

بررسی تأثیر تغییر فشار در تکمیل تزریقی سدیم هیپوکلریت بر ویژگی‌های مکانیکی و تراوایی غشای الیاف توخالی پلی سولفون

رضا ثقفی*، جواد یکرنگ

گروه مهندسی نساجی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

چکیده: به تازگی عملیات تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت به درون غشاهای توخالی معرفی شده است. در عملیات تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت، محلول سدیم هیپوکلریت توسط یک پمپ با فشاری مشخص و در یک بازه زمانی تعیین شده به درون کانال الیاف توخالی از یک سو تزریق شده و از سوی دیگر خارج می‌شود. نتیجه‌های پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت یک تکمیل نوین و با توانایی بسیار بالا در مقایسه با نوع سنتی آن می‌باشد. در این پژوهش تأثیر تغییرهای فشار اعمالی در تزریق تکمیل سدیم هیپوکلریت در بازه ۱۰-۳۰ psig بر ویژگی‌های مکانیکی، اندازه روزه‌ها و تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی پلی سولفون تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت. برای تخمین اندازه روزه‌های غشاهای الیاف توخالی از روش پردازش تصویرهای عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده شد. نتیجه‌ها بیانگر افزایش محسوس اندازه روزه‌ها و تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی تولید با افزایش فشار تزریق محلول سدیم هیپوکلریت در بازه ۱۰-۳۰ psig می‌باشد. همچنین با افزایش فشار تزریق محلول سدیم هیپوکلریت افت ویژگی‌های مکانیکی غشاهای الیاف توخالی تکمیلی محسوس می‌باشد که این امر به دست آمده از حذف بیش تر پلی وینیل پیرولیدون (PVP) از ماتریس پلیمری غشاهای الیاف توخالی تکمیل شده می‌باشد.

واژگان کلیدی: تکمیل هیپوکلریت، الیاف توخالی، پلی سولفون، فشار تزریقی، تراوایی هیدرولیکی.

KEYWORDS: Hypochlorite treatment, Hollow fibers, Polysulfone (PSf), Injection pressure, Hydraulic permeability.

مقدمه

دیالیز خون هرگونه فراورده‌های انتهایی نیتروژن دار مانند اوره که به دست آمده از سوخت و ساز بدن می‌باشند را از خون فرد بیمار خارج نموده و نمک، آب، اختلال‌های اسیدی به‌وجود آمده از نارسایی کلیه را اصلاح می‌نماید. دیالیز یک درمان شناخته شده برای ده‌ها هزار ناهنجاری به‌وجود آمده از نارسایی کلیه می‌باشد.

امروزه بسیاری از غشاهای مصنوعی در فرایندهای جداسازی گوناگونی همچون تصفیه گازهای طبیعی، اسمز معکوس، میکروصفیه، فراتصفیه، تصفیه آب و انواع دیالیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای غشاهای مصنوعی کاربرد آن‌ها در دیالیز خون (همو دیالیز) می‌باشد.

*E-mail: saghafi@ubonab.ac.ir

* عهده‌دار مکاتبات

قرار دادند. نتیجه این مطالعه نشان داد که در اثر عملیات سفیدگری و شستشو و حذف ذره‌های PVP از ماتریس پلیمری، اندازه روزه‌های غشای الیاف توخالی افزایش می‌یابد [۷]. یانگ و همکاران نیز با بررسی تأثیر عملیات سفیدگری بر الیاف توخالی پلی اتر سولفون دریافتند که عملیات سفیدگری موجب افزایش اندازه روزه‌های و تداخل الیاف می‌شود [۸]. ژانگ و همکاران، تأثیر عملیات سدیم هیپوکلریت بر چگونگی بسته شدن روزه‌های غشای الیاف توخالی پلی سولفون را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که میزان بسته شدن روزه‌های غشاهای تکمیل شده در هنگام فیلتراسیون نسبت به غشاهای تکمیل نشده بیش تر می‌باشد هر چند تجمع ذره‌های مسدود کننده در نزدیک روزه‌ها با سرعت پایین تری صورت می‌گیرد [۹]. ثقفی و همکاران تأثیر مایع منعقد کننده درونی را بر کارایی تکمیل هیپوکلریت غشای الیاف توخالی پلی سولفون مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند کارایی تکمیل سدیم هیپوکلریت در افزایش اندازه روزه‌های و تراوایی غشای الیاف توخالی پلی سولفون تولید شده با مایع منعقد کننده درونی دارای حلال بیش تری از غشای الیاف توخالی تولید شده با مایع درونی بدون حلال می‌باشد [۱۰]. به تازگی نیز عملیات تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت درون غشاهای توخالی توسط ثقفی و همکاران معرفی شده است. در این پژوهش برای اولین بار تکمیل درونی بر روی غشاهای الیاف توخالی صورت پذیرفته است. در عملیات تکمیل هیپو کلریت سنتی غشاهای الیاف توخالی تولید شده در حمامی از یک محلول هیپو کلریت (مانند سدیم هیپوکلریت) قرار می‌گیرند. در عملیات تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت، سدیم محلول هیپوکلریت توسط یک پمپ با فشاری مشخص و در یک بازه زمانی تعیین شده از یک سو به درون کانال الیاف توخالی تزریق شده و از سوی دیگر خارج می‌شود. نتیجه‌های این مطالعه‌ها بیانگر قابلیت بالای این تکمیل در مقایسه با تکمیل‌های سنتی می‌باشد [۱۱، ۱۲].

با توجه به این امر که تکمیل درونی سدیم هیپوکلریت روشی نوین و با توانایی بسیار بالا در مقایسه با روش‌های سنتی می‌باشد، در این مطالعه تأثیر فشار تزریق محلول سدیم هیپوکلریت به درون غشای الیاف توخالی پلی سولفون بر میزان تراوایی هیدرولیکی و اندازه روزه‌های غشا مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور تخمین اندازه روزه‌های غشاها، از روش پردازش تصویر و همچنین روش میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شد. همچنین تأثیر تغییرهای فشار تزریق در تکمیل تزریق درونی سدیم هیپوکلریت بر تراوایی هیدرولیکی و ساختار غشاهای الیاف توخالی مورد بررسی قرار گرفت.

امروزه استفاده از پلیمرهای بشرساخته در ساخت دیالیزرهای مورد استفاده در فرایند همودیالیز بسیار متداول است. بسیاری از این پلیمرها از زیست سازگاری مناسب برای استفاده در فیلتراسیون خون برخوردار نیستند. از این رو استفاده از افزودنی‌های پلیمری با وزن مولکولی بالا مانند پلی وینیل پیرولیدون (PVP) و پلی اتیلن گلیکول (PEG) که باعث بهبود ویژگی‌های آب دوستی و زیست‌سازگاری غشاهای مصرفی در فیلتراسیون خون می‌شوند در بسیاری از پژوهش‌های مورد بررسی قرار گرفته شده است. به کارگیری این پلیمرها برای بهبود ویژگی‌های غشاهای مصرفی در فیلتراسیون خون به علت ایجاد ویژگی‌های دلخواه در غشاهای مصرفی از جمله کاهش جذب سطحی پروتئین‌های خون که باعث بسته شدن روزه‌های غشاهدار پالایش خون می‌شود، امری متداول در تولید غشاهای فیلتراسیون خون با کارایی بالا می‌باشد [۱-۳].

هیگوچی و همکاران مطالعه‌ای را بر روی زیست‌سازگاری غشاهای پلی سولفون در ترکیب با PVP انجام داده‌اند. نتیجه‌های این مطالعه نشان می‌دهد که زنجیرهای جانبی آبدوست طولانی پلی وینیل پیرولیدون موجود بر روی غشاهای پلی سولفون، موجب تغییر ویژگی‌های آب دوستی این غشاها می‌شود [۴]. از سوی دیگر نتیجه‌ها نشان داد که سطوح آبدوست موجب کاهش جذب سطحی پروتئین نیز می‌شوند. همچنین سطح آبدوست غشاهای پلی سولفون که با ترکیب PVP ساخته شده‌اند بدون گروه‌های یونی بوده و این امر مانع از چسبندگی پلاکت‌ها بر روی سطح غشا شده و سازگاری سطح غشاهای پلی سولفون با خون را آسان می‌کند. هایاما و همکاران زیست‌سازگاری غشاهای پلی سولفون ترکیب شده با پلی وینیل پیرولیدون را بررسی کردند [۵]. در این مطالعه برای بررسی زیست‌سازگاری غشاها، عامل‌های ساختاری از جمله میزان زبری سطحی، مساحت سطوح سه بعدی و قطر ذره‌های پلیمری در شرایط تر و خشک توسط میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند غشاهایی که دارای میزان بیش تری از PVP هستند از زیست‌سازگاری بیش تری نیز برخوردار بودند. همچنین پژوهش‌های بسیاری برای بهبود کارایی و افزایش ظرفیت پالایش غشاهای دارای PVP با استفاده از عملیات تکمیل هیپوکلریت صورت پذیرفته است. نتیجه‌های این پژوهش‌ها بیانگر این حقیقت است که با استفاده از تکمیل هیپوکلریت می‌توان ویژگی‌های غشاهای تولیدی را در زمینه‌های گوناگون بهبود بخشید [۶-۱۳]. زینلی و همکاران تأثیر عملیات سفیدگری (سدیم با استفاده از هیپوکلریت) را بر غشای الیاف توخالی تولید شده از ترکیب پلی سولفون و پلی وینیل پیرولیدون مورد مطالعه

بخش تجربی**مواد مورد استفاده**

گرانول پلی سولفون با وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ و پودر پلی وینیل پیرولیدون K90 با وزن مولکولی ۱۰۰۰۰۰۰ به ترتیب از شرکت مواد شیمیایی سیگما آلدریج و شرکت دارویی رهاورد تامین، تهیه شد، همچنین حلال ان متیل - ۲- پیرولیدون (NMP) از شرکت مرک و محلول سدیم هیپوکلریت با خلوص ۱۵ درصد از شرکت نوترون ایران خریداری شد.

تولید غشای الیاف توخالی پلی سولفون با استفاده از روش خشک- ترریسی

پلی سولفون و پلی وینیل پیرولیدون با حلال NMP در یک مخلوط کن، ترکیب شده و محلول پلیمری ریسندگی به طور کاملاً یکنواخت تهیه شد. غشاهای الیاف توخالی با استفاده از ترکیب پلی سولفون و PVP در حلال NMP به نسبت وزنی ۷۷:۸:۱۵ با روش خشک - ترریسی و با استفاده از شرایط ریسندگی جدول ۱ تولید شدند.

عملیات تکمیل هیپوکلریت سدیم تزریقی بر روی غشای الیاف توخالی

در عملیات تکمیل هیپو کلریت سستی غشاهای الیاف توخالی تولید شده در زمان‌های مشخصی درون حمامی از یک محلول هیپوکلریت مانند سدیم هیپوکلریت (NaClO) قرار می‌گیرند. در عملیات تکمیل هیپوکلریت تزریقی، ابتدا دسته‌ای از الیاف توخالی به اندازه مشخص برش خورده و دو سر الیاف برش خورده در رزین اپوکسی قرار می‌گیرد. پس از منجمد شدن رزین اپوکسی با برشی دقیق سطح مقطعی مناسب برای تزریق محلول هیپوکلریت فراهم می‌شود. محلول هیپوکلریت توسط یک پمپ با فشاری مشخص و در یک بازه زمانی تعیین شده به درون کانال‌های الیاف توخالی تزریق شده و از سوی دیگر خارج می‌شود. در این مطالعه دسته الیاف تشکیل شده از ۶ لیف توخالی به طول ۱۵۰ میلی‌متر برش خورده و درون رزین اپوکسی قرار گرفت. سپس محلول سدیم هیپوکلریت ۴٪ (w/v) به مدت ۶۰ دقیقه با فشارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پوند بر اینچ مربع به درون کانال الیاف تزریق شد. فرایند تزریق سدیم هیپوکلریت به درون الیاف توخالی در شکل ۱ نشان داده شده است.

بررسی غشای الیاف توخالی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای تهیه سطح مقطع مناسب برای انجام مطالعه‌ها با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی، غشاهای الیاف توخالی تولید شده

جدول ۱ - شرایط ریسندگی الیاف توخالی

سرعت خروج محلول پلیمری ریسندگی	۳ mL/min
سرعت تزریق مایع درونی	۰/۳ mL/min
ایرگپ	۴۰ Cm
مایع انعقاد درونی	آب مقطر: NMP (۵۰:۵۰)
مایع حمام انعقاد	آب مقطر
دمای مایع درونی	۲۷ ± ۰/۵ °C
دمای حمام انعقاد	۲۷ ± ۰/۵ °C
مشخصات روزه‌های رشته‌ساز	
قطر درونی	۰/۳ mm
قطر بیرونی	۰/۵ mm

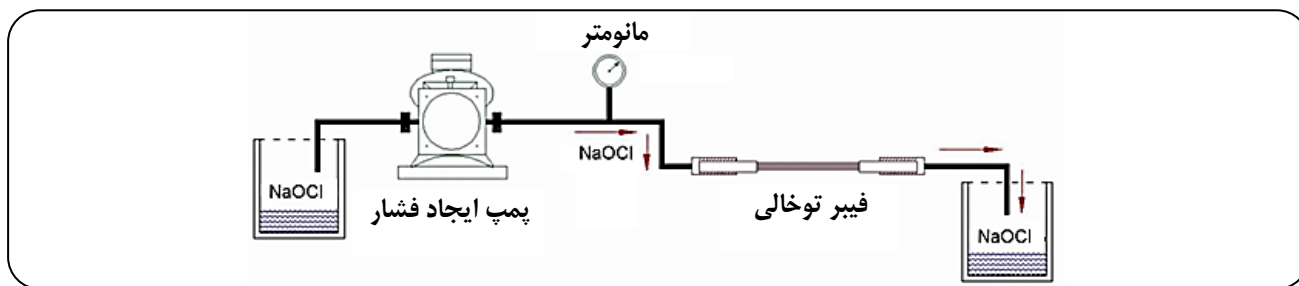
درون مایع نیتروژن منجمد شده و با شکستن الیاف منجمد شده سطح مقطع نمونه‌ها تهیه شد. سپس الیاف به مدت ۱۲ ساعت درون آن با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و رطوبت موجود در الیاف خارج شد. پس از پوشش دادن الیاف توخالی با روکشی از طلا با روش کندوپاش، تصویرهایی با بزرگ‌نمایی گوناگون از سطح مقطع الیاف توسط دستگاه Philips XI30 و با ولتاژ ۱۵ kV تهیه شد.

مطالعه با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

امروزه از میکروسکوپ نیروی اتمی به عنوان روشی متداول برای مطالعه ویژگی‌های سطحی غشاهای استفاده می‌شود. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، متوسط زبری سطح که با ثابت R_a نشان داده می‌شود را می‌توان معیاری مناسب برای تخمین اندازه روزه‌های پوسته غشا در نظر گرفت [۱۴، ۱۵]. در این مطالعه سطح‌های درونی غشاهای الیاف توخالی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی BRUKER-NANOS Digital Instruments مورد مطالعه قرار گرفت و ویژگی‌های سطحی غشا با ثابت R_a که بیانگر متوسط زبری سطح می‌باشد اندازه گیری شد.

اندازه‌گیری تخلخل غشایی با استفاده از پردازش تصویر

ابتدا تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی به اندازه‌های ۶۰۰×۲۰۰ پیکسل تهیه شده و به حالت باینری تبدیل شدند. برای انجام مراحل پردازش تصویر از الگوریتمی در محیط نرم‌افزار متلب R2016a استفاده شد. نخست تصویرهای تهیه شده به پنجره‌هایی با اندازه‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی شدند. هر یک از پنجره‌ها با حد آستانه‌ای جداگانه مربوط به ارزش‌های پیکسل آن پنجره و با استفاده از معادله (۱) به حالت باینری تبدیل شدند. اندازه پنجره‌ها به گونه‌ای انتخاب شد



شکل ۱ - عملیات تکمیل تزریقی هیپوکلریت سدیم با فشارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پوند بر اینچ مربع

در این معادله ΔV میزان حجم آب فیلتر شده در مدت زمان Δt و P متوسط اختلاف فشار موجود در دو سمت غشا می‌باشد. سطح جانبی غشا (A_m) با استفاده از معادله (۳) به دست می‌آید:

$$A_m = nI_d L \quad (3)$$

در این معادله L طول غشای الیاف توخالی، n تعداد غشاهای الیاف توخالی و I_d قطر درونی غشاهای الیاف توخالی مورد استفاده در فیلتراسیون می‌باشند.

برای اندازه‌گیری تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی از شش لیف توخالی برش خورده به طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. دو سر الیاف برش خورده در رزین اپوکسی قرار گرفته و طول مؤثر الیاف ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از سخت شدن رزین، با برش رزین سطح مقطعی مناسب تهیه شد. سپس آب توسط پمپ تعبیه شده با فشار مشخص به درون کانال‌های الیاف توخالی تزریق شده و میزان آب موجود در بورت اندازه‌گیری شد. سرانجام میزان تراوایی هیدرولیکی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تعیین شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی غشای لیف توخالی

از دستگاه استحکام‌سنج Zwick مدل 60-1446 برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی غشای الیاف توخالی استفاده شد. فاصله اولیه بین فک‌ها و سرعت آزمایش به ترتیب بر روی ۲/۵ سانتی‌متر و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شدند. برای کمینه کردن خطای تجربی و بررسی تکرارپذیری آزمون‌ها، اندازه‌گیری استحکام برای هر نمونه شش بار تکرار و نتیجه‌های به دست آمده میانگین‌گیری شدند.

نتیجه‌ها و بحث

مطالعه‌های میکروسکوپی

تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از سطح مقطع غشای الیاف توخالی پیش و پس از عملیات تکمیل هیپوکلریت

که با توجه به باینری شدن تصویرها کم‌ترین حذف جزئیات از تصویر رخ دهد. سپس با قرار دادن دوباره پنجره‌های باینری شده در کنار هم، تصویر دلخواه برای اندازه‌گیری تخلخل به کمک پردازش تصویر به دست آمد.

$$B_i = M - \frac{SD}{2} \quad (1)$$

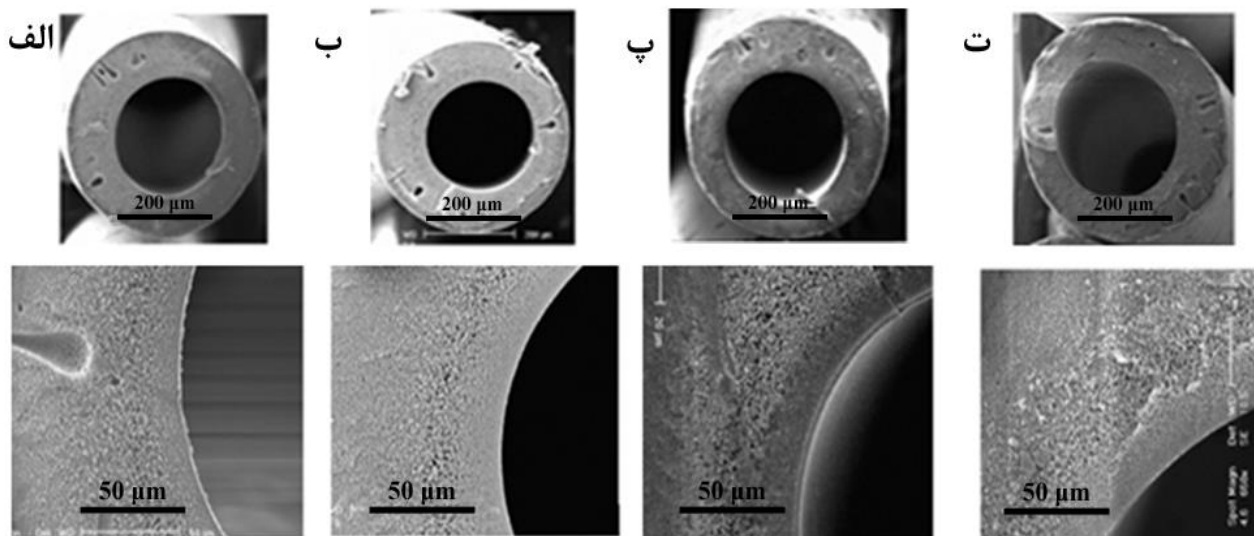
در این معادله B_i حد آستانه، M میانگین مقدار پیکسل‌های هر پنجره و SD انحراف از معیار مقدار پیکسل‌های شناسایی شده در هر پنجره می‌باشد.

با توجه به امکان تفکیک و علامت‌گذاری هر یک از روزنه‌ها با استفاده از دستور برجسب‌زنی در نرم‌افزار متلب، هر یک از روزنه‌ها به تنهایی شناسایی شده و برای هر یک از آن‌ها عدد ویژه‌ای اختصاص یافت. در مرحله بعد مساحت سطح روزنه‌های غشای الیاف توخالی با استفاده از الگوریتم‌های نوشته شده تعیین شد. برای محاسبه مساحت هر یک از روزنه‌های تعداد کل پیکسل‌های هر روزنه شمارش شد. در حقیقت مساحت هر روزنه (S_i) برابر است با تعداد پیکسل‌های موجود در هر روزنه (n_i).

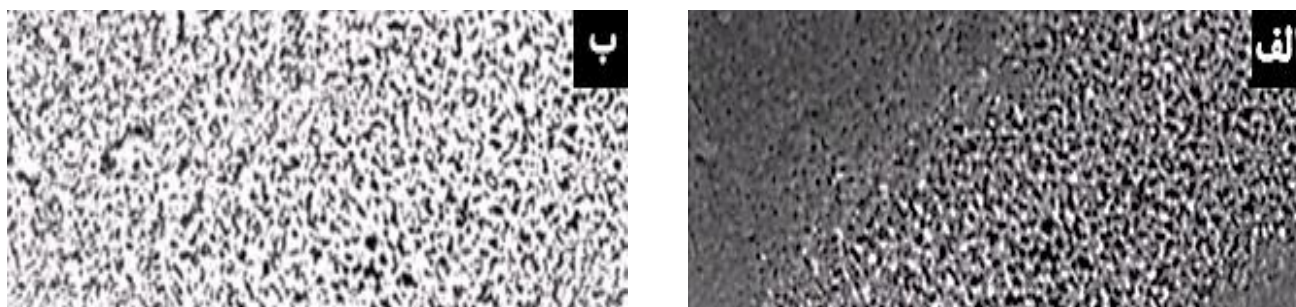
تراوایی هیدرولیکی غشای الیاف توخالی

در این مطالعه تراوایی هیدرولیکی غشای الیاف توخالی تولید شده با استفاده از ماژول آزمایشگاهی طراحی شده لیاوو و همکاران اندازه‌گیری شد [۱۶]. ماژول آزمایشگاهی طراحی شده همانند ماژول واقعی دیالیز بود که در اندازه کوچک‌تری ساخته شده است. با کوچک‌تر شدن ابعاد ماژول می‌توان غشاهای الیاف توخالی را به صورت مجزا مورد آزمون قرار داده و در نتیجه خطای به دست آمده از تأثیر متقابل غشاهای الیاف توخالی بر هم‌دیگر را کاهش داد. هنگامی که از آب خالص استفاده شود، می‌توان از معادله (۲) برای به‌دست آوردن تراوایی هیدرولیکی غشا (L_p) استفاده نمود.

$$L_p = \frac{\left(\frac{\Delta V}{\Delta t}\right)}{P A_m} \quad (2)$$



شکل ۲ - تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع الیاف توخالی پلی سولفون: الف - پیش از تکمیل تزریقی سدیم هیپوکلریت، ب- پس از تکمیل در فشار ۱۰ psig، پ- پس از تکمیل در فشار ۲۰ psig و ت- پس از تکمیل در فشار ۳۰ psig



شکل ۳ - پردازش تصاویر میکروسکوپی غشای الیاف توخالی: الف- تصویر اصلی و ب- تصویر باینری شده توسط الگوریتم

هیپوکلریت در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول، میانگین مساحت روزنه‌های غشاهای الیاف توخالی به همراه درصد CV اندازه روزنه‌های هر غشا آورده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که میانگین اندازه روزنه‌های غشای الیاف توخالی پس از انجام عملیات تکمیل هیپوکلریت در مقایسه با غشای تکمیل نشده افزایش یافته است که بر اساس مطالعه‌های صورت گرفته پیشین می‌توان این امر را به دلیل شستشو و حذف PVP از ساختار پلیمر دانست [۶-۱۳].

همچنین نتیجه‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین افزایش اندازه روزنه‌های در الیاف توخالی تکمیل شده با فشار ۳۰ psig می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که توانایی تکمیل هیپوکلریت تزریقی در ارتباط مستقیم با فشار تزریق محلول می‌باشد. با افزایش فشار تزریق محلول هیپوکلریت تماس محلول سدیم هیپوکلریت با لایه درونی غشای الیاف توخالی به صورت مؤثرتر صورت پذیرفته، نفوذ محلول سدیم هیپوکلریت به ساختار غشای الیاف توخالی پلی به میزان

در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویرها مشاهده می‌شود، با توجه به استفاده از آب مقطر و NMP به عنوان مایع درونی به هنگام شکل‌گیری غشای الیافی، به دلیل وجود اختلاف در نرخ تبادل حلال - غیر حلال در سطوح درونی و بیرونی، سطوح درونی و بیرونی و همچنین ساختار روزنه‌ها به طور کامل نامتقارن و ناهمسان شکل گرفته‌اند. همچنین با توجه به انعقاد پوسته درونی با سرعت کمتر و در زمان بیشتر، میکروروزنه‌های موجود در الیاف محدودتر شده و موجب کاهش ریز ساختارهای انگشتی شکل شده است.

نتیجه‌های اندازه‌گیری تخلخل غشایی با استفاده از پردازش تصویر

در شکل ۳ تبدیل تصویر سطح مقطع الیاف توخالی به حالت باینری را نشان داده شده است. نتیجه‌های استخراج شده از پردازش تصویر سطح مقطع غشای الیاف توخالی قبل و پس از عملیات تکمیل

جدول ۲- شاخصه‌های ساختاری اندازه‌گیری شده از تصاویر باینری غشای الیاف توخالی

اندازه روزنه‌ها CV%	متوسط اندازه روزنه‌ها (μm^2)	متوسط اندازه روزنه‌ها (پیکسل)	کد نمونه	نوع تکمیل
۲۵/۱۸	۰/۲۷۷	۲۷/۶۷۱	A0	قبل از عملیات تکمیل
۲۲/۵۹	۰/۲۸۴	۲۸/۴۲۴	A10	تکمیل تزریقی در فشار ۱۰ psig
۲۱/۰۰	۰/۲۹۴	۲۹/۴۱۲	A20	تکمیل تزریقی در فشار ۲۰ psig
۲۲/۷۲	۰/۳۰۱	۳۰/۰۸۷	A30	تکمیل تزریقی در فشار ۳۰ psig

جدول ۴- ویژگی‌های مکانیکی غشای الیاف توخالی تکمیل شده

کد نمونه	ازدیاد طول تا حد پارگی (%)	استحکام (MPa)
A0	۱۲/۶ ± ۰/۱۹	۱/۹۱ ± ۰/۰۶
A10	۱۲/۱ ± ۰/۱۶	۱/۷۳ ± ۰/۰۳
A20	۱۱/۷ ± ۰/۲۱	۱/۵۱ ± ۰/۰۴
A30	۹/۸ ± ۰/۱۴	۱/۲۴ ± ۰/۰۳

جدول ۳- متوسط زبری سطح‌های درونی غشای الیاف توخالی

کد نمونه	Ra (نانومتر)
A0	۸/۹۱
A10	۱۵/۶۳
A20	۲۳/۵۴
A30	۲۵/۸۷

مشهود است. میزان افت استحکام در نمونه‌های A10، A20 و A30 به ترتیب ۹، ۲۱ و ۳۵ درصد می‌باشد. افت استحکام و ویژگی‌های مکانیکی با افزایش میزان فشار اعمالی رابطه مستقیم دارند که این امر را می‌توان حاصل نفوذ بیش‌تر محلول هیپوکلریت سدیم به روزنه‌های غشای الیاف توخالی با افزایش فشار تزریق مرتبط دانست. کاهش استحکام غشاهای الیاف توخالی پس از تکمیل درونی هیپوکلریت با نتیجه‌های ارایه شده پژوهش انجام شده توسط *رواکس* و *همکاران* که تأثیر عملیات هیپوکلریت سنتی را بر غشای الیاف توخالی پلی سولفون مورد بررسی قرار دادند تطابق دارد. آن‌ها نتیجه گرفتند که کاهش استحکام غشاهای تکمیل شده با محلول هیپوکلریت به‌دست‌آمده شکسته و کوتاه‌تر شدن زنجیره‌های مولکولی پلی سولفون می‌باشد [۱۷].

اندازه‌گیری استحکام فشاری (آزمون بی نقصی)

بر اساس استاندارد ISO 8637 غشاهای الیاف توخالی مورد استفاده در عملیات همودیالیز باید تحت آزمایش استحکام فشاری (بی نقصی) قرار بگیرند. در این روش غشاهای الیاف توخالی باید در فشاری معادل ۱/۵ برابر فشار پیشنهادی تولیدکنندگان در دستورالعمل مصرف مورد آزمون قرار بگیرند. فشار استاندارد برای مصرف غشاهای همودیالیز مطابق این استاندارد برابر با ۷۰۰ mmHg و برابر با ۱۳/۵ psig می‌باشد. با توجه به جدول‌های تولیدکنندگان غشاهای الیاف توخالی، فشار پیشنهادی مصرفی برای غشاهای الیاف توخالی در بازه ۹-۱۵ psig قرار دارد [۱۸، ۱۹]. در این مطالعه با رعایت استاندارد مربوطه و برای کسب اطمینان

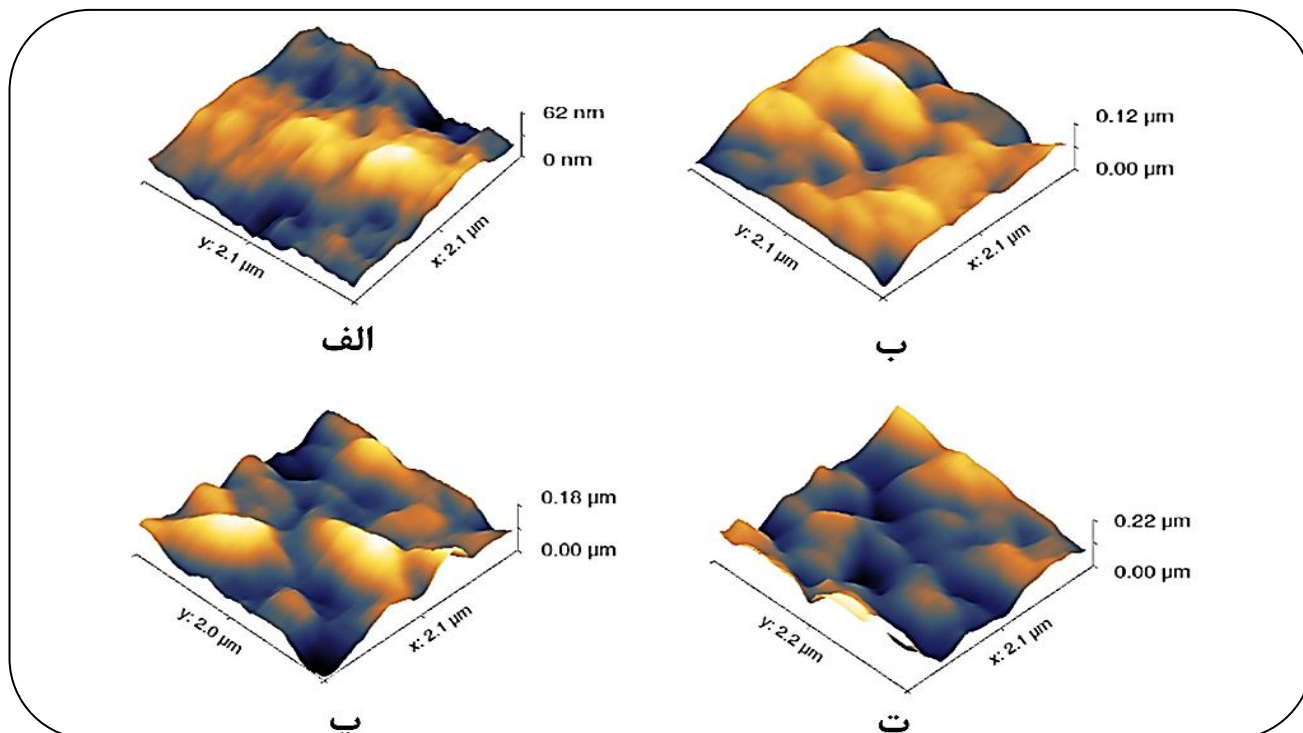
بیش‌تری صورت می‌گیرد که این امر شستشوی بالاتر PVP از ماتریس پلیمری را به همراه خواهد داشت که منجر به افزایش اندازه روزنه‌های غشای الیاف توخالی تکمیل شده می‌شود.

تأثیر عملیات تکمیلی استفاده شده بر زبری سطحی غشاهای الیاف توخالی

تصویرهای سه بعدی تهیه شده از سطح درونی غشاهای الیاف توخالی تکمیل شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. مقدارهای متوسط زبری سطح درونی غشاهای الیاف توخالی (Ra) نیز در جدول ۳ ارایه شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که متوسط زبری سطح‌های درونی غشای الیاف توخالی پس از تکمیل هیپوکلریت در مقایسه با نمونه اولیه به میزان چشمگیری افزایش یافته است. متوسط زبری سطوح درونی غشای الیاف توخالی پس از عملیات تکمیلی هیپوکلریت تزریقی در فشار ۳۰ psig در مقایسه با سایر نمونه‌های تکمیل شده بیش‌تر می‌باشد. تحلیل نتیجه‌های زبری سطوح درونی غشا در تطابق کامل با نتیجه‌های اندازه روزنه‌های برآورد شده با روش پردازش تصویرها می‌باشد.

ویژگی‌های مکانیکی غشاهای الیاف توخالی

مقدارهای استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی غشای الیاف توخالی پلی سولفون، و الیاف تکمیل شده با استفاده از هیپوکلریت تزریقی در فشارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ پوند بر اینچ مربع در جدول ۴ آورده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که کاهش استحکام غشای الیاف توخالی پلی سولفون پس از اعمال تکمیل تزریقی هیپوکلریت

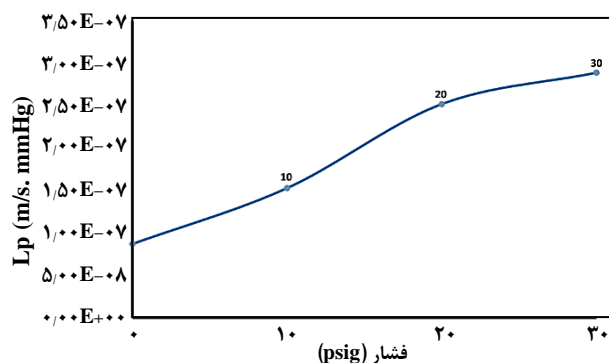


شکل ۴ - تصویرهای میکروسکوپ نیروی اتمی سطوح درونی غشای الیاف توخالی: الف - پیش از تکمیل تزریقی سدیم هیپوکلریت، ب - پس از تکمیل در فشار ۱۰ psig، پ - پس از تکمیل در فشار ۲۰ psig و ت - پس از تکمیل در فشار ۳۰ psig

سپس آب مقطر توسط پمپ سرنگی با فشار ۲۵ psig به درون الیاف تزریق و تغییرهای فشار و همچنین میزان شار خروجی غشاهای الیاف توخالی تولیدی در مدت زمان ۳۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که افزایش ناگهانی شار و یا کاهش فشار بیش از ۲/۵ psig در مدت زمان ۳۰ ثانیه بیانگر وجود نقص یا خراشیدگی در الیاف خواهد بود. با توجه به موارد یاد شده هیچ گونه نقصی در غشاهای الیاف توخالی که تحت عملیات تکمیل تزریقی در بازه‌ی فشار ۱۰-۳۰ psig گرفته بودند، دیده نشد.

تأثیر عملیات تکمیل تزریقی هیپوکلریت بر تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی

تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی تولیدی پیش و پس از عملیات تکمیل هیپوکلریت اندازه‌گیری و روند تغییر آن در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. عملیات تکمیل هیپوکلریت تزریقی در فشار ۳۰ psig به دلیل اعمال فشار بیش‌تر و تماس مستقیم محلول هیپوکلریت با سطح پوسته درونی غشاهای الیاف توخالی قابلیت بیش‌تری را در افزایش تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۵ - روند تغییر تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی پس از اعمال تکمیل هیپوکلریت

بیش‌تر، فشار ۲۵ psig به عنوان فشار مورد استفاده در آزمایش استحکام فشاری غشاهای الیاف توخالی تعیین شد. برای اندازه‌گیری استحکام فشاری از شش رشته غشاهای الیاف توخالی بریده شده به طول ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. دو انتهای هر رشته با رزین اپوکسی چسب اندود و طول مؤثر ۱۰۰ میلی‌متر برای هر رشته در نظر گرفته شد. سپس با برشی دقیق، سطح مقطع مناسب برای تزریق مایع در مجاری رشته‌ها تهیه شد. در مرحله بعد الیاف در ماژول قرار گرفته و سمت خروجی ماژول مسدود شد.

هیپوکلریت با سطح پوسته درونی غشاهای الیاف توخالی از قابلیت بیش‌تری برای افزایش تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی برخوردار بوده و می‌توان از آن به عنوان فرایندی کارآمد به منظور بهبود ویژگی‌های تراوایی هیدرولیکی و نفوذی غشاهای الیاف توخالی استفاده نمود. همچنین نتیجه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توانایی تکمیل هیپوکلریت تزریقی در ارتباط مستقیم با فشار مورد استفاده در تزریق محلول می‌باشد با توجه به تماس مستقیم محلول هیپوکلریت با پوسته درونی با افزایش فشار تزریق نفوذ محلول سدیم هیپوکلریت به ساختار غشای الیاف توخالی پلی به میزان بیش‌تری صورت می‌گیرد، حذف PVP از ساختار پلیمری گسترش یافته، قطر روزه‌ها بیش‌تر شده در نتیجه تراوایی هیدرولیکی غشای الیاف توخالی افزایش می‌یابد. اگر چه تکمیل هیپوکلریت تزریقی می‌تواند به عنوان تکمیلی کارآمد برای افزایش تراوایی غشاهای الیاف توخالی پلی‌سولفون مورد استفاده در درمان دیالیز به کار می‌رود، ولی با توجه به کاهش چشمگیر استحکام و افزایش طول غشاهای الیاف توخالی تکمیل شده با محلول هیپوکلریت که نتیجه شکسته شدن و کوتاه شدن زنجیره‌های پلیمری پلی‌سولفون می‌باشد، غشاهای الیاف توخالی تکمیل شده در بازه فشارهای تزریق بالا باید مورد آزمایش استحکام فشاری (بی‌نقصی) قرار بگیرند. با توجه به این مطلب که تاکنون مطالعه‌های چندانی بر روی تکمیل‌های درونی غشاهای الیاف توخالی صورت نگرفته است و این امر که سطح درونی غشاهای الیاف توخالی در عملیات همودیالیز در تماس مستقیم با خون بیمار می‌باشد، امید است با ادامه روند پژوهش‌ها بر روی تکمیل‌های درونی غشاهای الیاف توخالی بتوان با افزایش زیست‌سازگاری و تراوایی آنان شرایط دلخواه‌تری را برای کاهش عارضه و مشکل‌های بیماران دیالیزی فراهم نمود.

فهرست نمادها

B_i	حد آستانه
M	میانگین شدت پیکسل‌های تصویر الیاف توخالی
SD	انحراف از معیار شدت پیکسل‌های تصویر الیاف توخالی
S_i	مساحت هر یک از روزه‌های غشای الیاف توخالی
n_i	تعداد روزه‌های غشای الیاف توخالی
ΔV	میزان حجم فیلتر شده
Δt	مدت زمان فیلتر شدن سیال
P	متوسط اختلاف فشار در دو طرف غشا
A_m	سطح جانبی غشا

با در نظر گرفتن معادله‌های ناویر استوکس برای عبور جریان آب از روزه‌های استوانه‌ای یک غشای نیمه تراوا با فرض یکنواخت بودن جریان می‌توان معادله (۴) یا معادله‌های هاگن - پویسیول را استخراج نمود. معادله هاگن - پویسیول بیانگر ارتباط مستقیم بین شعاع روزه‌های یک غشای نیمه تراوا با شار خروجی آن می‌باشد:

$$J = \frac{Ad^2\Delta P}{32\tau\mu\Delta x} \quad (4)$$

در این معادله J شار خروجی، A مساحت سطح تراوای دارای آب، d متوسط قطر روزه‌های غشا، μ ویسکوزیته آب خالص، τ انحنای مسیر و x ضخامت غشا می‌باشد. برای محاسبه تراوایی هیدرولیکی آب خالص نیز می‌توان از معادله (۵) استفاده نمود [۲۰].

$$L_p = \frac{J}{\Delta P} \rightarrow L_p = \frac{Ad^2}{32\tau\mu\Delta x} \quad (5)$$

معادله (۴) یاد شده بیانگر ارتباط مستقیم میزان تراوایی هیدرولیکی یک غشا با متوسط اندازه روزه‌های آن می‌باشد. با مقایسه کارایی تکمیل هیپوکلریت درونی با تکمیل‌های سنتی هیپوکلریت انجام شده در پژوهش‌های پیشین در می‌یابیم که تکمیل هیپوکلریت درونی از توان بیش‌تر در افزایش تراوایی غشای الیاف توخالی پلی‌سولفون برخوردار می‌باشد. بر اساس مطالعه‌های صورت گرفته افزایش تراوایی هیدرولیکی غشاهای تکمیل شده با محلول سدیم هیپوکلریت را می‌توان ناشی از افزایش اندازه روزه‌های غشا به دلیل شستشو و حذف PVP از ساختار پلیمر دانست [۶-۱۳].

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر تغییرهای فشار اعمالی در تکمیل هیپوکلریت تزریقی در بازه ۳۰-۱۰ psig بر ویژگی‌های مکانیکی، اندازه روزه‌ها و تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی پلی‌سولفون مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های پردازش تصویرهای غشاهای الیاف تو خالی تکمیل شده بیانگر افزایش محسوس اندازه روزه‌های غشای الیاف توخالی می‌باشد که به طور کامل با نتیجه‌های تحلیل سطح درونی غشاهای الیاف توخالی تکمیل شده با استفاده از روش میکروسکوپ نیروی اتمی تطابق دارد. بررسی نتیجه‌های به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که تراوایی هیدرولیکی غشاهای الیاف توخالی پس از عملیات تکمیل تزریقی سدیم هیپوکلریت در مقایسه با نمونه تکمیل نشده به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با مقایسه تکمیل درونی هیپوکلریت با نوع سنتی در می‌یابیم که عملیات تکمیل هیپوکلریت تزریقی در مقایسه با نوع سنتی به دلیل اعمال فشار و تماس مستقیم محلول

τ	انحنای مسیر	I_d	قط درونی الیاف توخالی
x	ضخامت غشا	n	تعداد الیاف توخالی
L_p	تراوایی هیدرولیکی آب خالص	L	طول الیاف توخالی
		J	شار خروجی از غشای الیاف توخالی
		A	مساحت تراوایی دارای آب
		d	متوسط قطر روزنه‌های غشای الیاف توخالی
		μ	گرانروی آب خالص

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۳۰

مراجع

- [1] Yang Q., Chung T.C., Weber M., [Microscopic Behavior of Polyvinyl Pyrrolidone Hydrophilizing Agents on Phase Inversion Polyethersulfone Hollow Fiber Membranes for Memofiltration](#), *Journal of Membrane Science*, **326**: 322-331 (2009).
- [2] Qin J., Wong V., Li Y., Liu Y., [A High Flux ultrafiltration membrane spun from PSU/PVP \(K90\)/DMF/1,2-Propanediol](#), *Journal of Membrane Science*, **211**: 139-147 (2003).
- [3] Xu Z.L., Chung T.S., Huang Y., [Effect of Poly \(vinyl pyrrolidone\) Molecular Eights on Morphology, Oil/Water Separation, Mechanical and Thermal Properties of Polyetherimide/Poly-\(Vinylpyrrolidone\) Hollow Fiber Membranes](#), *Journal of Applied Polymer Science*, **74**: 2220-2233 (1999).
- [4] Higuchi A., [Chemically Modified Polysulfone Hollow Fibers with Vinylpyrrolidone Having Improved Blood Compatibility](#), *Biomaterial*, **23**: 2659-2666 (2002).
- [5] Hayama M., Yamamoto K., Kohori F., Sakai K., [How Polysulfone Dialysis Membranes Containing Polyvinylpyrrolidone Achieve Excellent Biocompatibility?](#), *Journal of Membrane Science*, **234**: 41-49 (2004).
- [6] Yang Q., Chung T. C., Santoso Y.E., [Tailoring Pore Size and Pore Size Distribution of Kidney Dialysis Hollow Fiber Membranes via Dual-Bath Coagulation Approach](#), *Journal of Membrane Science*, **290**: 153-163 (2007).
- [7] Roesink H.D., "Microfiltration: Membrane Development and Module Design", Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, (1989).
- [8] Weink I., Meuleman E., Borneman Z., Van Den Boomgaard T., Smolders C., [Chemical Treatment of a Polymer Blend: Mechanism of the Reaction of Hypochlorite with Poly \(Vinyl Pyrrolidone\)](#), *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, **33**: 49-54 (1995).
- [9] Zhang Y., Wang J., Gao F., Tao H., Chen H. Zhang H., [Impact of Sodium Hypochlorite \(NaClO\) on Polysulfone \(PSF\) Ultrafiltration Membranes: The Evolution of Membrane Performance and Fouling Behavior](#), *Separation and Purification Technology*, **175**: 238-247 (2017).
- [10] Saghafi R., Zarrebini M., Semnani D., Mahmoodi M. R., [The Effect of Bore Fluid Type on Performance of Treated Polysulfone Hollow-Fiber Membrane](#), *Textile Research Journal*, **85(3)**: 281-293 (2014).

- [11] Saghafi R., Zarrebini M., Semnani D., Mahmouudi M. R., [Novel Method for Treatment of Hollow fiber Membranes using Hypochlorite](#), *The Journal of The Textile Institute*, **105**: 962-970 (2014).
- [12] Saghafi R., Zarrebini M., Semnani D., Mahmouudi M. R., [High Pressure Injection Technique for Hypochlorite Treatment of Polysulfone Hollow Fibre Membranes](#), *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, **40**: 405-413 (2015).
- [13] Saghafi R., [Effect of Hybrid Post Treatments on the Structural Property and Water Flux of Polysulfone Hollow Fiber Membrane](#), *Fibers and Polymers*, **18(1)**: 41-49 (2017).
- [14] Khayet M., Khulbe K.C., Matsuura T., [Characterization of Membranes for Membrane Distillation by Atomic Force Microscopy and Estimation of Their Water Vapor Transfer Coefficients in Vacuum Membrane Distillation Process](#), *Journal of Membrane Science*, **238**: 199-211 (2004).
- [15] Kim J.Y., Lee H.K., Kim S.C., [A New Modeling of Asymmetric Membrane Formation in Rapid Mass Transfer System](#), *Journal of Membrane Science*, **163**: 69-77 (1999).
- [16] Liao Z., Klein E., Poha C.P., Huang Z., Lu J., Hardy P.A., Gao D., [Measurement of Hollow Fiber Membrane Transport Properties in Hemodialyzers](#), *Journal of Membrane Science*, **256(1-2)**: 176-183 (2005).
- [17] Rouaix S., Causserand C., Aimar P., [Experimental Study of the Effects of Hypochlorite on Polysulfone Membrane Properties](#), *Journal of Membrane Science*, **277(1-2)**: 137-147 (2006).
- [18] "Operation and Maintenance Manual - UF-6-HF Ultrafiltration System", Con-Serv Manufacturing, (2013).
- [19] Jacangelo J.G., Adham S., Michel J., "Membrane Filtration for Microbial Removal", Denver, CO: AWWA Research Foundation and American Water Works Association. ISBN 0898978943 (1997).
- [20] Sakai K., Ozawa K., Mimura R., Ohashi H., [Comparison of Methods for Characterizing Microporous Membranes for Plasma Separation](#), *Journal of Membrane Science*, **32(1)**: 3-17 (1987).