

ساخت باکی کاغذ با استفاده از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و بررسی توانایی آن در تصفیه آب

منصور فربد*، سیده کوثر اکرامی‌نسب و آمنه آهنگرپور

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

پست الکترونیکی: Farbod_m@scu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲)

چکیده

در این پژوهش انواع باکی کاغذ با استفاده از تعلیقی از جرم‌های مختلف نانولوله‌های کربنی تک‌جداره در متانول تهیه شدند و به روش پالایش تحت خلأ بر روی صافی‌های PTFE رسوب داده شده و سپس از آن جدا شدند. متوسط اندازه حفره‌های باکی کاغذهای تولید شده با مقادیر ۳۰ و ۵۰ میلی‌گرم از نانولوله‌های کربنی، به ترتیب ۸۰ و ۴۱ نانومتر بودند. رسانش گرمایی باکی کاغذها $0.44/319$ W/mK اندازه‌گیری شد. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با کاهش دما افزایش می‌یافت که نشان‌دهنده رفتار نیم‌رسانایی بود. به منظور بررسی توانایی تصفیه‌کنندگی باکی کاغذهای تولید شده، ۱۰۰ میلی‌لیتر از آب لوله‌کشی اهواز به وسیله پالایش تحت خلأ از آنها عبور داده شد و مشخصات آب‌ها قبل و بعد از عبور از باکی کاغذ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که با افزایش ضخامت باکی کاغذ، میزان سختی و رسانش الکتریکی (EC) آب کاهش می‌یابد. رسانش الکتریکی و سختی پس از عبور از صافی ۷۰ mg به ترتیب از $1709 \mu S/cm$ و 1706 mg/L به $1592 \mu S/cm$ و 1587 mg/L کاهش یافتند. آزمایش‌ها نشان دادند که باکی کاغذهای ۵۰ و ۷۰ میلی‌گرمی عملکرد بهتری از صافی‌های مرسوم PTFE دارند.

واژه‌های کلیدی: باکی کاغذ، پالایش تحت خلأ، نانولوله کربنی، تصفیه آب

۱. مقدمه

است که با انتقال آب از درون یک لایه متخلخل (صافی) باعث

حذف ذرات معلق از آب شده و کدورت را از بین می‌برد. انواع

فرایندهای غشایی را می‌توان بر اساس اندازه اسمی منافذ شامل

پالایش معمولی (از ۱۰۰ تا $10 \mu m$)، میکروپالایش (از ۱۰ تا

$1 \mu m$)، فرایپالایش (از $0.1 \mu m$ تا میکرومتر تا

50 \AA)، نانوپالایش و اسمز معکوس هر دو با اندازه منافذ تا

1 \AA دسته‌بندی کرد [۱].

از زمان شکوفایی نانوفناوری محققان به دنبال یافتن راهی برای

استفاده از این فناوری در تصفیه آب بوده‌اند. نانولوله‌های کربنی از

جمله موادی هستند که به دلیل سبکی، خواص مکانیکی، الکتریکی

و گرمایی ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲ و ۳]. باکی کاغذ از

روش‌های فیزیکی تصفیه آب روش‌هایی هستند که در آنها

حذف مواد آلاینده آب بر اساس سازوکارهای فیزیکی، بدون

دخالتهای هرگونه واکنش شیمیایی یا بیولوژیکی صورت گیرد.

انواع فرایندهای تصفیه فیزیکی آب شامل آشغال‌گیری،

ته‌نشینی، شناورسازی، پالایش و جذب سطحی است. معمولاً

بعد از فرایندهای اولیه تصفیه آب مانند ته‌نشینی، حدود ۵

درصد از مواد جامد معلق و سایر ناخالصی‌های غیرقابل‌ته-

نشینی درون آب باقی می‌مانند که باعث کدورت قابل توجه

آب می‌شوند. پالایش یکی از روش‌های فیزیکی تصفیه آب

۲. کارهای آزمایشگاهی

مواد اولیه مورد استفاده عبارتند از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره با قطر حدود ۲ nm و طول تقریبی $30 \mu\text{m}$ با خلوص بالای ۹۵ درصد تولیدی شرکت سامچون، سدیم دو دیسولفات با فرمول شیمیایی $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ و جرم مولی 288.37 g/mol ، از شرکت مرک و آب یون‌زدایی شده حاصل از دستگاه (OES ; SDL 12). همچنین از کاغذ صافی‌های واتمن با اندازه حفره $2.5 \mu\text{m}$ برای استحکام باکی کاغذ و همچنین از صافی‌های PTFE با اندازه حفره‌های 450 nm به‌عنوان صافی مقایسه استفاده شد.

۲.۱. ساخت، مشخصه‌یابی و اندازه‌گیری خواص

فیزیکی باکی کاغذها

الف: ساخت و مشخصه‌یابی

ابتدا جرم‌های مختلف ۱، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌گرم از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره را به مقداری متانول اضافه و به مدت نیم ساعت در فراصوت حمامی و بعد از آن به مدت ۵۰ دقیقه تحت فراصوت میله‌ای (مدل UP400-A) با توان ۱۵۰ وات جهت تهیه یک تعلیق یکنواخت قرار گرفتند. تعلیق حاصل با استفاده از پالایش تحت خلأ بر روی صافی‌های PTFE نشانده و با خشک کردن و جدا کردن آن از روی صافی‌های PTFE، باکی کاغذ تهیه شد. شکل ۱ نمایی از دستگاه مورد استفاده را نشان می‌دهد.

باکی کاغذهای تولید شده انعطاف‌پذیری بالا و خلل و فرج مناسبی داشتند. شکل ۲. الف TEM نانولوله‌های کربنی تهیه شده از شرکت نوترینو و شکل ۲. ب و ج تصاویری از یک نمونه باکی کاغذ جدا شده و میزان انعطاف‌پذیری بالا و ابعاد آن را نشان می‌دهد.

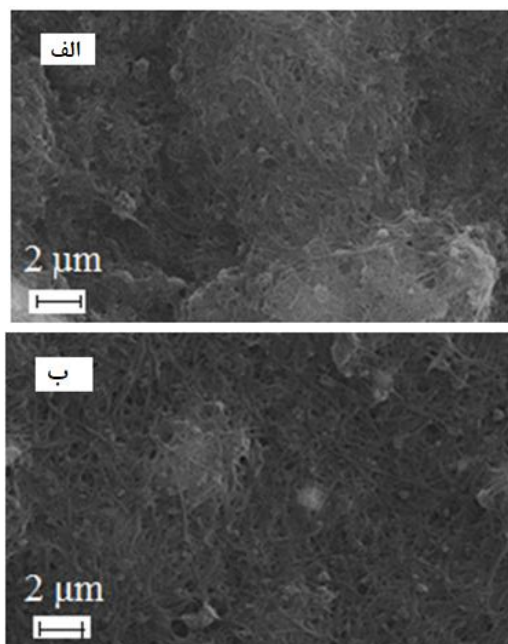
جهت تعیین ساختار بلوری باکی کاغذ، الگوی پراش پرتو ایکس آنها با استفاده از یک از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل PW1840 ساخت شرکت فیلیپس گرفته شد. سپس الگوی به‌دست آمده با الگوی مربوط به نانولوله‌های کربنی و گرافیت مقایسه شد. شکل ۳ الگوی به‌دست آمده از باکی کاغذ تولید شده از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره را نشان می‌دهد. در این



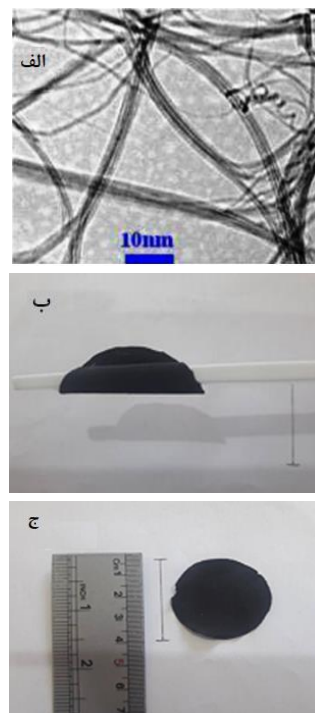
شکل ۱. طرح‌واره سامانه تولید باکی کاغذ.

محصولات به‌دست آمده از نانولوله‌های کربنی است که در تصفیه آب کاربرد دارد و در رده نانو صافی‌ها قرار می‌گیرد [۴ و ۵]. باکی کاغذ یک صفحه نازک و متخلخل متشکل از توزیع تصادفی نانولوله‌های کربنی است که به دلیل نیروی واندروالسی بین نانولوله‌ها، پایدار می‌مانند و چگالی کم و رسانش گرمایی و الکتریکی قابل توجهی دارند [۶ و ۷]. باکی کاغذها موادی در عین حال سبک هستند و ترکیب این دو ویژگی، آنها را جایگزین موادی مانند فولاد، مس و یا آلومینیوم در صنعت هواپیماسازی خواهد کرد و به دلیل این ویژگی‌های منحصر به‌فرد، می‌توان از آن به‌عنوان ماده جدیدی در افزایش بازده در مصرف انرژی هواپیماها، اتومبیل‌ها، روشنایی، نمایشگر تلویزیون‌های پیشرفته و یا در تصفیه آب استفاده کرد [۸]. همچنین باکی کاغذها به‌عنوان غشای پالایش برای جداسازی میکروذرات موجود در سیال‌ها و یا در هوا قابل استفاده هستند، زیرا نانولوله‌های کربنی درون باکی کاغذها غیرقابل حل هستند و قابلیت استفاده برای طیف وسیعی از گروه‌های عاملی را دارند و حتی می‌توانند ترکیبات را به‌صورت انتخابی جدا کنند. همچنین باکی کاغذها به‌عنوان مواد سازنده الکتروود در سلول‌های سوختی نیز کاربرد دارند [۸].

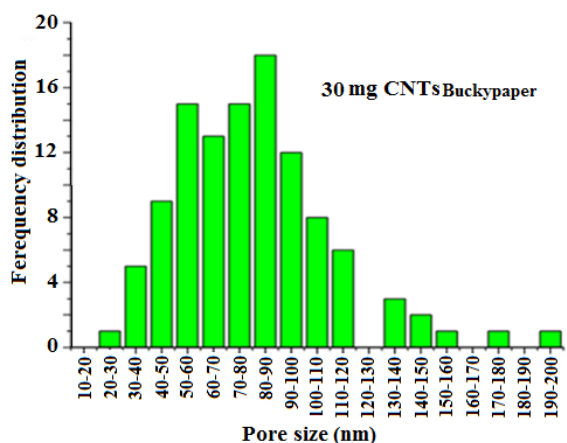
باکی کاغذ به‌روش‌های مختلف از جمله "پالایش تحت خلأ" و "تغییر جهت نانولوله‌های کربنی هم‌راستا به صورت خشک" ساخته می‌شود [۷]. در این تحقیق نمونه‌های باکی کاغذ به روش پالایش تحت خلأ ساخته شدند و سپس رسانش گرمایی و الکتریکی آنها اندازه‌گیری شد. همچنین از باکی کاغذهای تهیه شده در تولید غشاء (صافی) نیز استفاده و توانایی آنها در تصفیه آب بررسی شد.



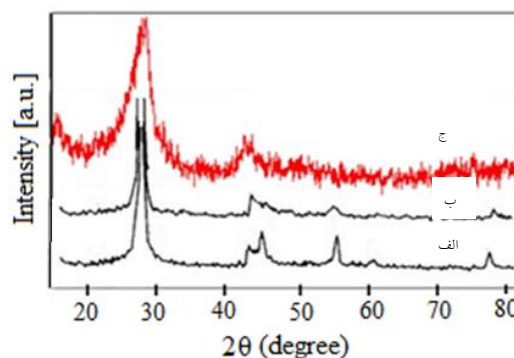
شکل ۴. تصاویر SEM باکی کاغذ تهیه شده با استفاده از (الف) ۵۰ و (ب) ۳۰ میلی گرم نانولوله‌های کربنی تک‌جداره.



شکل ۲. (الف) تصویر TEM نانولوله‌های کربنی استفاده شده، (ب) میزان انعطاف‌پذیری باکی کاغذ و (ج) مقیاسی از اندازه باکی کاغذ.



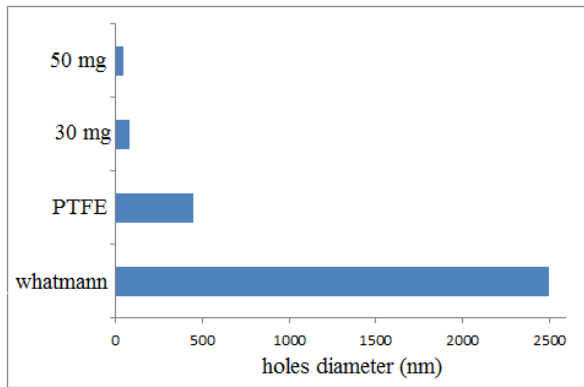
شکل ۵. نمودار میزان توزیع خلل و فرج‌ها در باکی کاغذ تهیه شده با ۳۰ میلی گرم نانولوله‌های کربنی تک‌جداره.



شکل ۳. الگوی پراش پرتو X: (الف) گرافیت [۹]، (ب) نانولوله کربنی [۱۰] و (ج) باکی کاغذ.

با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر^۱ اندازه حفره‌ها، اندازه‌گیری شد. شکل ۵ توزیع اندازه خلل و فرج‌ها را برای باکی کاغذ تهیه شده با ۳۰ میلی گرم نانولوله‌های کربنی تک‌جداره نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اندازه خلل و فرج‌ها متفاوت است و از ۲۰ تا ۲۰۰ نانومتر متغیرند. البته حدود ۸۰ درصد خلل و فرج‌ها با اندازه بین ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر است. این اندازه‌ها نشان می‌دهند که اگر به طریق مکانیکی از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان صافی آب استفاده شود، ذرات بالاتر از ۱۰۰ نانومتر نمی‌توانند

شکل همچنین الگوی XRD گرافیت [۹] و نانولوله‌های کربنی [۱۰] برای مقایسه نشان داده شده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود با الگوی مرجع نانولوله‌های کربنی و گرافیت مطابقت دارد. همچنین شکل ۴ تصاویر SEM (تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo 1455 VP) باکی کاغذ تولید شده با استفاده از مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی تک‌جداره پخش شده در متانول را نشان می‌دهد که در این تصاویر نانولوله‌های کربنی به وضوح مشاهده می‌شوند.



شکل ۷. مقایسه اندازه قطر حفره‌های کاغذ صافی واتمن، صافی PTFE، باکی کاغذ ۳۰ و ۵۰ میلی گرمی.

گرمایی باکی کاغذ محاسبه شد [۱۱].

با توجه به ثابت بودن دمای دو سر باکی کاغذ، دمای وسط آن تا مقدار مشخص (T_M) افزایش می‌یابد. با استفاده از نظریه جریان گرمایی، مقدار دما و جریان گرمایی با استفاده از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه‌اند [۱۱].

$$T_x = T_s + \frac{P}{\lambda L t w k} (L - x), \quad (1)$$

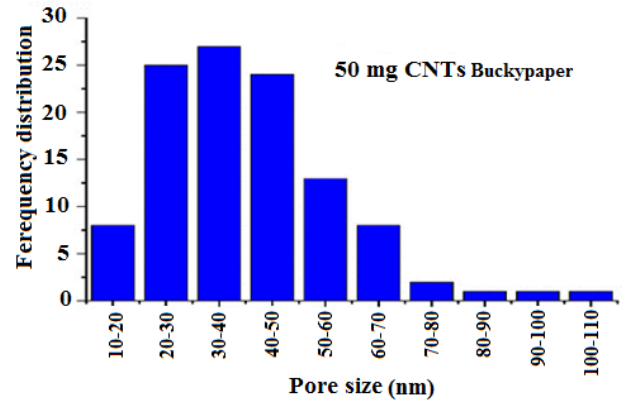
$$k = \frac{PL}{\lambda t w (T_M - T_s)}, \quad (2)$$

در معادله (۲)، k رسانش گرمایی، w عرض نمونه، L نصف طول نمونه باکی کاغذ، t ضخامت نمونه، T_M دمای وسط نمونه که توسط ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود و P توان است و طبق رابطه $P=VI$ محاسبه شده است.

با جایگذاری مقادیر اندازه‌گیری شده در رابطه (۲)، مقدار رسانندگی گرمایی باکی کاغذ $319,044 \text{ W/mK}$ به دست آمد که به مقدار رسانندگی گرمایی باکی کاغذ گزارش شده (W/mK) (۳۲۱) [۱۱] بسیار نزدیک است.

ج: اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی باکی کاغذ نسبت به دما

جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی باکی کاغذ و بررسی وابستگی دمایی آن، دو سر نمونه برای ثبت تغییرات مقاومت آن به اهم‌تر متصل شد و ترموکوپل نوع K به وسط نمونه برای محاسبه تغییرات دمای آن چسبانده شد. سپس حین سرد کردن نمونه، مقادیر مقاومت الکتریکی باکی کاغذ ثبت شد. شکل ۹ مقاومت الکتریکی باکی کاغذ را به‌عنوان تابعی از دما نشان می‌دهد. این رفتار بسیار شبیه رفتار نانولوله‌های کربنی است [۱۲].



شکل ۶. نمودار میزان توزیع خلل و فرج‌ها در باکی کاغذ تهیه شده با ۵۰ میلی گرم نانولوله‌های کربنی تک جداره.

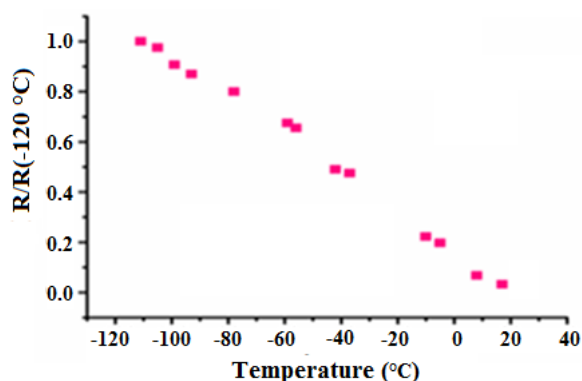
از این صافی عبور کنند. البته اگر ضخامت صافی نازک باشد و کانال‌های حفره‌های ۲۰۰ نانومتری تا طرف دیگر باکی کاغذ ادامه داشته باشند ذرات تا ۲۰۰ نانومتر هم می‌توانند از این صافی‌ها عبور کنند.

به منظور افزایش ضخامت باکی کاغذها و احتمال عملکرد بهتر، نمونه‌هایی با ۵۰ و ۷۰ میلی گرم نانولوله کربنی تک‌جداره نیز تهیه شد. شکل ۶ نمودار توزیع خلل و فرج باکی کاغذ تهیه شده از ۵۰ میلی گرم نانولوله کربنی تک‌جداره را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود فراوانی خلل و فرج‌ها در اندازه‌های بین ۲۰ تا ۶۰ نانومتر بیشتر است.

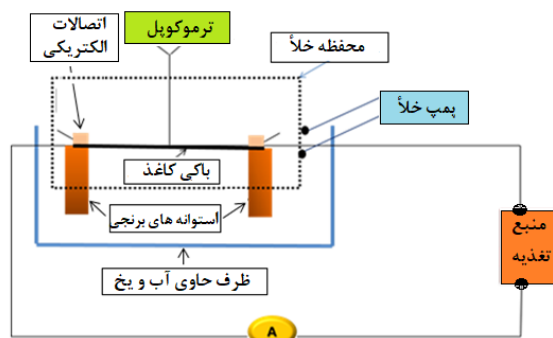
با استفاده از شکل‌های ۵ و ۶، میانگین اندازه حفره‌های باکی- کاغذهای تولید شده با مقدار ۳۰ mg از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره، ۸۰ nm و میانگین اندازه حفره‌های باکی کاغذهای تولید شده با مقدار ۵۰ mg از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره، ۴۱ nm اندازه‌گیری شدند. شکل ۷ به‌گونه طرح‌وار، اندازه قطر حفره‌های کاغذ صافی واتمن، صافی PTFE، باکی کاغذ ۳۰ و ۵۰ میلی گرمی را باهم مقایسه کرده است.

ب: اندازه‌گیری رسانش گرمایی باکی کاغذ

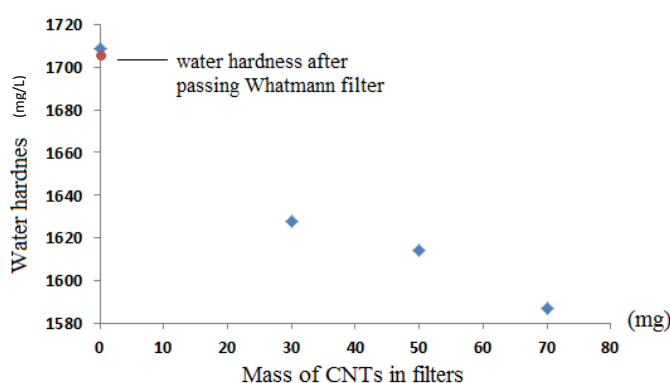
شکل ۸ تصویری از چیدمان آزمایش برای اندازه‌گیری رسانش گرمایی باکی کاغذ را نشان می‌دهد. ابتدا یک نوار از باکی کاغذ در محفظه‌ای بین دو پایه قرار می‌گرفت. ترموکوپل نوع K به وسط نمونه چسبانده می‌شد و پایه‌های برنجی محفظه جهت ثابت ماندن دمایشان (T_0) در مخلوط آب و یخ قرار داده می‌شدند. سپس با اعمال ولتاژهای مختلف، جریان و ولتاژ دو سر ترموکوپل تحت خلأ ثبت می‌شد و طبق رابطه (۲) رسانش



شکل ۹. مقاومت الکتریکی بهنجار شده به مقاومت در دمای $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ باکی کاغذ برحسب دما.



شکل ۸. طرح‌واره نحوه بستن مدار جهت اندازه‌گیری رسانندگی گرمایی باکی کاغذ.



شکل ۱۰. سختی آب نمونه شهری اهواز پس از عبور از صافی‌های با جرم‌های مختلف نانولوله کربنی.

جدول ۱. میزان رسانندگی الکتریکی، شوری و سختی نمونه آب شهری اهواز در تیر ماه قبل و بعد از عبور از صافی‌ها.

مشخصات آب	آب قبل از عبور از کاغذ صافی	آب بعد از عبور از کاغذ صافی	باکی کاغذ ۳۰ mg	باکی کاغذ ۵۰ mg	باکی کاغذ ۷۰ mg
رسانندگی الکتریکی ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	۱۷۲۱	۱۷۰۹	۱۶۲۳	۱۶۱۹	۱۵۹۲
شوری آب (g/L)	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸
سختی آب (mg/L)	۱۷۰۹	۱۷۰۶	۱۶۲۸	۱۶۱۴	۱۵۸۷

به‌منظور حفاظت از نمونه‌های باکی کاغذ قرار دادیم. همچنین یک صافی مقایسه تشکیل شده از دو صافی PTFE تنها و بدون حضور نانولوله‌های کربنی در نظر گرفته شد. سپس مشخصات ۱۰۰ میلی‌لیتر از آب لوله‌کشی شهری قبل و بعد از عبور از باکی کاغذ توسط دستگاه هدایت‌سنج آب مدل Cond 7110 اندازه‌گیری شد. جدول ۱ نتایج اندازه‌گیری و همچنین شکل ۱۰ سختی آب نمونه شهری اهواز پس از عبور از صافی‌های با جرم‌های مختلف نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. خطا در

با توجه به نمودار، با کاهش دما، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است که نشان‌دهنده رفتار نیم‌رسانایی نمونه است

۳. بررسی توانایی تصفیه‌کنندگی باکی کاغذهای

تولید شده

جهت بررسی توانایی تصفیه‌کنندگی آب توسط باکی کاغذهای تولید شده، باکی کاغذهایی با مقادیر جرمی مختلف ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌گرم از نانولوله‌های کربنی ساخته شد. سپس هر کدام از باکی کاغذها را بین دو کاغذ صافی واتمن با تخلخل $2.5\ \mu\text{m}$

عبور می‌کند درحالی که از صافی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌گرمی به ترتیب در مدت ۱۰/۵، ۱۸ و ۲۵/۵ دقیقه عبور می‌کند؛ بنابراین با افزایش ضخامت صافی‌ها به منظور داشتن کارایی بالا، تصفیه‌کنندگی باید تحت فشار صورت گیرد.

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در این پژوهش با استفاده از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره، نمونه‌های باکی‌کاغذ با خلل و فرج مناسب و انعطاف‌پذیری بالا ساخته شد و مقدار رسانندگی گرمایی باکی-کاغذ تولید شده $319 / 0.4 \text{ W / mK}$ محاسبه شد. مشاهده شد که با افزایش دما، مقاومت الکتریکی باکی‌کاغذ کاهش می‌یافت که نشان‌دهنده رفتار نیم‌رسانایی نانولوله‌های تشکیل دهنده باکی‌کاغذ است. در بررسی توانایی باکی‌کاغذ در تصفیه آب، ملاحظه شد که هر چه مقدار اولیه نانولوله‌های کربنی تشکیل دهنده باکی‌کاغذ افزایش یابد، میزان سختی و رسانندگی الکتریکی آب کاهش بیشتری می‌یابد. باکی‌کاغذ تأثیر قابل مشاهده‌ای در کاهش شوری آب نداشت. در صافی ساخته شده از یک باکی‌کاغذ قرار گرفته بین دو کاغذ صافی، نتایج نشان داد که باکی‌کاغذ ۷۰ میلی‌گرمی با کاهش ۱۱۹ واحدی در سختی، در مقایسه با کاهش ۱۱۰ واحدی صافی‌های PTFE، عملکرد بهتری دارد و باکی‌کاغذ ۵۰ میلی‌گرمی با کاهش ۹۲ واحدی در سختی عملکرد قابل‌قبولی نسبت به دو صافی PTFE دارد. همچنین نتایج نشان دادند که اگرچه با افزایش ضخامت باکی‌کاغذ قدرت تصفیه‌کنندگی آب آن افزایش می‌یابد ولی زمان تصفیه‌کنندگی افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت مالی از این اثر قدردانی می‌کنند.

اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی و سختی آب یک واحد اندازه‌گیری و در اندازه‌گیری شوری آب یک دهم واحد بود. لازم به ذکر است که به‌منظور مقایسه میزان تصفیه‌کنندگی باکی-کاغذ با صافی‌های تجاری، از دو صافی PTFE با قطر ۴۷ میلی‌متر و اندازه حفره‌های ۴۵۰ میکرومتر استفاده شد و میزان سختی، شوری و رسانش الکتریکی آب شهری اهواز اندازه‌گیری شد و ملاحظه شد مقدار سختی آب ۱۱۰ واحد و میزان رسانندگی الکتریکی فقط $10 \mu\text{S/cm}$ کاهش را نشان داد. با توجه به نتایج، ذکر چند نکته ضروری است.

(۱) همان‌طور که از نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود، صافی واتمن ۴۲ که تخلخل ۲/۵ میکرومتر دارد تأثیر چندانی در تصفیه آب نداشته و در نتیجه اثر تصفیه‌کنندگی مربوط به خود باکی‌کاغذهاست.

(۲) در خصوص سختی آب جدول ۱ مشاهده می‌شود که باکی‌کاغذ با مقدار اولیه نانولوله‌های کربنی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌گرمی توانسته‌اند میزان سختی را نسبت به بعد از عبور از صافی شاهد به ترتیب ۷۸، ۹۲ و ۱۲۳ واحد کاهش دهند. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت باکی‌کاغذ، عملکرد آن در تصفیه آب بهتر می‌شود. با مقایسه نتایج جدول ۱ و نتایج مربوط به صافی‌های PTFE می‌توان نتیجه گرفت که باکی‌کاغذ ۷۰ میلی‌گرمی با کاهش ۱۲۳ واحد در سختی، در مقایسه با کاهش ۱۱۰ واحدی صافی‌های PTFE، عملکرد تصفیه‌کنندگی بهتری دارند.

(۳) با توجه به این که ضخامت صافی نقش مهمی در میزان تصفیه‌کنندگی دارد می‌توان نتیجه گرفت که با ساخت باکی‌کاغذهای ضخیم‌تر بتوان عملکرد بهتری از آنها انتظار داشت.

(۴) ذکر این نکته ضروری است که با افزایش ضخامت صافی، زمان صافی‌کنندگی هم افزایش می‌یابد. مثلاً ۱۰۰ میلی‌لیتر آب تحت خلأ به مدت ۶ دقیقه از دو صافی شاهد PTFE

مراجع

1. A I Cirillo, G Tomaiuolo, and S Guido, *Micromachines* **12** (2021) 820
2. U Tocoglu, M Alaf, O Cevher, H Akbulut, and J Nanosci. *Nanotechno.* **12** (2012) 9169.

3. M M Zaeri, S Ziaei-Rad, A Vahedi, and F Karimzadeh, *Carbon* **48** (2010) 3916.
4. L F Dumée, K Sears, J Schütz, N Finn, C Huynh, S Hawkins, M Duke, and S Gray, *J. Membr. Sci.* **351** (2010) 36.
5. Z Wang, Z Liang, B Wang, C Zhang, and L Kramer, *Compos.: Part A* **35** (2004) 1225.
6. J Hua Han, H Zhang, M Ji Chen, G Rui Wang, and Z Zhang, *Compo. Sci. Technol.* **103** (2014) 63.
7. M T Byrne and K Y Gun'ko, *Adv. Mater.* **22** (2010) 1672.
8. S A Mishra, S Bhagat, and S Chinchole, *Int. J. Innov. Sci., Eng. Technol.* **2** (2015) 493.
9. D Wang, P Song, C Liu, W Wu, and S Fan, *Nanotechnol.* **19** (2008) 075609.
10. C Sekar and C Subramanian, *Vacuum* **47** (1996) 1289.
11. S Sankal and C Kaynak, *J. Rein. Plast. Comp.* **32** (2013) 75.
12. M Farbod, A Ahangarpour, and SG Etemad, *Particuology* **22** (2015) 59.