

شیرین سازی و گندزدایی آب با استفاده از دستگاه یون‌زدایی خازنی با الکترودهای گرافن اکساید-دندریمر-نقره

فاطمه جان‌پور^۱، علی تریابیان^{۲*}، همایون احمد پناهی^۳، مجید بغدادی^۴، فریما سعیدی^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه فنی، دانشگاه تهران
Janpoor@ut.ac.ir
۲. استاد تمام، دانشکده محیط‌زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
۳. استاد تمام، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز
h.ahmadpanahi@iauctb.ac.ir
۴. استادیار، دانشکده محیط‌زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
m.baghdadi@ut.ac.ir
۵. کارشناس آزمایشگاه، دانشکده محیط‌زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
farimasaeedi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

چکیده

در این تحقیق به منظور گندزدایی و شیرین سازی آب، نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره برای پوشش الکترودهای دستگاه یون‌زدایی خازنی سنتز شد. خصوصیات نانوذرات سنتز شده توسط آنالیز FTIR، TGA و FESEM مشخص شد. تأثیر پارامترهایی نظیر شوری یا محلول آب‌نمک با میزان شوری ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان کلی فرم ورودی ۵۰ تا ۱۰۰۰۰۰ ام‌پی‌ان (MPN) و تأثیر زمان ماند در مدت زمان ۵ تا ۹۰ دقیقه ارزیابی شد. این سیستم قابلیت حذف یون‌ها از آبی با میزان شوری ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر با راندمان ۹۸ درصد را در مدت زمان ۹۰ دقیقه و قابلیت حذف ۹۹/۹ درصد از ۱۰۰۰ ام‌پی‌ان کلی فرم ورودی را در مدت زمان ۳۰ دقیقه، ۱۰۰۰۰ ام‌پی‌ان را در مدت ۶۰ دقیقه داشتند. ولتاژ کاربردی این سیستم ۲ ولت است. این سیستم قابلیت جذب بالا در مرحله حذف یون‌ها و واجذب بالا در مرحله شستشوی الکترودها در مدت زمان چند دقیقه دارد، بنابراین می‌تواند به صورت پیوسته کار کند. به دلیل پیوند قوی دندریمر و گرافن اکساید و کمپلکس میان نانوذرات نقره و دندریمر احتمال انتشار نانوذرات نقره در آب وجود ندارد. بنابراین این سیستم یک راهکار مناسب و ایمن برای استفاده از نانوذرات نقره در تصفیه آب به شمار می‌رود.

کلیدواژه

دندریمر، گندزدایی، نانوذرات نقره، یون‌زدایی خازنی.

۱. سرآغاز

در حال حاضر، بیشتر موادی که برای ضدعفونی آب استفاده می‌شوند برای از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای موجود در آب آشامیدنی به‌طور کامل مؤثر نیستند یا محصولات جانبی تولید می‌کنند که برای سلامتی انسان مضر هستند. همچنین برخی از این ضدعفونی‌کننده‌ها سمی هستند (Deborde & von Gunten, 2008). کلرزنی، فرایندی ارزان و همچنین به دلیل تأثیر در

با رشد جمعیت، توسعه صنایع و افزایش آلودگی منابع آب شیرین، دسترسی به آب کافی و ایمن در اکثر کشورها به بحرانی جدی تبدیل شده است. از نیمه دوم قرن بیستم، نیاز به آب با کیفیت بالا به طرز چشمگیری افزایش یافته است. نیاز به آب شیرین به سرعت افزایش یافته و منابع آب شیرین دیگر نمی‌توانند پاسخگوی تمام نیازها باشند (Miller 2003).

احتمالاً یک مکانیزم ایجاد رادیکال آزاد از سطح نقره است که مانع رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود. رادیکال‌های آزاد به لیپیدهای غشایی حمله می‌کنند و عوامل غشایی شکسته می‌شوند (Kim et al., 2007). تعامل با گروه‌های تیول در پروتئین‌ها و غیرفعال کردن فعالیت آنزیم یکی دیگر از مکانیسم‌های ضد میکروبی یون‌های نقره است. فعالیت آنزیم با یک گروه تیول انجام می‌شود (Feng et al., 2008). همچنین، هنگامی که میکروارگانیسم‌ها در معرض یون‌های نقره قرار بگیرند، دی‌ان‌ای آن‌ها توانایی تکرار خود را از دست می‌دهد و این امر باعث آسیب یا مرگ میکروارگانیسم‌ها می‌شود (Feng et al., 2008).

با وجود خاصیت ضدباکتریایی خوب نقره، نانوذرات نقره به دلیل خصوصیات سطح و فوتوکاتالیستی می‌توانند باعث آسیب اکسیداتیو سلول‌های اطراف شوند و همچنین به دلیل انتشار پایدار Ag⁺ فعالیت بیولوژیکی سمی قابل ملاحظه‌ای دارند. نانوذرات نقره به‌طور قابل توجهی سمی‌تر از یون‌های نقره هستند و همچنین به دلیل مقیاس نانو در مقایسه با اندازه میکرو یون‌های نقره خاصیت ضدباکتریایی بیشتری دارند.

مطالعات بی‌شماری آثار سمی نانو ذرات نقره را بر سلول‌های بنیادی و کبد موش، سیستم عصبی و ریه انسان و همچنین خاصیت سمی برای موجودات آبی را نشان داده‌اند (Stensberg et al., 2011). بنابراین برای استفاده از خواص ضد عفونی‌کنندگی نانوذرات نقره باید راه‌حلی برای جلوگیری از انتشار آن در آب یافت. روش جدید قرار دادن ماده ضد میکروبی بر سطح حامل‌هایی مانند کربن فعال، اکسید گرافن و تشکیل کامپوزیت است (Rai et al., 2012). نانوکامپوزیت‌های ضد عفونی‌کننده، به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد و افزایش واکنش‌پذیری عوامل ضد میکروبی نانو، می‌توانند به‌طور مؤثری میکروارگانیسم‌ها را غیرفعال سازند (Kim et al., 2011).

در تحقیقی از دانه‌های کربن فعال پوشش داده شده با نانوذرات نقره استفاده شد که اثربخشی خوبی در

آبگیر، یکی از متداول‌ترین روش‌های ضد عفونی آب در جهان است. در حین ضد عفونی آب توسط کلر برای از بین بردن ویروس‌ها و باکتری‌های مضر، در اثر واکنش بین کلر و ترکیبات آلی موجود در آب موادی به‌عنوان فرآورده‌های جانبی ضد عفونی² (DBP) تشکیل می‌شوند. برای نمونه تری‌هالومتان‌ها و هالواستیک اسید دو نوع فرآورده‌های جانبی ضد عفونی هستند که خطر ابتلا به سرطان در جوامع انسانی را افزایش می‌دهند (Deborde & von Gunten, 2008).

امروزه به دلیل آلودگی‌های میکروبی که در مقابل تصفیه‌های متداول مقاوم شده‌اند و همچنین سایر مضرات روش‌های ضد عفونی موجود، یافتن روش‌های جدید با راندمان بالا، هزینه مناسب و مؤثر بر طیف گسترده‌ای از باکتری‌های بیماری‌زا، مورد توجه قرار گرفته است (Ji, 2013). در حال حاضر نانوذرات با پتانسیل ضدباکتریایی چند منظوره، امیدهایی را برای حل مشکل باکتری‌های مقاوم به دارو ایجاد کرده است (Anderson et al., 2010). برخی از داروهای ضد میکروبی مانند پلیمرهای کاتیونی و پپتیدها با مکانیسم تماس مکانیکی عمل می‌کنند. هنگام قرار گرفتن در معرض باکتری‌ها، با مختل کردن سیتوپلاسم سلولی، باکتری‌ها را از بین می‌برند. احتمالاً این مکانیسم، مقاومت میکروبی ایجاد نمی‌کند، اما از آنجایی که هم سلول‌های باکتریایی و هم پستانداران را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ضد عفونی کردن آب آشامیدنی با استفاده از این روش ممنوع است (Li et al., 2011).

نقره نیز یکی از مؤثرترین آنتی‌بیوتیک‌ها است که در تاریخ بشر شناخته شده است و می‌تواند بیش از ۶۵۰ باکتری مختلف را در عرض چند دقیقه از بین ببرد و از قرن نوزدهم به عنوان ماده ضد میکروبی استفاده شده است (Tashi et al., 2016). اخیراً، نانوذرات نقره، ماده ضد میکروبی در نظر گرفته شده است که با طیف گسترده‌ای از باکتری‌های بیماری‌زا مقابله می‌کنند. با وجود خاصیت ضد میکروبی نانوذرات نقره، مکانیسم آن هنوز مشخص نیست (Franci et al., 2015).

ویژگی های جذب و گروه های اصلی شیمیایی قرار گرفته روی سطح الکتروود دارد (Hou *et al.*, 2006). بر اساس تحقیقات انجام گرفته الکترودهای ساخته شده با کربن ایروزلها رفتار خوبی در نمکزدایی از آبی با غلظت ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم در لیتر با جریان ۱/۵ آمپراز خود نشان دادند (Massoudinejad *et al.*, 2018). در تحقیق دیگری که بر الکترودهای گرافن ژل صورت گرفته است الکترودهای هیدروژل راندمان بهتری نسبت به الکترودهای ایروزل در حذف یونها از محلول آب نمک با غلظت ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر از خود نشان دادند (Ma *et al.*, 2018). گزارشها نشان می دهد که سیستم یون زدایی خازنی با الکترودهای شناور نیز قابلیت بالایی در شیرین سازی از آبی با غلظت نمک ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی گرم در لیتر را دارند و می توانند میزان یونهای موجود در آب لب شور را تا میزان مجاز آب آشامیدنی (۵۰۰ میلی گرم در لیتر) کاهش دهند (Zhang *et al.*, 2019). نتایج خوب سیستم یونزدایی خازنی در نمکزدایی آب، امکان استفاده از این سیستم را برای از بین بردن مواد آلی، عوامل میکروبی و سایر آلاینده های آب فراهم می آورد (Laxman *et al.*, 2015). خاصیت گندزدایی آب توسط الکتروود پوشش داده شده به وسیله پارچه کربن فعال به وسیله جذب باکتری های گرم منفی روی الکتروود با بار مثبت گزارش شده است (Laxman *et al.*, 2015). همچنین الکترودهای پوشش داده شده با نانوکامپوزیت گرافن اکساید-چیتوسان خاصیت از بین بردن ۹۹/۹ درصد E. coli را در محلول کلرید سدیم با غلظت ۱۰۰-۲۰۰ میلی گرم در لیتر را ۵ ساعت داشتند. با توجه به راندمان بسیار خوب این سیستم در از بین بردن آلودگی میکروبی، زمان لازم برای گندزدایی با استفاده از این روش بسیار بیشتر از سیستم های گندزدایی متداول است (Wang *et al.*, 2015). سیستم یونزدایی خازنی یک روش یونزدایی از آب به صورت پیوسته است که بر پایه جذب یون روی الکتروودها در مرحله یونزدایی و جدا شدن یونها از سطح الکتروود در مرحله شستشو عمل

ضد عفونی آب نشان دادند (El-Aassar *et al.*, 2013). اما با توجه به احتمال فرار کربن فعال از مخازن فیلتر در اثر خرد شدن و انتقال آن به آب تصفیه شده، نمی تواند یک سیستم ایمن برای استفاده در تصفیه آب و ضد عفونی آب آشامیدنی باشد.

گرافن اکساید در دهه های اخیر انتخاب خوبی برای مواد کامپوزیت بوده است (Stankovich *et al.*, 2006). گرافن اکساید ماده ای دو بُعدی است که از اتم های کربن در یک شبکه لانه زنبوری کریستالی تشکیل شده است (Santos *et al.*, 2011). خواص ضد باکتریایی گرافن اکساید و کامپوزیت های آن با استفاده از مکانیسم های شیمیایی و فیزیکی گزارش شده است (Szunerits *et al.*, 2016). با توجه به خاصیت نانوذرات گرافن اکساید و نقره، ترکیب آنها برای دستیابی به خواص آنتی بیوتیکی بهتر پیشنهاد شده است (Vi *et al.*, 2018). کامپوزیت های گرافن اکساید و نقره با ۴۰ درصد وزنی نقره، عملکردی مشابه نانوذرات نقره از خود نشان داده اند (Chook *et al.*, 2012). همچنین محققان نشان داده اند که به دلیل اثر هم افزایی نانوذرات نقره و اکسید گرافن، ترکیب این دو ماده خاصیت ضد باکتریایی بهتری دارد (Sheet *et al.*, 2011; Bao *et al.*, 2013). با وجود خاصیت ضد میکروبی خوب نانوکامپوزیت گرافن اکساید نقره، به دلیل ضخامت نانو این مواد، در آب پایدار است و با روش های مرسوم امکان حذف آن از آب آشامیدنی وجود ندارد (Wang *et al.*, 2015). بنابراین، برای استفاده از این نانوکامپوزیتها در ضد عفونی کردن آب آشامیدنی، باید از روشی استفاده شود که بتواند این مواد را تثبیت کند و از انتشار و تعلیق آنها در آب جلوگیری کند. تکنولوژی جدید مورد استفاده در تصفیه آب سیستم یون زدایی خازنی است. فن آوری یونزدایی خازنی روشی برای حذف یونها از آب شور با الکترودهای کربن فعال است (Duyen *et al.*, 2016). راندمان کلی سیستم یونزدایی بستگی به خصوصیات سطح الکتروودها مانند سطح ویژه، توزیع و اندازه تخلخل،

سیستم گندزدایی بدون آنکه مواد جانبی مضر برای سلامتی انسان بر جای بگذارد و همچنین شیرین سازی آب بدون استفاده از مواد شیمیایی به وسیله ترکیب صفحات گرافن اکساید و نانو ذرات نقره، یک نانوکامپوزیت جدید به نام گرافن اکساید-دندریمر-نقره ساخته شد. برای استفاده از خواص این نانوکامپوزیت در گندزدایی آب آن را بر الکترودهای سیستم یونزدایی خازنی تثبیت کردیم. در ساخت این نانوکامپوزیت از پلیمرهای درخت سان برای استفاده از خواص پلیمرها در گندزدایی و همچنین قرار دادن نانوذرات نقره روی سرشاخه‌های پلیمرها برای برخورد بیشتر نانوذرات نقره با میکروارگانیسم‌ها و بالاتر رفتن راندمان گندزدایی استفاده شد. همچنین برای استفاده از تمام سطح مؤثر الکترودها و عدم به وجود آمدن اتصال کوتاه، همانند حوضچه‌های کلرزی از بافل هلب جداکننده استفاده شده است.

برای ساخت این سیستم تصفیه، در مرحله نخست نانوکامپوزیت گرافن اکساید نقره سنتز شد. پلیمرهای درخت سان روی صفحات گرافن اکساید قرار داده شدند. سپس برای کارایی بالاتر برای گندزدایی نانوذرات نقره روی سرشاخه‌های پلیمر درخت سان قرار گرفتند. قرار گرفتن دندریمر روی صفحات گرافن اکساید باعث به وجود آمدن خواص جدید مانند اندازه منافذ با طیف گسترده و سطح مخصوص می‌شود (Wang et al., 2013). در مرحله بعد، یک لایه نازک از نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره روی الکترود کربن فعال قرار گرفت. با این الکترود جدید سیستم یونزدایی خازنی دارای خاصیت بسیار خوب یونزدایی و گندزدایی می‌شود. این الکترودها قابلیت کشتن ۹۹/۹ درصد از کلی‌فرم‌های موجود در آب با میزان کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰۰۰ ام‌پی‌ان در آب با غلظت نمک ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر را دارند. همچنین این الکترودها دارای خاصیت خوب گندزدایی در آب با شوری ۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر را نیز دارند. این الکترودها توانایی شیرین‌سازی آب و رساندن یون‌ها

می‌کند (Wang et al., 2015). یونزدایی خازنی فرایند نمک‌زدایی از آب شور و لب‌شور مبتنی بر جذب یون‌های نمک روی الکترودهایی است که به آن‌ها ولتاژ مستقیمی اعمال شده است. درست مشابه فرایندی که در یک آبرخازن رخ می‌دهد. این سیستم دارای چرخه‌های جذب و واجذب یون است. در مرحله جذب ولتاژ به دو سر الکترودهای سل اعمال می‌شود که باعث ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکترود می‌شود (شکل ۱). در اثر وجود میدان الکتریکی یون‌های محلول جابه‌جا شده و به سمت قطب مخالف حرکت می‌کند، به این صورت که کاتیون‌ها به سمت قطب منفی و آنیون‌ها به سمت قطب مثبت حرکت کرده و جذب الکترودها می‌شوند. در این مرحله جذب الکترود استاتیک صورت می‌گیرد که این مرحله اصطلاحاً با عنوان جذب یون یا مرحله شارژ معرفی می‌شود. مرحله دوم مرحله واجذب است که پس از اتمام عملیات جذب، ولتاژ اعمالی به سیستم معکوس یا صفر می‌شود یا اتصال کوتاه بین دو الکترود برقرار می‌شود که اصطلاحاً به آن مرحله بازیابی یا دشارژ گفته می‌شود. با معکوس کردن ولتاژ، یون‌های جذب شده از سطح الکترود به داخل محلول رانده شده و در نتیجه الکترودها بازیابی می‌شوند و سپس می‌توان چرخه جدید را شروع کرد (Anderson et al., 2010).

به دلیل صرفه جویی در مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های دیگر شیرین سازی آب (Wang et al., 2019)، خاصیت احیاء خوب و عدم استفاده از مواد شیمیایی در مراحل جذب و واجذب یون‌ها، سیستم یونزدایی خازنی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Wang et al., 2015). این سیستم با الکترودهای اصلاح شده می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در گندزدایی و شیرین‌سازی آب باشد. در این تحقیق، ما با استفاده از پوشش جدید از گرافن اکساید-دندریمر همراه با نانوذرات نقره روی الکترودهای کربن فعال به قابلیت بالایی از گندزدایی و شیرین‌سازی آب دست یافتیم. برای به دست آوردن یک

دندریمر مرحله ۱ تا ۳ مجدداً تکرار می‌شود. سپس مواد جامد با دستگاه سانتریفیوژ از محلول جدا و در دمای ۳۰ درجه خشک می‌شود.

۳.۲. سنتز نانو ذرات نقره

برای سنتز نانو ذرات نقره، ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول ۲ میلی‌مولار سدیم بروهیدرید آماده شده و داخل یک مخزن یخ روی همزن مغناطیسی قرار داده می‌شود. نیترات نقره ۱ میلی‌مولار به صورت قطره‌قطره اضافه می‌شود (حدوداً ۳ دقیقه) تا رنگ زرد کم‌رنگ به دست آید. در این لحظه نانوذرات نقره به دست آمده است. (Sharifi et al., 2018)

۴.۲. سنتز نانو کامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره

گرافن اکساید-دندریمر سنتز شده در مراحل قبل به محلول نانوذرات نقره اضافه می‌شود و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق با همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود. در این مرحله، نانوذرات نقره روی سرشاخه‌های دندریمرها (پلیمرهای درخت‌سان) قرار می‌گیرند.

۵.۲. ساخت الکترودهای سیستم یون‌زدایی خازنی با پوشش نانو کامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره

پودر کربن فعال با پلی‌وینیلیدن فلوراید به نسبت وزنی ۹ به ۱ در محلول بدون آب دی‌متیل فرم‌امید حل می‌شود. سپس برای به دست آمدن یک محلول یکنواخت در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۱۵۰۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود. یک لایه نازک از محلول روی گرافیت فویل ریخته شده و در فشار اتمسفر برای ۲ ساعت در آن قرار داده می‌شود تا خشک شود. مرحله بعد قرار دادن لایه گرافن اکساید دندریمر نقره روی لایه کربن فعال قرار داده شده روی گرافیت فویل است. گرافن اکساید-دندریمر-نقره با نسبت وزنی یکسان با پلی‌وینیلیدن فلوراید همراه با محلول بدون آب دی‌متیل فرم‌امید به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۱۵۰۰۰ قرار داده می‌شود. یک لایه نازک از محصول به دست آمده روی لایه کربن فعال

محلول در آب را از میزان ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر را در مدت زمان ۹۰ دقیقه دارند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد

گرافن اکساید، کربن فعال، اسید کلریدریک، هیدروکسید سدیم، اپی کلرو هیدرین، سدیم بروهیدرید، سولفید سدیم، استات سدیم، و نیترات نقره از شرکت مرک آلمان تهیه و استفاده شدند.

۲.۲. قرار گرفتن دندریمر بر روی صفحات گرافن

اکساید

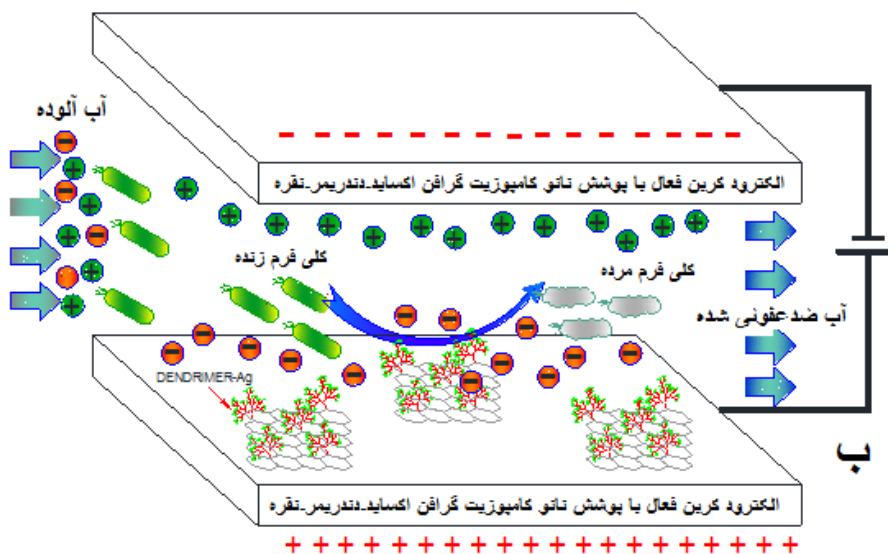
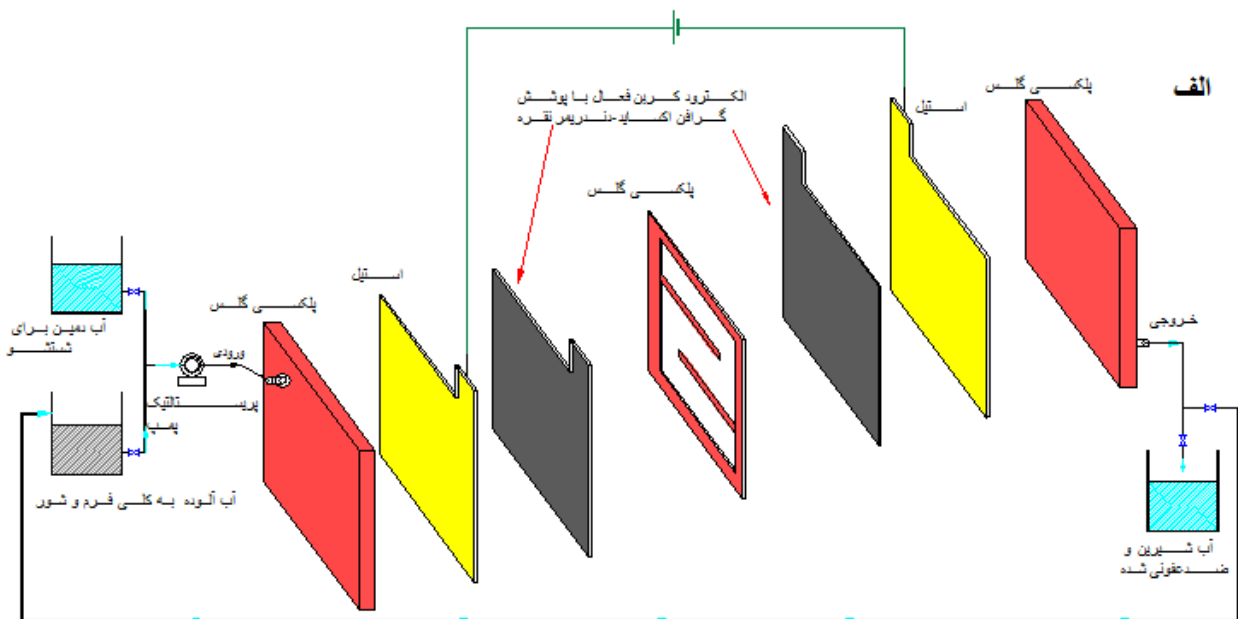
نخست برای آماده‌سازی گرافن اکساید در سنتز نانو کامپوزیت، شستشوی اولیه انجام می‌گیرد. ۲ گرم گرافن اکساید با اسید هیدروکلریک ۱ درصد مخلوط شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق هم زده می‌شود. سپس با آب دمین شستشو داده می‌شود تا پ هاش آب شستشو با پ هاش آب دمین برابر شود. سپس با دستگاه سانتریفیوژ با ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه گرافن اکساید از آب جدا می‌شود.

پس از مرحله شستشوی اولیه، در مرحله نخست سنتز، ۲ گرم گرافن اکساید شسته شده با یک گرم سدیم بروهیدرید با ۴۰ میلی‌گرم اپی کلرو هیدرین و ۶۰ میلی‌لیتر محلول ۲ مولار هیدروکسید سدیم مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و در دمای اتاق به‌وسیله همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود. سپس مواد جامد به‌وسیله دستگاه سانتریفیوژ از مایع جدا می‌شوند. در دومین مرحله، ماده به دست آمده از مرحله نخست با اسید ادرصد شستشو داده می‌شود و به مدت ۶ ساعت در دمای اتاق مخلوط شده و سپس با دستگاه سانتریفیوژ مواد جامد از محلول جدا می‌شود. مرحله اول و دوم دوباره تکرار شده و سپس مرحله سوم آغاز می‌شود. در این مرحله، ۵۰ میلی‌لیتر محلول سولفید سدیم ۰/۵ مولار و بافر ۵ استات سدیم با گرافن اکساید ترکیب شده و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت با همزن مغناطیسی هم زده می‌شود. بعد از مرحله سوم برای به دست آوردن تعداد شاخه‌های بیشتر

۶.۲. اندازه‌گیری و آنالیز مواد

طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل شده فوریه^۳ (FT-IR) توسط FT-IR-410 برای توصیف مولکول‌ها انجام شد (JASCO ژاپن). میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدان با طیف سنج پراکندگی انرژی یکپارچه^۴ (FE-SEM / EDS) برای تعیین ترکیب شیمیایی و مورفولوژی گرافن اکساید و گرافن اکساید-دندریمر-تقره (Sigma VP، آلمانی) استفاده شد.

ریخته شده و به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد (Wang et al., 2015). ضخامت نهایی لایه تشکیل شده در حدود ۲۰ میکرون است. در نهایت، گرافیت فویل روی الکترودهای فلزی با چسب رسانا چسبانده می‌شود. مساحت الکترودها ۱۰۰ سانتی‌متر مربع است و میزان ماده گندزدایی موجود روی الکترودها در حدود ۳/۶ گرم بر مترمربع است.



شکل ۱. الف. شماتیک چیدمان سلول یون‌زدایی خازنی، ضد عفونی مداوم آب و بازسازی الکترودها. ب. شماتیک ضد عفونی و نمک‌زدایی از آب هنگام عبور از میان ۲ الکتروده

$$\text{درصد حذف کلی فرم} = ((C_0 - C_e) / C_0) \times 100\%$$

$$\text{LR} = \text{Log}_{10}(C_0) - \text{Log}_{10}(C_e)$$

CO (MPN): میزان کلی فرم قبل از تصفیه

Ce (MPN): میزان کلی فرم بعد از تصفیه

۳. بحث و نتیجه گیری

۱.۳. تعیین خصوصیات

۱.۱.۳. بررسی طیف‌های FTIR مراحل مختلف

برای توصیف میزان خلوص و وجود پیوندهای شیمیایی در نانوکامپوزیت سنتز شده، از طیف سنجی مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل طیف سنجی مادون قرمز نانوصفحات گرافن اکساید، گرافن اکساید-دندریمر و گرافن اکساید-دندریمر-نقره در شکل ۲ نشان داده شده است.

در آنالیز اکسید گرافن سنتز شده، (شکل ۲ الف) عدد 3422 cm^{-1} نشان داده شده در قله نمودار مربوط به پیوند OH، عدد 1704 cm^{-1} مربوط به پیوند $C=O$ ، 1053 cm^{-1} مربوط به CO و 1460 cm^{-1} مربوط به CH_2 است.

در آنالیز گرافن اکساید-دندریمر سنتز شده (شکل ۲ ب)، عدد 3412 cm^{-1} نشان داده شده در قله نمودار مربوط به پیوند OH، عدد 2923 cm^{-1} مربوط به CH الیفاتیکی، عدد 1618 cm^{-1} مربوط به پیوند OH خارج صفحه‌ای، 1384 cm^{-1} مربوط به CH_2 و 1107 cm^{-1} مربوط به CO است.

همچنین در آنالیز نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره (شکل ۲ ج)، عدد 3418 cm^{-1} نشان داده شده در قله نمودار مربوط به پیوند OH، عدد 2923 cm^{-1} مربوط به CH الیفاتیکی، عدد 1721 cm^{-1} مربوط به پیوند OH خارج صفحه‌ای، 1580 cm^{-1} مربوط به $C=C$ و 1111 cm^{-1} مربوط به CO و 2275 cm^{-1} مربوط به پیوند SH است.

تجزیه و تحلیل گرماسنجی (TGA^4) در محدوده دمای ۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد و تحت تصفیه نیتروژن با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی گراد در دقیقه بر Q2000 DSC (با دستگاه TA Instrument، ساخت کشور آمریکا) برای نشان دادن پیوندهای قوی دندریمر روی سطح گرافن اکساید انجام شد. دما و پ هاش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Ultra meter II ساخت شرکت Myron L مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. میزان شوری نمونه‌ها نیز توسط هدایت‌سنج Metrohm اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری میزان کلی فرم‌ها نیز به وسیله کیت‌های میکرو بسنج microbCheck-c/e AS-71 انجام گرفت.

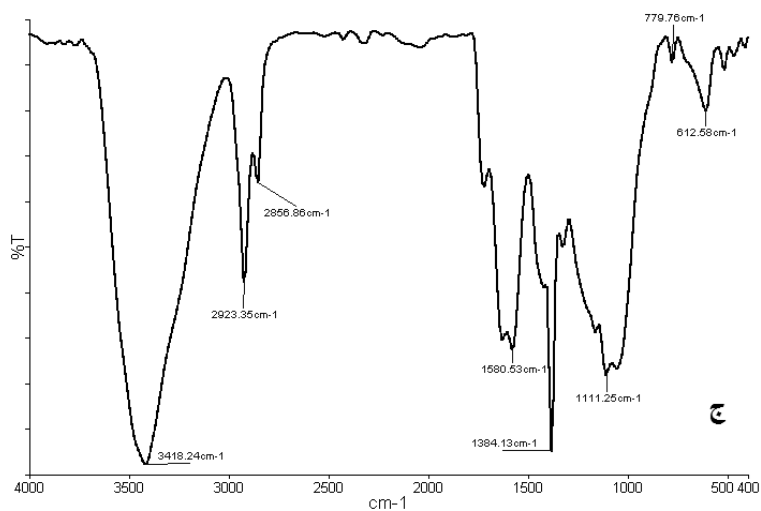
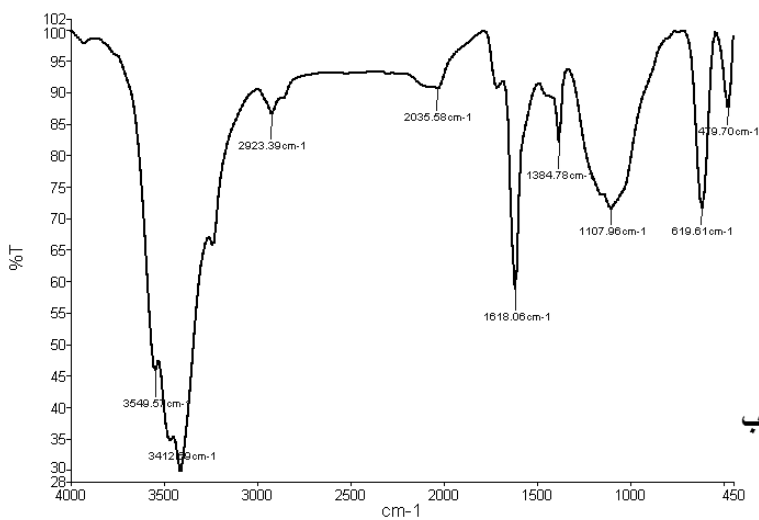
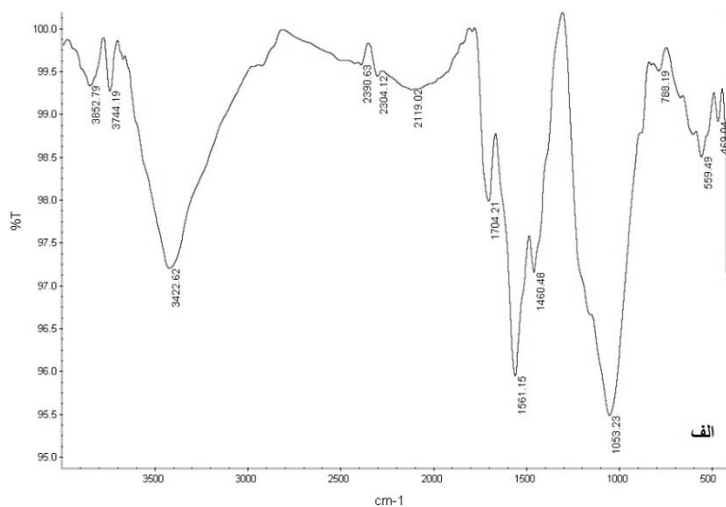
۷.۲. آماده‌سازی محلول اولیه

محلول آب‌نمک با میزان شوری متفاوت ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر و میزان کلی فرم ورودی ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ام‌پی‌ان برای ارزیابی قدرت یونزدایی و گندزدایی الکترودهای جدید ساخته شده با روکش نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره در دستگاه یونزدایی خازنی تهیه شد. همچنین نمونه آب چاه و نمونه آب دریای خزر برای تأثیر این دستگاه روی نمونه آب‌های واقعی آزمایش شد.

۸.۲. محاسبه لگاریتم کاهش و درصد حذف کلی

فرم و یونها در دستگاه یونزدایی خازنی

در این تحقیق، سیستمی بسته با جریان در گردش مداوم برای ارزیابی کارایی دستگاه آزمایش شد. این سیستم شامل دستگاه یونزدایی خازنی و پرستالیتیک پمپ است. محلول به وسیله پمپ از میان الکترودهای دستگاه یونزدایی خازنی عبور کرده و آب خروجی از سل‌ها وارد بشر شده و دوباره به اول سل‌ها برای عبور از میان صفحات الکترودها برمی‌گردد. میزان دبی پمپ ۳۰ میلی لیتر بر دقیقه و ثابت است. سیستم یونزدایی خازنی تحت شرایط متفاوت کلی فرم ورودی ارزیابی شد. میزان لگاریتم کاهش کلی فرم توسط معادله زیر محاسبه شد.



شکل ۲. الف. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز مربوط به گرافن اکساید. ب. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز مربوط به گرافن اکساید همراه با دندریمر. ج. آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز مربوط به نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره

۱۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد با شیب ملایم به دلیل از دست رفتن گروه‌های OH و COOH و تخریب بافت گرافن اکساید در ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد و ۲۳/۴ درصد کربن در ۶۰۰ درجه سانتی گراد باقی مانده است.

همچنین در آنالیز حرارتی گرافن اکساید -دندریمر- نقره، کاهش ۵ درصدی وزن کل به علت از دست دادن آب جذب شده مشاهده شد. در دمای ۲۵۰ به ۴۰۰ درجه سانتی گراد، کاهش کلی ۲۸ درصدی با یک شیب تند به دلیل از بین رفتن دندریمرهای قرار گرفته روی سطح گرافن اکساید مشاهده شد. سرانجام، در محدوده ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد، تقریباً ۳۸ درصد تخریب بافت گرافن اکساید مشاهده شد و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد تنها ۲۲/۷۷ درصد کربن باقی مانده است.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل TGA و تفاوت در تخریب حرارتی نمونه‌ها شکل‌گیری مناسب دندریمرها بر سطح اکسید گرافن در نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره را نشان داد.

۲.۱.۳. طیف سنج میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM/EDS)

از طیف‌سنج میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM/EDS) برای تعیین مورفولوژی، اندازه گیری اندازه و ترکیب شیمیایی گرافن اکساید و گرافن اکساید-دندریمر-نقره استفاده شد. نتایج آنالیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

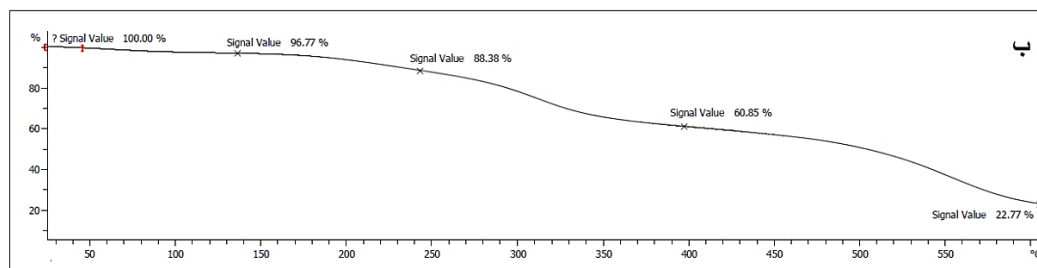
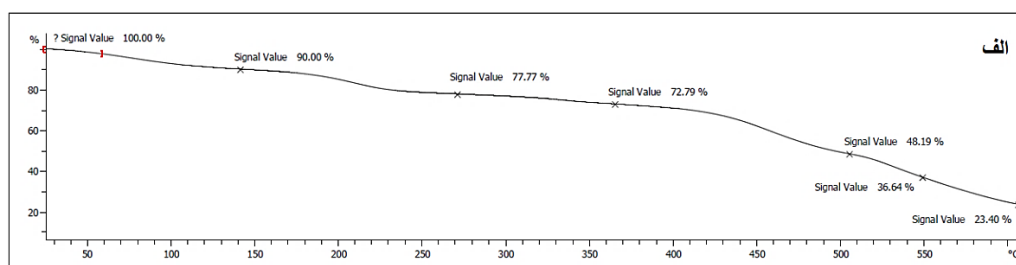
تجزیه و تحلیل مقدماتی گرافن اکساید-دندریمر-نقره با استفاده از تجزیه و تحلیل EDS درصد کربن، اکسیژن، گوگرد و نقره را مشخص کرد. مقایسه این اعداد با نتایج آنالیز گرافن اکساید، سنتز صحیح نانوکامپوزیت را به خوبی تأیید کرده است.

۳.۱.۳. تجزیه و تحلیل گرمایی (TGA)

تجزیه و تحلیل گرمایی گرافن اکساید و گرافن اکساید-دندریمر-نقره در محدوده ۰-۶۰۰ درجه سانتی گراد برای آنالیز حرارتی استفاده شد. کاهش ۱۰ درصدی وزن کل اکسید گرافن در دمای ۰ تا ۱۵۰ درجه به دلیل از بین رفتن آب جذب شده گرافن بود. کاهش ۱۸ درصدی وزن کل در

جدول ۱. اطلاعات EDS مربوط به عناصر موجود در گرافن اکساید و نانوکامپوزیت گرافن اکساید-دندریمر-نقره

ماده	کربن	اکسیژن	نقره	گوگرد
گرافن اکساید	٪۷۵/۶	٪۲۴/۴	-	-
گرافن اکساید-دندریمر-نقره	٪۶۴/۳	٪۱۷	٪۵/۸	٪۰/۵



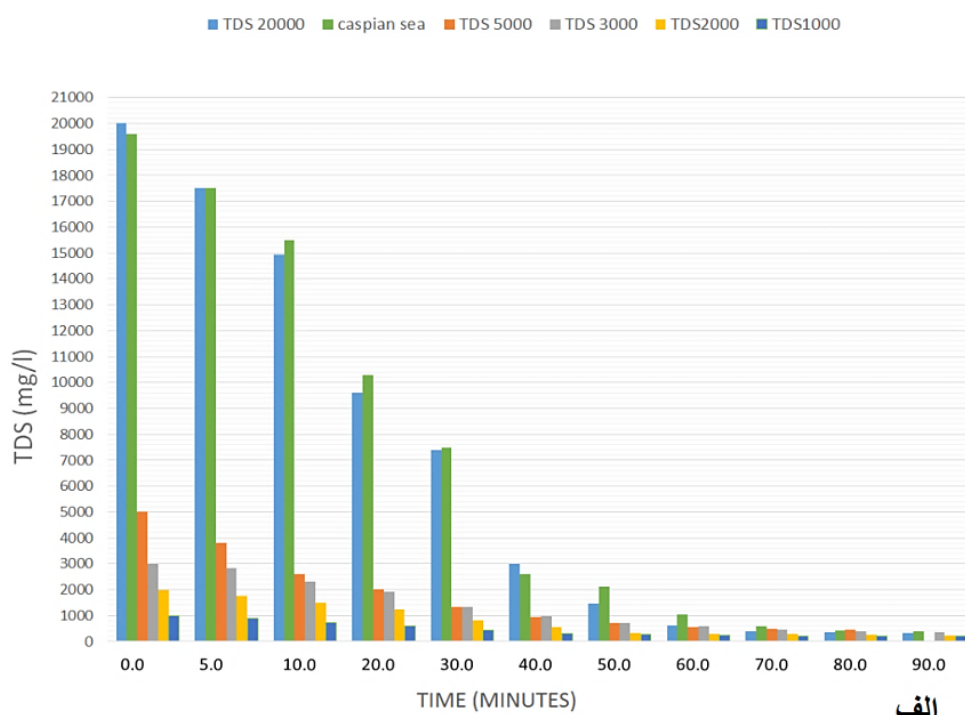
شکل ۳. منحنی تجزیه و تحلیل TGA مربوط به الف. گرافن اکساید، و ب. گرافن اکساید-دندریمر-نقره، در محدوده ۰-۶۰۰ درجه سانتی گراد با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی گراد در دقیقه

همچنین نمونه از آب دریای خزر نیز با میزان شوری ۲۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر برای مقایسه با نمونه های محلول آب نمک آزمایش شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهند که این سیستم قابلیت بالایی در یون زدایی آب و رساندن یون های محلول در آب تا میزان مجاز آب آشامیدنی دارد (شکل ۴ الف).

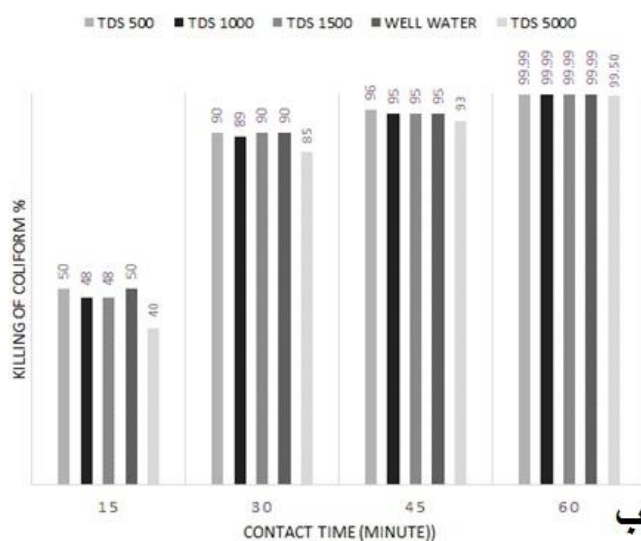
۲.۳. تأثیر داده های تجربی بر شیرین سازی و گندزدایی توسط سیستم یون زدایی خازنی

۱.۲.۳. تأثیر میزان شوری آب و زمان ماند

محلول آب نمک با غلظت ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر در مدت زمان تماس ۵ تا ۹۰ دقیقه برای تعیین قابلیت شیرین سازی آب آزمایش شد.



الف



ب

شکل ۴. الف. تأثیر میزان شوری بر شیرین سازی آب در سیستم یون زدایی. ب. قابلیت هم زمان شیرین سازی - گندزدایی آب در سیستم یون زدایی خازنی

کلی فرم‌های مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ ام‌پی‌ان) در محلول آب‌نمک با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر (حداکثر غلظت مجاز آب آشامیدنی)، زمان تماس ۳۰ و ۶۰ دقیقه، $pH = 7$ آزمایش شد.

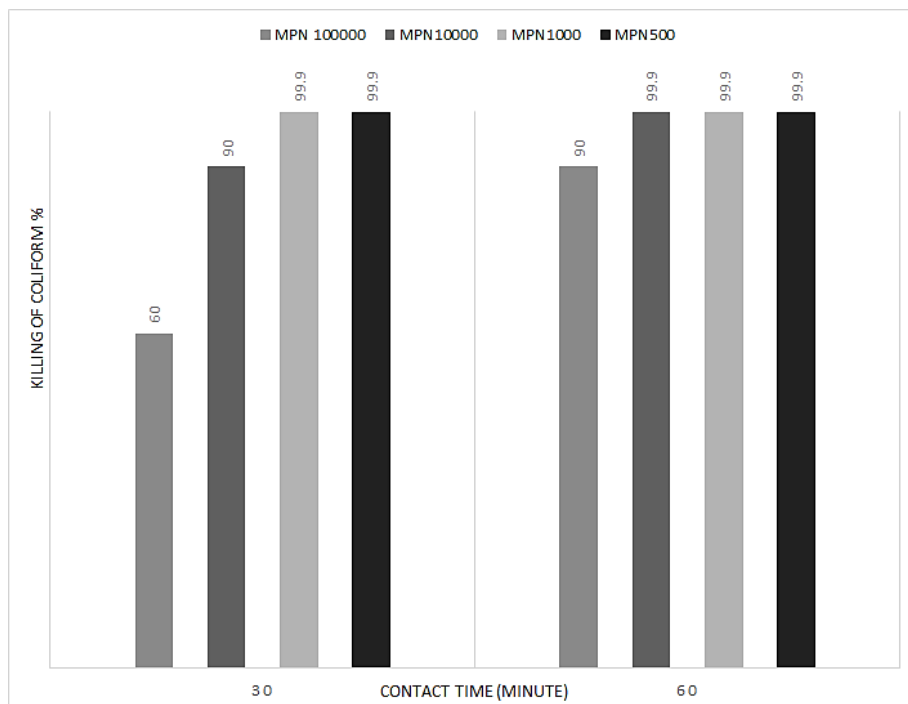
میزان حذف کلی فرم‌ها در زمان تماس ۳۰ و ۶۰ دقیقه در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان حذف کلی فرم در ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ام‌پی‌ان اولیه در ۳۰ دقیقه، ۹۹/۹۹ درصد بود. این زمان تماس شبیه به زمان مورد نیاز برای ضدعفونی در سیستم کلرزی متداول در تصفیه‌خانه است، اما این روش بدون استفاده از مواد شیمیایی و باقی گذاشتن مواد مضر در آب ضدعفونی شده است. همچنین این سیستم توانایی حذف ۹۹/۹ درصد برای کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰ ام‌پی‌ان در مدت ۶۰ دقیقه را دارد. با این حال، در میزان بالاتر کلی فرم ورودی به سیستم، حدود ۹۰ درصد کلی فرم‌ها در ۶۰ دقیقه حذف شد (شکل ۵).

همچنین برای تعیین قابلیت هم‌زمان یون زدایی-گندزدایی آب نمونه‌هایی با شوری ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر با کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰ ام‌پی‌ان و زمان تماس ۱۵ تا ۶۰ دقیقه برای تعیین تأثیر میزان شوری در حذف کلی فرم آزمایش شد.

نتایج آزمایش نشان دادند این سیستم قابلیت حذف ۸۰ درصدی شوری آب هم‌زمان با ضدعفونی آب را دارد. برای مثال، در زمان تماس ۶۰ دقیقه‌ای، میزان شوری آب از ۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش پیدا کرد. همچنین، برای مقایسه محلول آب‌نمک ساخته شده و نمونه واقعی آب، آب چاه با شوری ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰ آزمایش شد. نتایج آزمایش‌ها مشابه بود (شکل ۴ ب).

۲.۲.۳. تأثیر میزان کلی فرم ورودی

یکی از پارامترهای ارزیابی قدرت ضدعفونی‌کنندگی، میزان کلی فرم ورودی به سیستم است. برای این منظور،



شکل ۵. تأثیر میزان کلی فرم ورودی

۴. نتیجه گیری

گرافن اکساید-دندریمر-نقره یک نانوکامپوزیت جدید است که از نانو صفحات گرافن اکساید همراه با نسل جدیدی از دندریمرها (درخت سانها) که ساخته شده روی سرشاخه های آنها نانو ذرات نقره قرار گرفته است. برای ساخت الکترودهای جدید برای سیستم یونزدایی خازنی، لایه ای نازک از نانوکامپوزیت سنتز شده روی سطح الکترودهای کربن قرار می گیرد.

با توجه به پیوند کووالانسی بین دندریمر و گرافن اکساید و همچنین ایجاد پیوند قوی بین نانوذرات نقره و گوگرد در سرشاخه ها، امکان رها شدن نانوذرات نقره در آب تصفیه شده وجود ندارد، لذا این سیستم یک راه حل ایمن برای استفاده از نانوذرات نقره در ضدعفونی آب است. زمان تماس نیز یکی از عوامل مؤثر در کاهش کلی فرم از آب و همچنین شیرین سازی آب است. در آزمایش های انجام گرفته میزان شوری آب از ۲۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر را به ۳۲۰ میلی گرم در لیتر در مدت زمان ۹۰ دقیقه کاهش یافت و نشان داد که این الکترودها قابلیت شیرین سازی و حذف یونها از این آب را تا راندمان ۹۸ درصد را دارند. آزمایش ها به مدت ۱۵ تا ۱۲۰ دقیقه در آب آلوده با میزان کلی فرم ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ امپیان ارزیابی شد، که نشان داد این الکتروود دارای اثر

ضد عفونی کنندگی حداقل ۹۹/۹ درصد (لگاریتم کاهش ۴ روی کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰ ام پیمان) و ۹۰ درصد (لگاریتم کاهش ۵ روی کلی فرم ورودی ۱۰۰۰۰۰۰ ام پیمان) در مدت زمان تماس ۶۰ دقیقه است. همچنین این سیستم ۱۰۰۰۰۰ امپیان از کلی فرم ورودی را در زمان تماس ۱۲۰ دقیقه ای کاملاً حذف کرد. آزمایش ها نشان داده اند که این الکترودها قادر به ضد عفونی کردن آب تا میزان شوری ۵۰۰۰ میلی گرم در لیتر به همراه شیرین سازی آب هستند، در حالی که در تحقیقات مشابه قبلی فقط ضد عفونی با میزان شوری ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر توسط سیستم یون زدایی خازنی انجام شده است (Wang et al., 2015). ضد عفونی و شیرین سازی آب توسط سیستم یونزدایی خازنی با نسل جدید الکترودها به دلیل مصرف انرژی پایین (استفاده از ۲ ولت برای ضد عفونی)، بازسازی سریع الکترودها و ضد عفونی آب بدون هیچ گونه ماده جانبی مضر می تواند جایگزینی عالی برای فرایندهای ضد عفونی باشد.

یادداشت ها

1. Most Probable Number (MPN)
2. Disinfection by-products (DBPs)
3. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)
4. Field Emission Scanning Electron Microscopy with energy dispersive X-ray spectroscopy (FESEM/EDS)
5. Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

منابع

- Anderson, M. A., Cudero, A.L. and Palma, J. 2010 . Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete? *Electrochemical Acta*. 55: 3845–3856.
- Bao, Q., Zhang, D. and Qi, P. 2011 . Synthesis and characterization of silver nanoparticle and graphene oxide nanosheet composites as a bactericidal agent for water disinfection. *Journal of Colloid and Interface Science* 360: 463–470.
- Chook, S.W., Chia, C.H. and Zakaria, S. 2012 . Antibacterial performance of Ag nanoparticles and AgGO nanocomposites prepared via rapid microwave-assisted synthesis method. *Nanoscale Research Letters*. 7:541.
- Deborde and von Gunten. 2008. Reactions of Chlorine with Inorganic and Organic Compounds during Water Treatment_Kinetics and Mechanisms: A Critical Review. *Water Res.* 42: 13–51.
- Duyen, L.K., Nghiep, P.Q. and Kien, L.A. 2016. Capacitive deionization (CDI) for desalination using carbon aerogel electrodes. *Institute for tropicalisation and environment*. 155-164.
- El-Aassar, A.H.M., Said, M.M., Abdel-Gawad, A. M. and Shawky, H.A. 2013. Using silver nanoparticles coated on activated carbon granules in columns for microbiological pollutants water disinfection in abu rawash area, Great Cairo, Egypt. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1): 422-432.

- Feng, Q.L., Wu, J., Chen, G.Q., Cui, F.Z., Kim, T.N. and Kim, J.O. 2008. A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *John Wiley & Sons, Inc.* 52,: 662–668.
- Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G. and Galdiero, M. 2015. Silver Nanoparticles as Potential Antibacterial Agents. *Molecules*, 20: 8856-8874.
- Jl, F. 2013. Antimicrobial peptides stage a comeback. *Nat. Biotechnol.*, 31: 379–382.
- Hou, C-H., Liang, C., Yiaccoumi S., Dai, S. and Tsuris C. 2006. Electrosorption capacitance of nanostructured carbon-based materials. *Journal of colloid and interface science.* 302: 54-61.
- Kim, J.S., Kuk, E., Yu, K.N., Kim, J-H., Park, S.J., Lee, H.J., Kim, S.H., Park, Y. K. and et al. 2007 . Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine*, 3: 95–101.
- Kim, J.S., Kuk, E., Yu, K.N., Kim, J-H., Park S.J., Lee, H.J., Kim, S.H., Park, Y.k. and et al. 2011. Synthesis and characterization of silver nanoparticle and graphene oxide nanosheet composites as a bacteral agent for water disinfection. *Journal of colloid and interface science*, 360: 463-470.
- Laxman, K., Myint, M.T.Z., Abri, M.A., Sathé, P., Dobretsov, S. and Dutta, J. 2015. Desalination and disinfection of inland brackish ground water in a capacitive deionization cell using nanoporous activated carbon cloth electrodes. *Desalination*, 362: 126–132.
- Li, P., Poon, Y.F., Li, W., Zhu, H-Y., Yeap, S.H., Cao, Y., Qi, X., Zhou, C., Lamrani, M., Beuerman, R. W. and et al. 2011. A Polycationic Antimicrobial and Biocompatible Hydrogel with Microbe Membrane Suctioning Ability. *Nat. Mater.* 10: 149–156.
- Ma, J., Wang, L. and Yu, F. 2018. Water-enhanced performance in capacitive deionization for desalination based on graphene gel as electrode material. *Electrochimica Acta* .263.
- Massoudinejad, M., Hashempour, Y. and Mohammadia, H.,2017. Evaluation of carbon aerogel manufacturing process in order to desalination of saline and brackish water in laboratory scale. *Civil Engineering Journal.* 4:212-220.
- Miller, J.E. 2003. Review of water resources and desalination technologies. *Sand0800*.
- Rai, M.K., Deshmukh, S.D., Ingle, A.P. and Gade, A.K. 2012. Silver nanoparticles: the powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria . *Applied Microbiology* 112: 841–852.
- Santos, C.M., Tria, M. C. R., Vergara, R.A.M.V., Ahmed F., Advincula R.C. and Rodrigues D.F. 2011. Antimicrobial graphene polymer (PVK-GO) nanocomposite films. *Chem. Commun.* 47: 8892–8894.
- Sharifi, R., Hasani, A.H., Ahmad Panahi, H. and Borghei M. 2018. Performance of silver nanoparticle fixed on magnetic iron nanoparticles (Fe₃O₄-Ag/Fe₃O₄-Ag) in water disinfection. *Micro & Nano Letters.* 13: 436 – 441.
- Sheet, I., Holail, H., Olama, Z., Kabbani, A. and Hines, M. 2013 . The Antibacterial Activity of Graphite Oxide, Silver, Impregnated Graphite Oxide with Silver and GO-Coated Sand Nanoparticles against Waterborne Pathogenic *E.coli* BL21. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci. Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 2: 1-11.
- Stankovich, S., Dikin, D.A., Dommett, G.H.B., Kohlhaas, K.M., Zimney, E.J., Stach, E.A., Piner, R.D., Nguyen, S.T., Ruoff R.S. 2006. Graphene-based composite materials. *Nature* 442: 282-286.
- Stensberg, M.C., Wei, Q., McLamore, E.S., Porterfield, D.E., Wei, A., Sepúlveda, M.S. 2011. Toxicological studies on silver nanoparticles: challenges and opportunities in assessment, monitoring and imaging. *Nanomedicine (Lond).* 6: 879–898.
- Szunerits, S., Boukherroub, R. 2016. Antibacterial activity of graphene-based materials. *Journal of Materials Chemistry.* 4: 6892 – 6912.
- Tashi, T., Gupta, N.V. and Mbuya, V.B. 2016 . Silver nanoparticles: Synthesis, mechanism of antimicrobial action, characterization, medical applications, and toxicity effects. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research.* 8: 526-537.
- Vi, T.T.T., Kumar, S.R., Rout, B., Liu, C-H., Wong,C-B., Chang, C-W., Chen, C-H., Chen, D.W. and Lue, S.J. 2018 . The Preparation of Graphene Oxide-Silver Nanocomposites: The Effect of Silver Loads on Gram-Positive and Gram-Negative Antibacterial Activities. *Nanomaterials*.
- Wang, G., Qian, B., Dong, Q., Yang, J., Zhao, Z. and Qiu, J. 2013. Highly mesoporous activated carbon electrode for capacitive deionization. Separation and Purification Technology. 103 , 216–221. *Separation and Purification Technology*, 103 : 216–221.
- Wang, Y., El-Deen, A.G., Li, P., Oh, B.H.L. et al. 2015. High Performance Capacitive Deionization Disinfection (CDID) of Water with Graphene Oxide-graft-Quaternized Chitosan Nanohybrid Electrode Coating. ACS O\LOK\KNANO. *ACS NANO*.

Wang, L., Dykstra, J. E. and Lin, S. 2019. Energy efficiency of capacitive deionization. *Environmental Science & Technology*. 53(7): 3366-3378.

Zhang, C., Wu, L., Ma, J., Pham, A., Wang, M., Waite, T. 2019. Integrated flow-electrode capacitive deionization and microfiltration system for continuous and energy-efficient brackish water desalination. *Environmental Science & Technology*.