

## بررسی نمک‌زدایی آب‌های شور و لب‌شور با استفاده از فناوری آبروژل کربنی

محمد رضا مسعودی نژاد<sup>۱</sup>، اکبر اسلامی<sup>۲</sup>، حامد محمدی<sup>۳</sup>، حسین نجفی<sup>۳</sup>، بهزاد رضایی فرد<sup>۴</sup>، غلامحسین جوشنی<sup>۳</sup>

نویسنده مسئول: تهران، ولنجک، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط [hamed.mohamadi36@gmail.com](mailto:hamed.mohamadi36@gmail.com)

پذیرش: ۹۰/۰۵/۰۵

دریافت: ۹۰/۰۲/۰۶

### چکیده

**زمینه و هدف:** نیاز روزافزون به آب شرب، دانشمندان را به سمت استفاده از آب‌های شور سوق داده است؛ از طرفی فرایندهای نمک‌زدایی موجود، بسیار هزینه‌بر هستند. آبروژل کربنی از انواع آبروژل‌های آلی است که با ساختار متخلخل منحصر به فرد خود، برای نمک‌زدایی مناسب است. پتانسیل پایین گرفتگی، تولید فاضلاب بسیار کم، احیای الکترواستاتیکی آبروژل‌ها و در نتیجه عدم نیاز به اسید و مصرف کم انرژی از جمله مزایای این تکنولوژی است.

**روش بررسی:** هدف از انجام این مطالعه که نوعی مطالعه تجربی-تحلیلی است، بررسی نمک‌زدایی آب‌های شور و لب‌شور با استفاده از فناوری آبروژل کربنی و مقایسه آن با روش الکترولیز است. جامعه مورد بررسی، نمونه‌های سنتتیک آب نمک با استفاده از شاخص *TDS* و *EC* بودند. حداقل تعداد نمونه‌های سنتتیک ۲۴۳ عدد در نظر گرفته شد. در این راستا ابتدا با پلیمریزاسیون ترکیبات رزورسینول و فرمالدهید در شرایط فشار هوای آزاد و سپس پیرولیز ترکیبات به دست آمده، مبادرت به ساخت صفحات آبروژل کربنی شد.

**یافته‌ها:** با ساخت دستگاه در مقیاس پایلوت، تاثیر پارامترهای مختلف، شامل غلظت نمک ورودی، شدت جریان، دبی، فاصله بین الکترودها و *pH* بر میزان جذب *NaCl* توسط الکترودهای آبروژل کربنی مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی با افزایش شدت جریان و غلظت *NaCl* در جریان ورودی میزان جذب افزایش یافته و با افزایش فاصله بین الکترودها، دبی و *pH*، میزان جذب کاهش می‌یافت.

**نتیجه‌گیری:** نتایج در بهترین شرایط نشان‌دهنده میزان جذب  $1.0 \times 10^{-4}$  مول از کلرید سدیم به ازای هر گرم از آبروژل کربنی بود که حاکی از مناسب و مقرون به صرفه بودن این روش است.

**واژگان کلیدی:** نمک‌زدایی، آبروژل کربنی، الکتروشیمی، عوامل شوری

۱- دکترای بهداشت محیط، دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۲- دکترای بهداشت محیط، استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۴- کارشناس ارشد بهداشت محیط، کارشناس آزمایشگاه محیط زیست پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

## مقدمه

نیاز به آب شیرین به سرعت در حال افزایش است و منابع آب شیرین موجود نمی‌توانند تمام نیازها را برآورده نمایند. در حال حاضر با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، آب نمی‌تواند به صورت طبیعی تصفیه شده و با هزینه کم و به آسانی در دسترس قرار گیرد (۱). استفاده از آب آشامیدنی برای مصارفی همچون کشاورزی و صنعت در آینده‌ای نه چندان دور بشر را دچار بحران کم‌آبی می‌کند (۲). همزمان با افزایش جمعیت، کاهش منابع آبی شیرین و افزایش خشکسالی‌ها، استفاده از منابع آبی غیرمتداول نظیر فاضلاب، آب لب‌شور و آب دریا به طور فزاینده‌ای در سرتاسر جهان مورد توجه قرار گرفته است (۳). در بخش‌های جنوبی و جزایر کشور به علت وضعیت خاک، زمین، آب و هوای آن و کمبود جریان‌های سطحی دائمی و حتی نیمه دائمی، میزان کمی از این جریانات به سفره‌های زیر زمینی نفوذ می‌کنند (۴). در این گونه مناطق هنوز موانع زیادی به منظور استفاده از آب شیرین در کشاورزی پیشرفته، به خصوص برای گونه‌های شور پسند، وجود دارد و دسترسی به راه حل‌های عملی در آینده بسیار ضروری است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری روش‌های موجود نمک‌زدایی بالاست و تا به حال فناوری‌هایی با بازایافت حدود ۶۵ درصد از آب دریا هرگز اجرا نشده است. از طرفی پایین‌ترین هزینه انرژی مربوط به سوخت‌های فسیلی و سپس الکتریسیته‌ی حاصل از نیروگاه‌های حرارتی است و استفاده از این منابع انرژی در نمک‌زدایی منجر به انتشار آلاینده‌هایی نظیر  $SO_2$ ،  $NO_x$ ، ترکیبات فرار و... می‌شود. بنابراین بهره‌گیری از روش‌های جدید نمک‌زدایی با صرف انرژی کمتر ضروری است (۱). در کشور ما از نظر نوع فرایند به کار رفته در نمک‌زدایی آب، فرایندهای تقطیر سریع چند مرحله‌ای Multi-Stage Flash (MSF)، اسمز معکوس (RO) و تقطیر چند مرحله‌ای Multi-Effect Distillation (MED) و از لحاظ ظرفیت تولید  $RO$ ،  $MSF$  و  $MED$  به ترتیب در مکان‌های اول تا ظرفیت سوم و هم‌چنین از نظر ظرفیت تولید فرایندهای  $RO$ ،  $MSF$  و  $MED$  جای گرفته‌اند (۵).

مشکل فرایندهای تبخیری ( $MSF$  و  $MED$ ) علاوه بر مصرف زیاد انرژی، رسوب و خوردگی زیاد است که فقط با یک گروه

بهره‌بردار مجرب قابل کنترل است (۶). در روش‌های اسمز معکوس و الکترودیالیز نیز هزینه‌های هنگفت سرمایه‌گذاری و راهبری از یک سو و از دیگر سو محدودیت این روش‌ها در نمک‌زدایی آب دریا، کاربرد آنها را محدود ساخته است. توسعه فرایندهای جدید نمک‌زدایی در شیرین‌سازی آب‌های لب‌شور و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و راهبری و بهره‌گیری از انرژی هسته‌ای، نمک‌زدایی از آب را به عنوان یکی از گزینه‌های مورد توجه در مقابله با چالش‌های جهانی آب در قرن بیست و یک بدل ساخته است (۵). امروزه تکنولوژی‌های غشایی و رزین‌های تعویض یونی رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده برای نمک‌زدایی آب هستند (۷). پیچیدگی فرایندهای غشایی، حجم زیاد فاضلاب شور تولیدی در طول بهره‌برداری، حساسیت بالای غشاها و گرفتگی آنها و انعطاف‌پذیری کم آنها در برابر تغییرات کیفی آب و درجه حرارت از جمله معایب فرایندهای غشایی است (۸). مشکلات رزین‌های تعویض یونی نیز شامل ۱- استفاده از اسیدهای هیدروکلریک و سولفوریک برای احیای رزین‌ها ۲- تولید آب شور در حجم‌های زیاد و ۳- نیاز به دفع تزریقی این فاضلاب در چاه‌های ایمن از نوع درجه سه است (۷ و ۹). بنابراین تکنولوژی‌های جدید نمک‌زدایی علاوه بر تولید بیشتر آب شیرین، باید بر محدودیت‌های روش‌های موجود نمک‌زدایی فایز آیند (۸). استفاده از تکنولوژی یون‌زدایی خازنی (CDI) Capacitive Deionization با استفاده از الکترودهای آیروزل کربنی (Carbon Aero gel) یکی از این روش‌هاست. آیروزل کربنی که رایج‌ترین ماده مورد استفاده در تکنولوژی CDI است از انواع آیروزل‌های آلی است که با ساختار متخلخل منحصر به فرد خود برای نمک‌زدایی مناسب است (۱۰). یون‌زدایی خازنی با استفاده از الکترودهای آیروزل کربنی به عنوان یک فرایند جدید در نمک‌زدایی آب‌های شور و لب‌شور مطرح بوده و دارای مزایای فراوانی نسبت به سایر فرایندهای نمک‌زدایی است. پتانسیل پایین گرفتگی و رسوب، شرایط بهره‌برداری ساده‌تر، تولید آب فوق‌العاده خالص، تولید فاضلاب بسیار کم، توانایی نمک‌زدایی آب دریا، احیاء الکترواستاتیکی آیروزل‌ها و در نتیجه عدم نیاز به اسید و مصرف کم انرژی از جمله

### مواد و روش‌ها

برای نمک‌زدایی از آب‌های شور و لب‌شور با استفاده از فناوری آبروژل کربنی، در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی، باید ابتدا الکترودهای آبروژل کربنی ساخته می‌شدند. روش‌های ساخت آبروژل‌های کربنی به طور وسیعی شامل آمیختن مواد فنی نظیر پلی هیدروکسی بنزن، ترجیحا دی و تری هیدروکسی بنزن، که بهتر است رزورسینول (۳ و ۱ دی هیدروکسی بنزن) باشد، با یکی از مواد Catechol، هیدروکوئینون، فلوروگلوکسینول و یا ترجیحا فرمالدهید در حضور یک کاتالیست پایه، برای تشکیل پلیمرهای تشکیل‌دهنده ژل است. در این تحقیق فرایند ساخت الکترودهای آبروژل کربنی شامل پلیمریزاسیون و پیرولیز مخلوط ترکیبات رزورسینول و فرمالدهید بود. واکنش این ترکیبات در حضور کربنات سدیم به عنوان کاتالیزور صورت گرفت (۱۷). مخلوط‌های به دست آمده که به شکل ژل و زرد رنگ بودند، در ویال‌های شیشه‌ای ۲۰ سی‌سی قرار گرفتند؛ چون طی مدت زمان واکنش نباید اکسیژن به ژل‌ها برسد. سرنگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق، ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند (۱۸). در مرحله بعدی که مرحله خشک کردن آبروژل‌ها است می‌توان از خشک کردن فوق بحرانی با استفاده از دی‌اکسید کربن بهره برد، اما این روش هزینه‌بر بوده و به علت استفاده از فشار و دمای بالا خطرناک است به همین دلیل در این تحقیق از روش تعویض حلال با استفاده از استون و سیکلوهاگزان استفاده شد. رنگ آبروژل‌های به دست آمده در این مرحله که قرمز شفاف تا قرمز تیره است، در مرحله پیرولیز کربنیزه شده و اسفنج‌های کربنی سیاه‌رنگی با دانسیته پایین‌تر را ایجاد کردند. به منظور آنالیز سطحی و اندازه‌گیری قطر تخلخل‌ها و الگوی قرارگیری منافذ از روش‌های BET، BJH و T-plot استفاده شد. مرحله بعدی ساخت الکترودهای آبروژل کربنی بود. این الکترودها با چسباندن ورقه یا گرانول‌های آبروژل کربنی به هر دو طرف یک صفحه از فلز تیتانیوم که هم به عنوان هدایت‌کننده جریان الکتریکی و هم به عنوان محافظت‌کننده ساختاری به کار می‌رود، ساخته می‌شوند. محققان در برخی از آزمایشات از اپوکسی با ذرات کربن ۵٪ و یا اپوکسی نقره استفاده کرده‌اند (۱۹).

مزایای این تکنولوژی است (۱۱ و ۱۲). ساختار یکپارچه، هدایت الکتریکی بالا (۱۰۰-۱۰ Siemens/cm)، سطح ویژه بالا ( $1200 - 400 \text{ m}^2/\text{g}$ )، توزیع اندازه تخلخل‌ها و قابل کنترل بودن، آبروژل کربنی را ماده‌ای ایده‌آل و مناسب برای جذب الکتروشیمیایی یون‌ها کرده است (۱۳ و ۱۴).

در مطالعه‌ای Jung و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی مشخصات الکترودهای آبروژل کربنی سنتز شده در شرایط هوای آزاد، پرداختند. میزان جذب الکترودهای آبروژل کربنی با کاربرد سیستم واحد CDI که حاوی یک جفت از الکترودهای آبروژل کربنی بود، به ازای هر گرم از آبروژل‌های کربنی  $4 - 10 \times 1/2$  مول از ترکیب NaCl بود. در مراحل بعدی این تحقیق، متغیرهای مورد نظر در یک سیستم ۶ واحدی از CDI مورد بررسی قرار گرفتند که در آن از ۲۵/۸ گرم آبروژل کربنی استفاده شد. در این مرحله به ازای هر گرم از آبروژل  $10^{-6} \times 2/1$  مول از ترکیب NaCl جذب شد (۱۵).

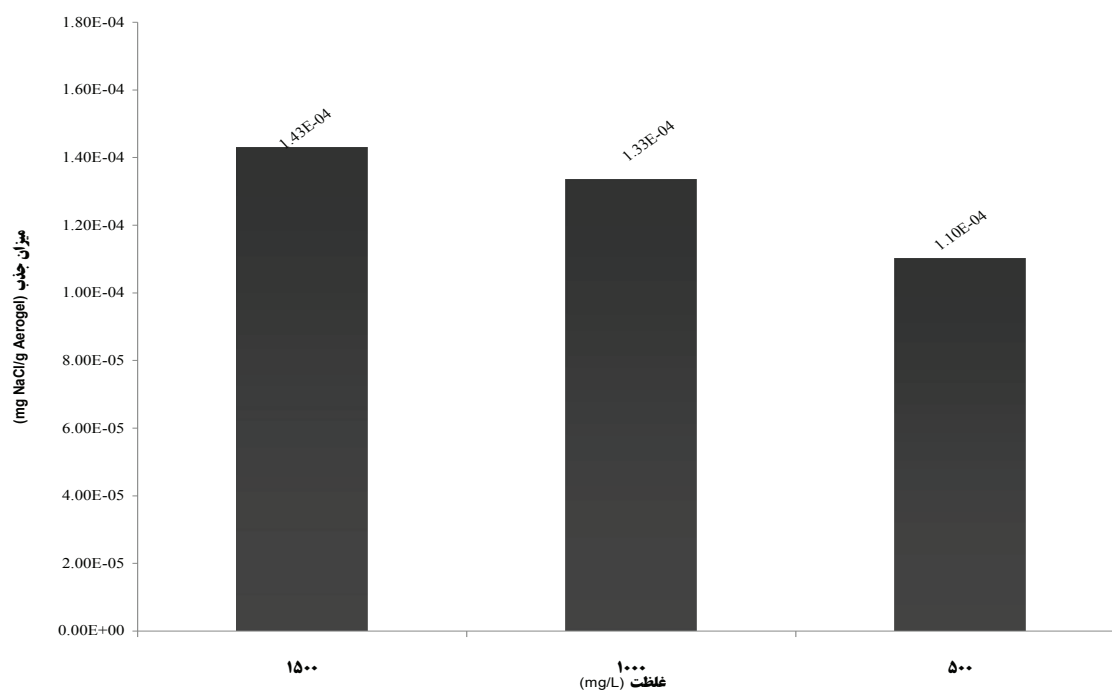
Pei و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ با هدف بازیافت ید از آب‌های شور، با استفاده از دو سلول که هرکدام دارای ۲۴ الکتروژل آبروژل کربنی بود موفق به حذف ۶۹ درصد ید، ۸/۱ درصد سدیم، ۲۱/۷ درصد منیزیم و ۲۲ درصد کلسیم شدند. نتایج حاصل از این تحقیق در غلظت‌های مختلف نشان‌دهنده میزان جذب بیشتر در غلظت‌های بالاتر بود (۱۱).

در مطالعه‌ای که Broseus و همکاران در سال ۲۰۰۸ انجام دادند موفق شدند با اعمال ولتاژهای ۵-۴/۵ ولت، از نمونه‌های آب نمک با غلظت NaCl معادل ۱۵۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر ۶۳/۹ تا ۹۵/۸ درصد آب را بازیافت کنند. در این مطالعه آزمایشات دیگری روی محلول‌های حاوی یون‌های نیترات و آمونیوم نیز انجام شد و نتیجه نشان‌دهنده درصد بالایی از حذف این یون‌ها بود (۱۶). در این مطالعه امکان‌سنجی ساخت آبروژل کربنی به منظور حذف عوامل مولد شوری از آب‌های شور و لب‌شور، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سعی شده است اثر منفرد و تعاملی پارامترهای مهم از قبیل pH، غلظت اولیه عوامل شوری و ولتاژ جریان جهت افزایش راندمان حذف که بخشی از تحقیقات مولفین در خصوص حذف عوامل شوری توسط الکترودهای آبروژل کربنی است، مورد بررسی قرار گیرد.

کار رفته در سلول تعیین شد. عوامل مهم و مختلف موثر بر فرایند یون‌زدایی خازنی با استفاده از آیروژل کربنی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند شامل غلظت ورودی، شدت جریان، pH، دبی و فاصله بین الکترودها بود. به دلیل این که محلول‌های مورد آزمایش سنتتیک تهیه می‌شدند بنابراین نمونه‌گیری وجود نداشت. حداقل تعداد نمونه‌های سنتتیک برای انجام این تحقیق ۲۴۳ عدد در نظر گرفته شد. روش محاسبه تعداد نمونه‌های لازم با توجه به تعداد متغیرهای اصلی محاسبه شد، بدین صورت که برای هر متغیر ۳ اندازه تعریف شد و سپس حاصل ضرب آنها به دست آمد. داده‌های به دست آمده توسط نرم افزار Excel و SPSS و با استفاده از آزمون آماری ضریب همبستگی پیرسون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با اعمال ولتاژها و pHهای مختلف و تغییر فاصله بین الکترودها، تاثیر این پارامترها بر روی راندمان دستگاه، در غلظت‌های متفاوتی از آب‌های شور و لب‌شور مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که با تغییر دادن یکی از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، اثر تغییر هر کدام از متغیرها بر

در این تحقیق نیز از اپوکسی نقره استفاده شد. به طور کلی مجموعه‌ای از صفحات آیروژل کربنی به همراه صفحات فلزی در محفظه‌های که اصطلاحاً سلول نامیده می‌شد، قرار گرفتند. در هنگام ساخت این سلول، آیروژل‌های کربنی با مواد پلاستیکی و یا شیشه‌ای غیرسازنا از هم جدا شدند تا از ایجاد اتصال مستقیم بین آنها جلوگیری به عمل آید. در این دستگاه نیمی از صفحات آیروژل کربنی نقش کاتد و نیمی دیگر نقش آند را ایفا می‌کردند.

نمونه‌های سنتتیک از آب‌های شور و لب‌شور به صورت ماریجی از بین این الکترودها عبور داده شدند و طی این فرایند، آنیون‌ها جذب آند و کاتیون‌ها جذب کاتد می‌شدند. جریان از نوع بسته (batch) بود که با یک رژیم جریان چرخشی پیوسته هدایت می‌شد. هدایت الکتریکی مخزن تغذیه به صورت مداوم مورد اندازه‌گیری قرار می‌گرفت. ثابت شدن عدد هدایت الکتریکی مخزن تغذیه، نشان‌دهنده اشباع شدن الکترودهای آیروژل کربنی بود. حداکثر گنجایش جذب آیروژل‌های کربنی با موازنه جرمی مقدار نمک جذب شده به مقدار آیروژل به



شکل ۱: نشان‌دهنده اثر غلظت ورودی NaCl بر ظرفیت جذب الکترودهای آیروژل کربنی

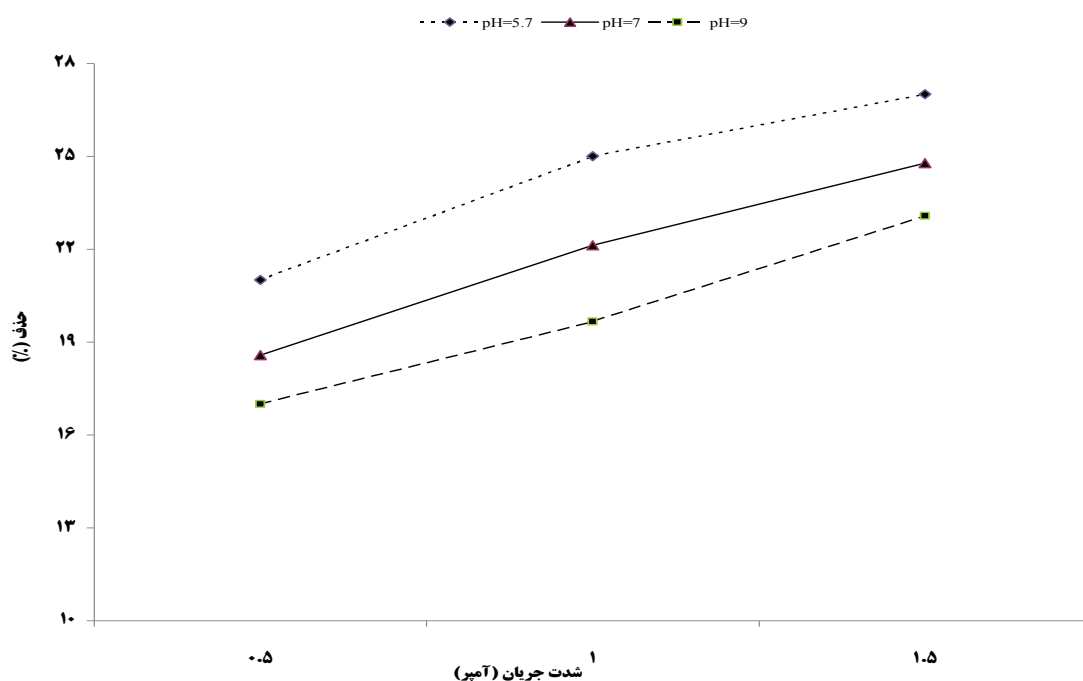
گرفت. نتایج حاصل از تاثیر این پارامترها و شرایط بهینه انجام فرایند شیرین سازی و در نهایت میزان حذف NaCl از آب در شکل های ۳-۱ نشان داده شده است. شکل ها کاملا گویا است که کاهش pH، دبی و فاصله بین الکترودها و افزایش غلظت ورودی، شدت جریان راندمان حذف NaCl را افزایش داده است.

نتایج مربوط به آنالیز سطحی آبروژل های کربنی با استفاده از روش BET نشان دهنده سطحی معادل  $677/8 \text{ m}^2/\text{gr}$  و نتایج مربوط به آنالیز سطحی آبروژل های کربنی با استفاده از روش های BJH و T-plot نشان داد که قطر تخلخل ها بین ۸۰-۱۸۰ است. لازم به ذکر است که حجم تخلخل های به دست آمده با استفاده روش BJH معادل  $0/4 \text{ cc/g}$  بود.

روی راندمان حذف سنجیده شد. بدین ترتیب با مقایسه شوری آب ورودی و خروجی و محاسبه راندمان در تمام حالت ها، بهترین ولتاژ و فاصله برای دستیابی به بهترین راندمان تعیین شد. در عمل، احیای آبروژل های کربنی با معکوس کردن جریان و یا قطع جریان به مدت ۳۰-۱۵ دقیقه صورت می گرفت و چرخه دوباره تکرار می شد.

### یافته ها

در این مطالعه از آبروژل کربنی جهت شیرین سازی آب های شور استفاده گردید و پارامترهای مختلف موثر مانند غلظت ورودی، شدت جریان، pH، دبی و فاصله بین الکترودها بر فرایند از طریق روش یک عامل در زمان، مورد بررسی قرار

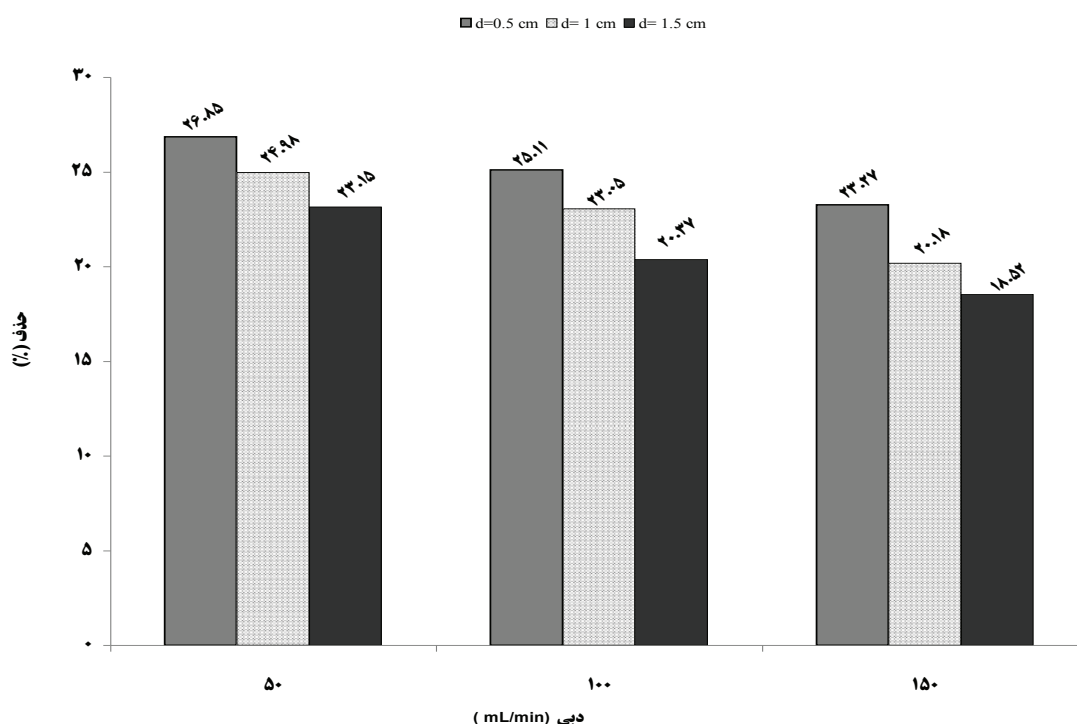


شکل ۲: درصد حذف NaCl در شدت جریان ها و pH های متغیر (غلظت  $500 \text{ mg/L}$ ، فاصله بین الکترودها  $0/5 \text{ cm}$  و دبی  $50 \text{ mL/min}$ )

### بحث

در این تحقیق به بررسی یکی از روش‌های نوین شیرین‌سازی آب پرداخته شد. استفاده از تکنولوژی یون‌زدایی خازنی (CDT) به منظور نمک‌زدایی از آب‌های شور و لب‌شور نسبت به سایر فرایندها از قبیل اسمز معکوس (RO)، الکترودیالیز (ED) و رزین‌های تعویض یونی، فرایند جدیدتری محسوب می‌شود (۲۰). آزمایشاتی که در مقیاس پایلوت صورت گرفتند، نشان دادند که CDT با استفاده از الکترودهای آیروژل کربنی سنتز شده در شرایط فشار هوای آزاد، قادر به حذف NaCl از آب‌های شور و لب‌شور است. در این تحقیق از آیروژل‌های کربنی که در شرایط فشار هوای آزاد سنتز شدند به منظور حذف یون‌های NaCl استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است با افزایش غلظت NaCl میزان جذب الکترودهای آیروژل کربنی افزایش می‌یابد به طوری که در غلظت ۱۵۰۰ mg/L میزان جذب به  $1.43 \times 10^{-4}$  مول از کلرید سدیم به ازای هر گرم از آیروژل کربنی بود.

این میزان جذب با تحقیقات Jung و همکاران که در آن میزان جذب برای سیستم تک سلولی یون‌زدایی خازنی Mol NaCl/grAerogel  $1.0 \times 10^{-4}$  و مقدار آن برای سیستم چند سلولی Mol NaCl/grAerogel  $2.1 \times 10^{-4}$  بود (۱۵)، و همچنین مطالعه xu و همکاران که در آن میزان جذب ۶ mg از NaCl به ازای هر گرم آیروژل کربنی بود (۱۱)، قابل مقایسه است. رابطه بین غلظت NaCl و میزان جذب آن توسط الکترودهای آیروژل کربنی در سطح معنی‌داری  $P \leq 0.01$  دارای ضریب همبستگی پیرسون ۰/۸۱ ( $r=0.81$ ) است که می‌تواند تاییدکننده این قضیه باشد که با افزایش غلظت نمک میزان جذب افزایش یافته است. علت افزایش میزان جذب در غلظت‌های بالاتر NaCl می‌تواند به دلیل کاهش ضخامت لایه دابل الکتریکی و متعاقباً افزایش ظرفیت جذب آیروژل کربنی باشد (۱۱). توانایی الکترودهای حاوی گرانول‌های آیروژلی کربنی و ظرفیت جذب آنها به منظور حذف یون‌ها از آب، بستگی زیادی



شکل ۳: درصد حذف NaCl در دبی‌ها و فاصله‌های مختلف (غلظت ۵۰۰ mg/L، pH = ۵/۷ و شدت جریان ۱/۵ آمپر)

دارد. بالاترین راندمان در این تحقیق ۲۶/۸ درصد بود. علت پایین بودن راندمان استفاده از تعداد کم الکترودها نسبت به مقدار الکترولیت مورد استفاده بود. در این مطالعه با توجه به امکانات موجود حداکثر تعداد الکترودها ۱۲ عدد با ابعاد ۴×۱۳ انتخاب شد. طبیعی است با افزایش تعداد الکترودها راندمان افزایش می‌یابد. از طرفی هدف از این مطالعه بررسی میزان نمکزدایی (جذب نمک) توسط آبروژل کربنی است، بدین صورت که با در دست داشتن میزان جذب نمک توسط این ماده و مشخصات منبع آب شور و کیفیت آب تولیدی می‌توان تعداد الکترودها را تعیین کرد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته از دیدگاه‌های فنی، مهندسی و اقتصادی، به نظر می‌رسد استفاده از الکترودهای آبروژل کربنی در تکنولوژی یونزدایی خازنی (CDI) به منظور نمکزدایی از آب‌های شور و لب‌شور روشی مناسب و مقرون به صرفه است، زیرا سیستم پیچیده‌ای نداشته و راهبری آن قابل کنترل‌تر از دیگر روش‌هاست و با توجه به توسعه روش‌های پیشرفته تولید آبروژل‌های کربنی، به کارگیری این روش توجیه بیشتری دارد. امید است مدیران و کارشناسان مرتبط با مقوله مدیریت منابع آب مناطق ساحلی و کویری کشور، با دید مناسب‌تر و بازتری به تکنولوژی‌های نوینی نظیر نمکزدایی بپردازند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی اجرا شده است.

لازم به ذکر است که نویسندگان از حمایت‌های مالی و آزمایشگاهی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی کمال تشکر را دارند.

نویسندگان از مسئولین محترم آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و نیز بخش مهندسی محیط زیست سازمان انرژی اتمی به دلیل حمایت‌های آزمایشگاهی سپاس‌گزارند.

به شدت جریان دارد. همان طور که در شکل ۲ نیز مشخص است، با افزایش میزان شدت جریان ورودی به سیستم، راندمان حذف NaCl افزایش می‌یابد. نتایج آنالیز آماری نیز نشان‌دهنده وجود رابطه معنی‌دار بین شدت جریان و میزان جذب نمک به ازای هر گرم از آبروژل است ( $P \leq 0/01$ ).

تاثیر تغییرات pH در شکل ۲ به خوبی نمایش داده شده است. همان طور که در این نمودار مشخص است در این مطالعه با کاهش pH، مقدار جذب افزایش می‌یابد به طوری که در  $pH=5/7$  بهترین پاسخ را ایجاد نموده است. آنالیزهای آماری نیز نشان‌دهنده رابطه معنی‌داری بین کاهش pH و راندمان حذف NaCl در  $p \leq 0/01$  بودند.

همان طور که در شکل ۳ به خوبی نشان داده شده است با کاهش فاصله بین الکترودها از ۱/۵ - ۰/۵ سانتی‌متر، راندمان جذب به دلیل برقراری اختلاف پتانسیل بیشتر بین الکترودها و تشکیل بیشتر لایه‌های دوپل الکتریکی افزایش می‌یابد. در مورد دبی نیز آنالیزهای آماری نشان‌دهنده رابطه معنی‌داری بین دبی و راندمان حذف NaCl در  $P \leq 0/01$  بودند. بهترین نتایج در دبی ۵۰ mL/min به دست آمد و این نشان‌دهنده این بود که در دبی‌های کمتر، الکترودها فرصت بیشتری برای جذب یون‌ها داشته‌اند. رابطه بین دبی و راندمان جذب در شکل ۳ به خوبی نشان داده شده است. نظر به این که فرایند جذب الکتریکی قابل برگشت است، یون‌ها با قطع جریان و یا معکوس کردن جریان رها می‌شوند. بنابراین الکترودها قابل احیا بوده و می‌توانند بارها مورد استفاده مجدد قرار گیرند.

فرایند یونزدایی خازنی با استفاده از آبروژل‌های کربنی، با وجود مزایای فراوان دارای برخی معایب نیز است. از آنجا که تکنولوژی یونزدایی خازنی (CDI) با استفاده از الکترودهای آبروژل کربنی در مقایسه با فرایندهای غشایی، نسبتاً نو است، داده‌های بهره‌برداری دراز مدت برای سیستم در مقیاس‌های صنعتی وجود ندارد. علاوه بر این به دلیل نبود این اطلاعات، پیش‌بینی طول عمر الکترودها و یا تاثیر گرفتگی آنها در نتیجه عوامل شیمیایی و بیولوژیکی مشکل است (۱۲).

در مطالعاتی از این نوع کارایی فرایند بستگی زیادی به عواملی همچون تعداد و ابعاد الکترودهای مورد استفاده و متعاقباً مقدار آبروژل کربنی مورد استفاده، حجم آب شور و غلظت یون‌ها



### منابع

1. Arab F. Desalination of water supply: past, present and future. *Water and Environment Journal*. 2005;64:11-20 (in Persian).
2. Amidpur M, Zamen M, Safari M. Optimizing of energy consumption in HD solar desalination systems. *Proceedings of Sixth National Energy Congress*; 2007; Tehran (in Persian).
3. Benko KL, Drewes JE. Produced water in the Western United States: geographical distribution, occurrence, and composition. *Environmental Engineering Science*. 2008;25(2):239-46.
4. Taghavi M. Water and water distribution in the Geshm of island. *Gheshm News Magazine*. 2005;104:21-22 (in Persian).
5. Ghanadi M. Urban and rural desalination systems in Iran and their water quality. *Water and Environment Journal*. 2005;64:3-10 (in Persian).
6. Binayi S. Operating experience of desalination systems. *Water and Environment Journal*. 2005;64:29-32 (in Persian).
7. IOGCC/ALL C. A guide to practical management of produced water from on shore oil and gas operations in the United States. A final report prepared for US Department of Energy. Tulsa, Oklahoma; 2006.
8. Yang KL, Ying TY, Yiacoumi S, Tsouris C, Vittoratos ES. Electrosorption of ions from aqueous solutions by carbon aerogel: An electrical double-layer model. *Langmuir*. 2001;17(6):1961-69.
9. Funston R, Ganesh R, Leong LYC. Evaluation of technical and economic feasibility of treating oilfield produced water to create a "new" water resource. *Ground Water Protection Council (GWPC) Meeting*; 2002; New York.
10. Pekala R, Farmer J, Alviso C, Tran T, Mayer S, Miller J, et al. Carbon aerogels for electrochemical applications. *Journal of Non-crystalline Solids*. 1998;225(1):74-80.
11. Xu P, Drewes JE, Heil D, Wang G. Treatment of brackish produced water using carbon aerogel-based capacitive deionization technology. *Water Research*. 2008;42(10-11):2605-17.
12. Welgemoed T, Schutte C. Capacitive deionization technology (TM): an alternative desalination solution. *Desalination*. 2005;183(1-3):327-40.
13. Farmer JC, Fix DV, Mack GV, Pekala RW, Poco JF. Capacitive deionization of NaCl and NaNO<sub>3</sub> solutions with carbon aerogel electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*. 1996;143:159-69.
14. Ying TY, Yang KL, Yiacoumi S, Tsouris C. Electrosorption of ions from aqueous solutions by nanostructured carbon aerogel. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002;250(1):18-27.



15. Jung HH, Hwang SW, Hyun SH, Lee KH, Kim GT. Capacitive deionization characteristics of nanostructured carbon aerogel electrodes synthesized via ambient drying. *Desalination*. 2007;216(1-3):377-85.
16. Broséus R, Cigana J, Barbeau B, Daines-Martinez C, Suty H. Removal of total dissolved solids, nitrates and ammonium ions from drinking water using charge-barrier capacitive deionisation. *Desalination*. 2009;249(1):217-23.
17. Pekala RW, inventor. Low density, resorcinol-formaldehyde aerogels. United States patent US4997804. 1991 Mar 5.
18. Mayer ST, inventor. Method of low pressure and/or evaporative drying of aerogel. United States patent US5420168. 1995 May 30.
19. Farmer J. The use of carbon aerogel electrodes for environmental cleanup. USA: DTIC; 1996. Report No.: LLNL654.
20. Younos T, Tulou KE. Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 2005;132(1):3-10.

## Desalination of Saline and Brackish Waters using Carbon Aerogel Technology

Mohamad Reza Massoudinejad<sup>1</sup>, Akbar Eslami<sup>1</sup>, \*Hamed Mohammadi<sup>1</sup>, Hossein Najafi<sup>1</sup>, Behzad Rezayi Fard<sup>2</sup>, Gholam Hossein Joshani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment Health Engineering, Faculty of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Bachelor of Environmental Engineering, Institute of Nuclear Science and Technology

Received; 10 August 2011

Accepted; 11 May 2011

### ABSTRACT

**Objectives and Background:** The increasing demand for drinking water has led scientists to the use of saline waters, but existing desalinating processes are very expensive. carbon aerogel is a type of organic aerogel that is suitable for desalination owing to its unique porous structure. Low potential of fouling and deposits, very low wastewater production, electrostatic regeneration of aerogels and, in turn, no need to acid consumption, and lower power consumption are some of this technology benefits.

**Materials and Method:** In this experimental- analytical study, the purpose was survey of saline and brackish water desalination using carbon aerogel technology and its comparison with electrolysis. The community studied was synthetic salt water samples, using of TDS and EC indicators. The minimum synthetic samples were 243. In this regard, after polymerization of Resorsinol and Formaldehyde compounds under ambient pressure conditions and then its pyrolysis, we fabricated plates of carbon aerogel.

**Result:** With manufacturing in the pilot-scale, the effect of different parameters, including input salt concentration, current, water flow, distance of between electrodes and pH, on NaCl sorption amount of carbon aerogel electrodes were studied. Generally, adsorption amount increased with increasing of current and NaCl concentration and decreased with increasing of distance electrodes, flow and pH.

**Results:** Fabricating reactor at pilot-scale, we studied the effect of different parameters, including input salt concentration, current, water flow, intra-distance of electrodes, and pH on the NaCl sorption using carbon aerogel electrodes. Generally, adsorption capacity increased with increasing of current and NaCl concentration in the inlet flow, and it decreased with increasing intra-distance of electrodes, flow, and pH.

**Conclusion:** Under the most optimal conditions, our results showed that the NaCl adsorption rate on carbon aerogel electrodes was about  $1.43 \times 10^{-4}$  M NaCl per g of carbon aerogels indicating its cost-effectiveness.

**Keywords:** Desalinating, Carbon aerogel, Electrochemistry, Salinity causes

---

\*Corresponding Author: [ahmad\\_jonidi@yahoo.com](mailto:ahmad_jonidi@yahoo.com)

Tel: +98 21 82883575, Fax: +98 21 82883575