذف یون‌های جیوه ایفا می‌کند. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه در pH برابر با ۸ بدست آمد که این مقدار برای غشاهای NF و NF1 به ترتیب ۶۱/۹۲ و ۹۲/۱۴ درصد بدست آمد.



شکل ۶. اثر pH محلول بر روی درصد حذف جیوه برای غشا متفاوت در شرایط عملیاتی فشار ۶ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، غلظت اولیه جیوه ۵ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

۳-۶-۲- تأثیر غلظت نانوکریستال سلولز

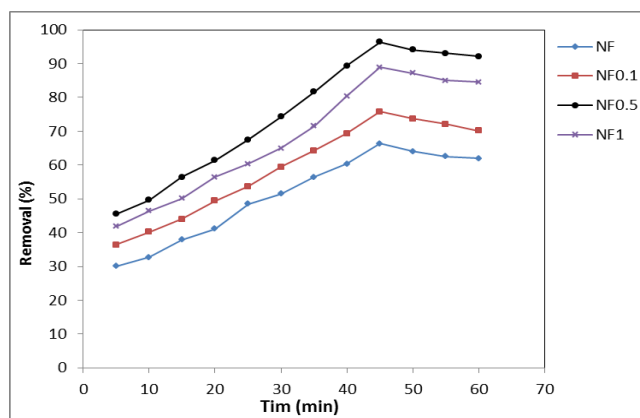
شکل ۷ درصد حذف جیوه برای غشاهای نانوکامپوزیت در غلظت‌های متفاوت نانوسلولز در شرایط عملیاتی فشار ۸ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، pH برابر با ۸، غلظت اولیه کادمیم ۸۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزودن نانوسلولز کریستال به سطح غشاهای نانوفیلتراسیون اثر مثبت بر روی جذب آن‌ها می‌گذارد. این یک پدیده‌ی بسیار معمولی است و برای تمامی نانوذرات غیرآلی مشاهده می‌شود. غشاهای نانوفیلتراسیون با حضور نانوسلولز کریستال جذب مطلوبی دارند، در حالی که این توانایی بالا برای غشای با حضور نانوسلولز با غلظت ۰/۵ درصد وزنی (NF0.5) افزایش می‌یابد که مقدار دفع جیوه تقریباً ۹۳٪ می‌شود. افزودن نانوذرات سلولز، حفره‌های سطحی غشاها را می‌پوشاند. عبور از حفره‌های کوچک برای فلز کادمیم دشوار بوده و به همین دلیل غشاهایی که با نانوسلولز بارگذاری بیشتری شده‌اند دارای جذب قوی‌تری می‌باشند.



شکل ۷. درصد حذف جیوه برای غشاهای نانوکامپوزیت با غلظت‌های متفاوت نانوسلولز در شرایط عملیاتی فشار ۸ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، pH برابر با ۸، غلظت اولیه کادمیم ۸۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

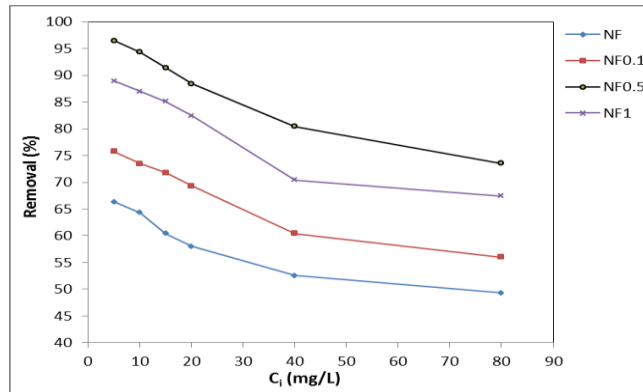
۳-۶-۳- تأثیر زمان

شکل ۸ درصد حذف فلز جیوه در زمان‌های مختلف برای غشاهای متفاوت در شرایط عملیاتی pH برابر با ۸ (بهینه)، فشار ۸ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، غلظت اولیه جیوه ۵ میلی گرم بر لیتر و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان انجام عملیات فرآیند غشایی درصد حذف جیوه با غشاهای مختلف افزایش می‌یابد که البته برای غشا NF0.5 (حضور نانوسلولز کریستال) روند افزایشی در سطح بالاتری قرار دارد. درصد حذف جیوه با گذشت زمان بالای ۴۵ دقیقه روند کاهشی با شیب کند را دارد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه ۹۶/۴۵ در زمان ۴۵ دقیقه برای غشا NF0.5 بدست آمد.



شکل ۸. تغییرات درصد حذف جیوه با گذشت زمان بوسیله غشاهای متفاوت نانوفیلتراسیون شرایط عملیاتی فشار ۶ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، pH برابر با ۸، غلظت اولیه جیوه ۵ میلی گرم بر لیتر و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

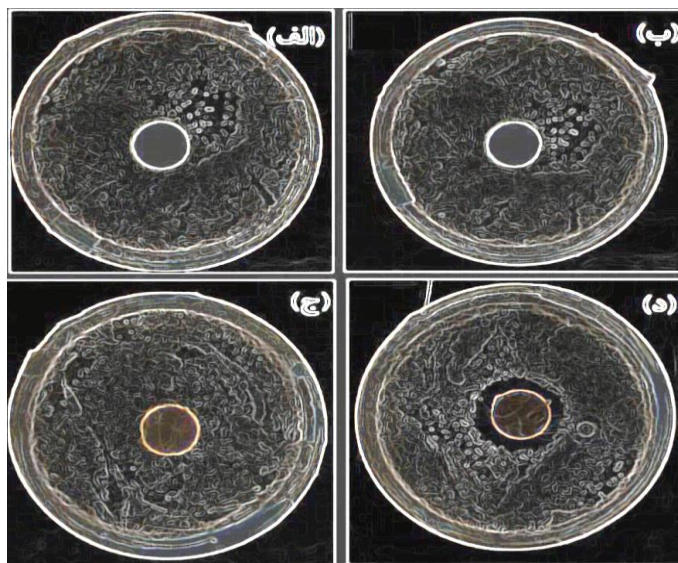
شکل ۹. تغییرات میزان حذف جیوه در غلظت‌های اولیه جیوه بوسیله غشاهای مختلف نانوفیلتراسیون در شرایط عملیاتی pH برابر با ۸، فشار ۸ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اولیه محلول جیوه برای همه غشاهای نانوفیلتراسیون مقدار درصد حذف جیوه روند کاهشی دارد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه به وسیله غشاهای در غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر بدست می‌آید. در این آزمایش‌ها بیشترین مقدار حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF0.5 می‌باشد که این مقدار ۹۶/۴۵ درصد و کمترین مقدار حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF می‌باشد که این مقدار ۴۹/۳۳ درصد بدست آمد.



شکل ۹. تغییرات میزان حذف جیوه در غلظت‌های اولیه جیوه بوسیله غشاهای مختلف نانوفیلتراسیون شرایط عملیاتی فشار ۸ بار، دبی ۲ لیتر بر دقیقه، pH برابر با ۸، زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

۳-۶-۴- بررسی خاصیت آنتی‌باکتریال غشاهای نانوفیلتراسیون

نتایج آزمون آنتی‌باکتریال غشاهای نانوفیلتراسیون ساخته شده در شکل ۱۰ آورده شده است. حلقه واضح و بدون حضور باکتریایی خاصیت ضد باکتری اشیریشیا کلی (E.coli) تأثیر آنتی‌باکتریال غشاهای نانوکامپوزیت را تأیید کرد. باکتری‌های در اطراف غشای NF، NF0.1 و NF1 تقریباً بخوبی رشد کردند، که نشان داد این غشاهای خاصیتی ضدباکتریایی ضعیفی دارند. اما در مقابل، یک حلقه مهارکننده مهمی در اطراف غشای NF0.5 تشکیل شده است که نشان می‌دهد این غشای خاصیت ضد باکتریایی نوع اشیریشیا کلی (E.coli) قابل توجهی دارد.



شکل ۱۴. آنالیز خاصیت آنتی‌باکتریال غشاهای نانوفیلتراسیون، الف) NF، ب) NF0.1، ج) NF1، د) NF0.5

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که روند شار عبور آب خالص از غشاهای نانوفیلتراسیون در ابتدا با افزایش زمان کاهش یافته و بعد از مدتی تقریباً ثابت می‌شود. بعد از گذشت زمان ۲۰۰ دقیقه شار عبور آب از غشای NF تقریباً $260 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ و شار عبور آب از غشا NF1 $148 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ می‌باشند. با افزایش pH از ۲ تا ۸ درصد حذف جیوه با غشاهای متفاوت افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر pH از ۸ تا ۱۰ میزان حذف جیوه با شیب کم روند کاهشی پیدا می‌کند. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه در pH برابر با ۸ بدست آمد که این مقدار برای غشاهای NF و NF1 به ترتیب $61/92$ و $92/14$ درصد بدست آمد. درصد حذف جیوه با گذشت زمان بالای ۴۵ دقیقه روند کاهشی با شیب کم را دارد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه $96/45$ در زمان ۴۵ دقیقه برای غشا NF0.5 بدست آمد با افزایش غلظت اولیه محلول جیوه برای همه غشاهای نانوفیلتراسیون مقدار درصد حذف جیوه روند کاهشی دارد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه به وسیله غشاهای در غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر بدست می‌آید. در این آزمایش‌ها بیشترین مقدار حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۵ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF0.5 می‌باشد که این مقدار $96/45$ درصد و کمترین مقدار حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر با غشای NF می‌باشد که این مقدار $49/33$ درصد بدست آمد. افزایش ویژگی ضد رسوب غشای NF 0.5 می‌تواند از طریق افزایش خاصیت آب‌دوستی سطح غشای NF 0.5 و یا منفی بودن بار سطح ذرات نانوکریستال سلولز انجام گیرد. غشای NF0.5 می‌تواند حدود $22/5$ درصد مقدار شار آب را در مقایسه با $7/5$ درصد غشا NF بازیابی کند و این نشانگر عملکرد بالاتر غشای NF0.5 در بهبودی شار آب عبوری از غشا است.

منابع

- [1] Amarasinghe B, Williams R. (2007). Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chemical Engineering Journal*;132(13):299-309.
- [2] Digital Grafic, La Plata. (2002). "Prospect of rural latin American communities for application of low-cost technologies for water potabilization, OAS Project AE 141/2001, Litter, M.I. (Editor)." <<http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/agua-pura/default.htm>.> (Oct. 2009)
- [3] Tseng, C. H., Chong, C. K., Tseng, C. P. J.A. (2007). "Centeno, blackfoot disease in Taiwan: Its link with inorganic arsenic exposure from drinking water." *Ambio*, 36, 82-84.
- [4] Chen, Y., Hakim, M.E., Parvez, F., Islam, T., Rahman, A.M., and Ahsan, H. (2006). "Arsenic exposure from drinking-water and carotid artery intima-medial thickness in healthy young adults in Bangladesh." *J. Health Popul.*, 24, 253-257.
- [5] Hopenhayn, C. (2006). "Arsenic in drinking water: Impact on human health." *Elem.*, 2, 103-107.
- [6] Lin, Z., Puls, R.W. (2000). "Adsorption, desorption and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging process." *Environ. Geol.*, 39 (7), 753-759.
- [7] World Health Organization. (2004). *Guidelines for drinking water quality*, Vol. 1, Recommendations, 3 rd Ed., Geneva.
- [8] Shafaei, A., (2007). Equilibrium Studies of the Sorption of Hg (II) Ions Onto Chitosan, *Chemical Engineering Journal*, 133(1-3): 311-316.
- [9] A. Rahimpour, M. Jahanshahi, A. Mollahosseini and B. Rajaeian, Structural and performance properties of UV-assisted TiO₂ deposited nano-composite PVDF/SPES membranes, *Desalination*, 2012, 285, 31-38.

