

## مروری بر مطالعات انجام شده بر روی دستگاه آب شیرین کن خازنی و مطالعه تجربی امکان سنجی اتصال آن به انرژی خورشیدی

مجید نیکفر<sup>۱</sup>، علی اکبر عالم رجبی<sup>۲\*</sup>، دانگ کوک کیم<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

m.nikfar@me.iut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

rajabi@cc.iut.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد و پژوهشگر، پژوهشگاه انرژی کره، دجان، کره جنوبی

dokkim@kier.re.kr

**چکیده:** تهیه آب شیرین یکی از معضلات کشورهای خاورمیانه از جمله ایران است. تکنولوژی شیرین سازی آب یکی از موضوعات مورد توجه دانشمندان در دهه اخیر است. در این میان، آب شیرین کن های خازنی با رشد فزاینده ای از مطالعات روبه رو هستند. مصرف بهینه انرژی، صرفه اقتصادی و فضای اشغالی کمتر، مطالعه بر روی این دستگاه را اجتناب ناپذیر می کند. در سال های اخیر در جهان، مطالعات تجربی فراوانی بر روی این دستگاه انجام شده است. زیرمدلهایی نیز برای مدل سازی جذب یون بر اساس تئوری لایه الکتریکی مضاعف، تعریف و توسعه یافته اند. اما در کشور ایران، به رغم بحران آب، مطالعه اساسی بر روی این دستگاه انجام نشده است. در مقاله حاضر در بخش اول، دستگاه آب شیرین کن خازنی معرفی شده و مطالعات در این زمینه مرور می شود. در بخش دوم، نتایج مطالعه ای تجربی با هدف بررسی امکان کوپل دستگاه آب شیرین کن خازنی الکترو د جاری (FCDI) با انرژی خورشیدی ارائه می شود. به این منظور ابتدا سل FCDI مورد مطالعه معرفی می شود. از پنل های خورشیدی به صورت مستقیم برای تأمین انرژی مصرفی جذب یون استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که دستگاه با اتصال پنل خورشیدی ۲ وات، آب دریا را در یک مرحله ۵۰ درصد شیرین می کند. در آزمون دیگر برای رسیدن به آب قابل شرب از پنل خورشیدی ۰/۷۵ وات استفاده شد و آب شور خروجی از مرحله قبل در یک سیکل بسته با گذشت ۱ ساعت به آب قابل شرب تبدیل شد.

**واژه های کلیدی:** یون زدایی خازنی، نمک زدایی، الکترو د متخلخل، الکترو د جاری، جذب یون، انرژی خورشیدی.

## ۱. مقدمه

منابع آب و مدیریت آن نقش زیادی در رشد و توسعه جوامع دارند. نیاز به آب شیرین نه تنها برای مصرف انسان بلکه برای کشاورزی و صنعت نیز حائز اهمیت است. رشد سریع جمعیت و توسعه صنعت از طرف دیگر منجر به افزایش تقاضا برای آب شیرین شده است. اگرچه مقدار آب شیرین در چرخه طبیعت ثابت است، در مواردی جایگزینی آن به کندی انجام می شود و به همین دلیل کاهش منابع آب شیرین در برخی مناطق مشاهده می شود. بر اساس گزارش بنیاد دیدبان بشر بیش از دو سوم جمعیت جهان ممکن است تا سال ۲۰۲۵ کمبود آب را تجربه کنند [۱]. علاوه بر این، مشکل آلودگی روخانه ها و دریاچه ها توسط فاضلاب های صنعتی و شهری از بزرگ ترین دلایل مواجهه با کمبود آب شیرین است. با وجود اینکه در حدود ۷۰ درصد از سطح زمین را آب فرا گرفته است، متأسفانه بحران کمبود آب در بسیاری از کشورهای جهان از جمله کشورهای خاورمیانه مثل ایران به عنوان یکی از دغدغه های اصلی فراوری آینده این جوامع خواهد بود [۲]. در سال های اخیر، توجه فزاینده ای به موضوع تولید آب شیرین در بسیاری از کشورهای جهان از جمله کشورهای حوزه خلیج فارس شده است. شرایط خشکسالی بخصوص در سالیان اخیر در مناطق مختلف ایران بویژه در مرکز و جنوب کشور منجر به کاهش دسترسی به آب شیرین گردیده است. در این مناطق، اغلب آب شیرین بصورت جاری وجود ندارد و تأمین آب از طریق حفر چاه های بسیار عمیق امکان پذیر است. این موضوع علاوه بر هزینه های سنگین، مشکل غیربهداشتی و شور بودن آب های زیرزمینی را نیز در بر دارد. از این رو تأمین آب شرب برای مردم به یکی از معضلات کشور تبدیل شده است. بر اساس مطالعات، تا سال ۲۰۳۰ میزان نیاز آب در کره زمین، ۴۰ درصد نسبت به میزان فعلی افزایش می یابد و این موضوع باعث ایجاد نگرانی برنامه ریزان آب در سطح جهان شده است. برخی کارشناسان، حیات و تمدن و بقای ایران را به دلیل شرایط آبی کشور در معرض تهدید می دانند. هم اکنون آب برخی از مناطق، به دلیل وجود مواد نیترات و نیتريت و نیز فلزات سنگین، باید قبل از انتقال، اصلاح و تصفیه شود که همه این موارد هزینه های بالای سرمایه گذاری برای انتقال آب به وجود می آورد [۳].

با اضافه شدن نمک به آب خالص، برخی از ویژگی های آن نظیر چگالی، نقطه جوش و هدایت الکتریکی افزایش و نقطه انجماد آن کاهش می یابد [۴ و ۵]. آب شور بر مبنای میزان کل مواد جامد محلول در آن<sup>۱</sup> (TDS) برحسب گرم بر لیتر سنجیده می شود (ppm=۱۰۰۰)

(g/L). آب با TDS بین ۱ الی ۳۰ گرم بر لیتر دارای مزه شور و بیش از ۳۰ گرم بر لیتر آب دریا در نظر گرفته می شود [۲]. به طور کلی آب شور در سه طبقه بندی قرار می گیرد؛ آب با شوری کم دارای ppm ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ ppm، آب به طور نسبی شور دارای ppm ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm و آب با شوری بالا دارای ppm ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ ppm مواد جامد محلول (به ویژه نمک های محلول) است [۶].

## ۲. فرایندهای نمک زدایی

برای شیرین سازی آب روش های مختلفی وجود دارد. این روش ها به دو دسته کلی تقسیم می شوند:

الف. فرایندهای حرارتی یا تغییر فاز: فرایندهایی که با تغییر فاز همراهند مانند تغییر ناگهانی چندمرحله ای<sup>۲</sup> [۷ و ۸]، تقطیر چند اثره<sup>۳</sup> [۸ و ۹]، متراکم سازی مکانیکی بخار [۱۰ و ۱۱]، روش انجمادی [۱۲]، رطوبت افزایی-رطوبت زدایی [۱۳] و تقطیر خورشیدی [۵]، [۱۴ و ۱۵]. مطالعات فراوانی بر روی ترکیب آب شیرین کن حرارتی با نیروگاه های سیکل ترکیبی انجام شده است [۱۶-۱۹].

ب. فرایندهای تک فاز: فرایندهایی هستند که بدون تغییر فاز سیال، ذرات ناخالصی را از آن جدا می کنند؛ مانند روش های اسمز معکوس<sup>۴</sup> [۲۰]، الکترو دیالیز [۲۱] و سیستم یون زدایی خازنی<sup>۵</sup>.

در سیستم های آب شیرین کن خازنی، آب شور از درون کانالی عبور می کند که دارای الکترودهایی با سطح تماس زیاد است. با اعمال ولتاژ به الکترودها، یونها تحت میدان الکتریکی در سطح الکترودها جذب می شوند (شکل ۱). در نتیجه این عمل، میزان شوری آب کاهش می یابد و آب شیرین از سمت دیگر سیستم خارج می شود. برای بازیابی مجدد الکترودها، با تغییر ولتاژ اعمالی، یون های جذب شده از سطح الکترودها خارج شده، به جریان آب عبوری وارد می شوند (شکل ۱). این چرخه می تواند در سیستم های یون زدایی خازنی بارها تکرار شود. یون زدایی خازنی برحسب نحوه قرارگیری الکترودها و جنس الکترودها به دو دسته کلی تقسیم می شوند: ۱. الکترودهای ثابت، ۲. الکترودهای جاری، که شکل (۱) انواع مختلف آن را نشان می دهد (انواع مختلف دیگر آن در مرجع [۲۲] آمده است).

در یک دستگاه آب شیرین کن خازنی با مکانیزم پایه شکل (۱)، از دو لایه بیرونی شامل کلکتور جریان استفاده می شود که تکیه گاهی برای الکترودها فراهم می کند. معمولاً مواد تشکیل دهنده این کلکتورهای جریان از جنس گرافیت یا تیتانیوم (یا هر جنسی که هم

2. Multi-Stage Flash (MSF)

3. Multiple Effect Distillation (MED)

4. Reverse Osmosis (RO)

5. Capacitive Deionization (CDI)

1. Total Dissolved Solids (TDS)

[۲۴ و ۲۵]. بهینه بودن مصرف انرژی در آب شیرین کن‌های خازنی به علت حذف یا جدا کردن بخش کمتر که یون‌ها باشند از مخلوط است، برخلاف دیگر روش‌ها که بخش غالب که آب باشد را از مخلوط جدا می‌کنند. در آب شیرین کن خازنی دو مرحله وجود دارد: گام اول جذب الکتریکی یون‌ها یا شارژ شدن الکترودها و گام دوم معکوس کردن بار الکترودها برای دشارژ کردن الکترودها. انرژی در مرحله بازیابی الکترودها (دشارژ کردن الکترودها یا رهاسازی یون‌ها) می‌تواند در شارژ کردن الکترودهای سل مجاور به کار گرفته شود و انرژی بازیافت شود. مصرف انرژی در سیستم‌های مختلف پرکاربردتر شیرین‌سازی آب در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، کمترین مصرف انرژی برای سیستم CDI است. علاوه بر مصرف کمتر انرژی در سیستم CDI، نیاز به سطح پایین ولتاژ ( $V > 1/5$ ) و امکان استفاده از نیروی جاذبه برای به جریان انداختن آب خوراک ورودی این سیستم را قادر می‌سازد تا با باتری و یا انرژی خورشیدی کار کند و نصب آن آسان باشد. سیستم CDI قادر به حذف ۷۰-۹۰٪ یون‌ها از محلول است.

جدول (۱): مصرف انرژی در تکنیک‌های مختلف شیرین‌سازی آب [۲۴]

مصرف انرژی (kWh/m <sup>3</sup> )	نوع دستگاه آب شیرین‌کن			
	CDI	RO	MSF	MED
حرارتی	-	-	۷/۵-۱۲	۴-۷
الکتریکی	۱/۳۷-۱/۶۷	۳-۶	۲/۵-۳/۵	۱/۵-۲

#### ۴. مروری بر مطالعات تجربی

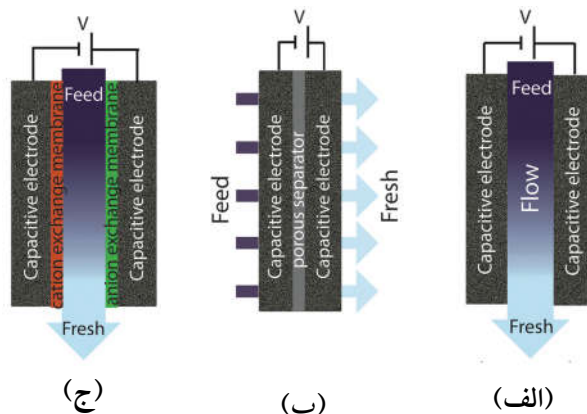
سابقه مطالعه بر روی کاربرد الکترودهای متخلخل کربنی برای آب شیرین‌کن به سال ۱۹۶۰ می‌رسد. در ابتدا این فناوری با نام‌های «یون‌زدایی الکتروشیمیایی» یا «فرایند جذب الکتریکی برای نمک‌زدایی آب» شناخته می‌شد [۲۶-۳۴]؛ لیکن به تازگی مورد توجه روز افزون محققان دانشگاهی قرار گرفته است و شرکت‌ها شروع به بازاریابی تجاری این فناوری کرده‌اند. از اصطلاح CDI اولین بار توسط فارمر و همکاران در سال ۱۹۹۵ استفاده شد [۳۵]. در ادامه، مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در این بازه زمانی ارائه می‌شود.

#### ۴.۱. معرفی ایده و دستگاه و مطالعات اولیه روی الکترودها

(۱۹۶۰-۱۹۷۰)

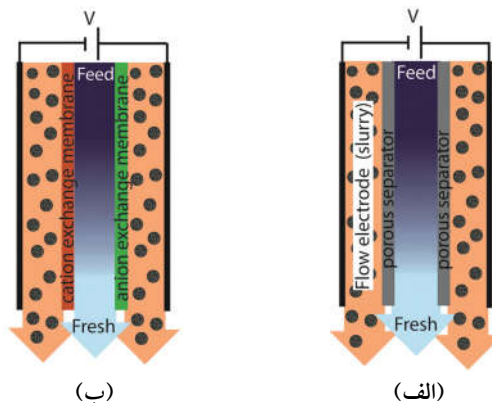
یکی از اولین کارهایی که روی آب شیرین‌کن‌های خازنی انجام شده، توسط بلیر و مورفی در سال ۱۹۶۰ گزارش شده است. طبق مطالعه بلیر و مورفی [۲۶] بیشتر مواد گرافیت‌مانند و دیگر اشکال کربن، وقتی به‌عنوان ماده الکترود استفاده می‌شدند، معرف کاتیون بودند و به این

هادی الکتریسیته باشد هم مقاومت مناسبی در مقابل خوردگی داشته باشد) است و به‌طور کلی اگر الکترودها سخت باشند این کلکتورهای جریان می‌توانند حذف شوند. لایه بعدی الکترودها هستند؛ جایی که لایه مضاعف الکتریکی شکل می‌گیرد و یون‌ها ذخیره می‌شوند. مواد الکترودها باید هادی الکتریسیته بوده، مساحت سطح و حجم حفره داخلی مناسبی داشته باشند. معمول‌ترین مواد مصرفی، کامپوزیت‌های کربن فعال‌شده و یک ماده مقید است [۲۳].



الکترودهای ثابت (صلب): الف. جریان بین الکترودها ب. جریان از

داخل الکترود ج. آب شیرین‌کن خازنی غشایی



الکترودهای جاری: الف. جریان آب خوراک بین الکترود ب. الکترود

جاری غشایی

شکل (۱): انواع مختلف دستگاه‌های آب شیرین‌کن خازنی [۲۲]

#### ۳. مقایسه مصرف انرژی در سیستم‌های مختلف آب شیرین‌کن

#### و مزایای آب شیرین‌کن‌های خازنی

از میان روش‌های مختلفی که در سال‌های اخیر برای نمک‌زدایی از آب شور مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌اند، آب شیرین‌کن‌های خازنی از لحاظ مقاومت بیشتر، بهینه بودن از لحاظ مصرف انرژی، هزینه اقتصادی و قابلیت اتصال به منبع تولید توان خورشیدی مورد توجه محققان قرار گرفته است (به‌خصوص برای آب‌های شور و کمی شور)

سافر [۳۹] ایده «سیکل های پمپاژ پارامتری الکتروشیمیایی چهار عمل» به عنوان یک روش مؤثر برای به دست آوردن تفکیک دقیق بین آب شیرین شده و تغلیظ شده معرفی شد.

#### ۴.۳.۴. رشد مطالعات CDI و به کارگیری مواد و هندسه جدید برای الکترودها (۱۹۸۰-۲۰۱۰)

در دهه ۱۹۸۰، یک شکاف مطالعاتی نسبی در زمینه CDI مشاهده می شود. با شروع دهه ۱۹۹۰ تعداد فزاینده ای از پژوهش ها بر روی توسعه مواد کربنی مؤثر برای یون زدایی آب متمرکز شدند. در آن میان، توسعه مواد آبروژل کربنی توسط فارمر و همکاران [۳۵] بیشترین توجه را به خود جذب کرد. به علت ساختار یکپارچه، مساحت سطح بزرگ و قابلیت هدایت خوب، الکتروژل آبروژل کربنی پیشرفته تر و بهبود یافته تر از سیستم سنتی که از کربن های فعال استفاده می کرد محسوب می شد. مطالعات بیشتر بر روی کاربردهای آبروژل کربنی برای حذف نمک های مختلف مثل  $\text{NaNO}_3$  در مراجع [۴۰] و [۴۱] توضیح داده شده است. در سال ۲۰۰۲، فراکوویاک و همکاران [۴۲] اقدام به ساخت الکترودهایی از جنس نانولوله های کربنی چنددیواره به عنوان ابرخازن کردند. این ماده قادر به ذخیره ذرات تا ۶ برابر نانولوله های کربنی دیگر بود. از اوایل دهه اول قرن بیست و یکم استفاده از نانولوله های کربنی و نانوفیبرهای کربنی در شیرین سازهای خازنی با مزایای کارکرد آسان، هزینه کم و افزایش راندمان مورد توجه محققان قرار گرفت [۲۳ و ۴۴]. استفاده از پوشش های کربنی فعال نیز یکی از راهکارهای محققان برای افزایش راندمان و افزایش نرخ نمک زدایی بود [۴۵].

در سال ۲۰۰۶، لی و همکاران [۴۶] نوع جدیدی از آب شیرین کن خازنی به نام آب شیرین کن خازنی غشایی<sup>۲</sup> (MCDI) را معرفی کردند. در این دستگاه، غشاهای مبدل یونی به سیستم CDI اضافه می شوند. آن ها با انجام آزمایش های مختلف به مقایسه عملکرد دو دستگاه CDI و MCDI برای نمک زدایی از محلول با غلظت  $1000 \text{ ppm}$  کلرید سدیم (NaCl) پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که نرخ نمک زدایی برای MCDI ۱۹٪ بیشتر از CDI است. نرخ جریان و ولتاژ جریان الکتريکی در بیشترین نرخ یون زدایی به ترتیب  $40 \text{ ml/min}$  و  $1/27 \text{ V}$  بود. ماکزیمم نرخ مقدار نمک زدایی ۹۲٪ و مصرف انرژی الکتريکی  $1/96 \text{ Wh/L}$  است.

#### ۴.۴. رشد فزاینده مطالعات بر روی دستگاه CDI (۲۰۱۰-۲۰۲۰)

در ابتدای دهه حاضر، ثاث و همکاران [۴۷ و ۴۸] به ساخت و مطالعه

علت است که در آن زمان، توجه زیادی به توسعه یک روش برای تشخیص بین ماهیت کاتیون و آنیون و همچنین به تهیه یک الکتروژل نماینده آنیون به عنوان مثال با ترکیب ملکول های آلی شده است [۲۷]. چند سال بعد، مکانیزم یون زدایی الکتروشیمیایی با استفاده از آنالیز کولومتریکی و بالانس جرم توسط ایوانس و همیلتون [۲۹] تشریح شد. این مطالعه بحث درباره مقدار جذب یون در غیاب یک اختلاف ولتاژ خارجی را شروع کرد. ایوانس و همکاران [۳۳] همچنین در مطالعه دیگری تلاش کردند تا مکانیزم بنیادی جداسازی یون با CDI را بیان کنند. اولین مطالعه مفصل درباره توصیف ریاضی از فرایند یون زدایی بر اساس مکانیزم خازنی توسط مورفی و کودل [۳۰] ارائه شد. در این تحقیق، معادله بقای جرم و معادلات انتقال ترکیب می شوند تا غلظت نمک برحسب زمان بیان شود و از مدلی استفاده شد تا داده های تجربی را تحت شرایط کاری مختلف توصیف کند. در یک تحقیق دیگر، مورفی و همکاران [۳۲] بر روی خواص سطحی مواد کربنی مورد استفاده به عنوان الکتروژل بعد از عملیات شیمیایی برای مثال تمیزسازی با مخلوطی از اسید نیتریک و اسید سولفوریک غلیظ مطالعه کردند و به توصیف تأثیر آن ها روی بازدهی فرایند پرداختند. مطالعات مفصل تر بر روی مکانیزم و فرایندهای انتقال همراه با یون زدایی الکتروشیمیایی توسط ایوانس و همکاران [۳۳] و اوکوموزو و ایوانس [۳۴] گزارش شده است. در سال ۱۹۶۸، مطالعه ای توسط رید و همکاران [۳۱] انجام شد که ارتباط تجاری و کارکرد بلندمدت یک واحد یون زدایی بدون کاهش قابل توجه ظرفیت جذب یون با گذشت زمان را نشان داد. علاوه بر این، آن ها نشان دادند که در کنار یون های سدیم و کلراید، یون های کلسیم، منیزیم، سولفات، نترات و فسفات می توانند حذف شوند.

#### ۴.۲. مطرح شدن تئوری ایده لایه الکتريکی مضاعف ۱ (EDL) برای دستگاه (۱۹۷۰-۱۹۸۰)

یک انقلاب و توسعه در مطالعه مفهوم یون زدایی الکتروشیمیایی در اوایل ۱۹۷۰ با مطالعه جانسون و همکاران [۳۶] صورت پذیرفت. آن ها تئوری «جذب یون مدول شده پتانسیلی» را که امروزه با نام تئوری «لایه الکتريکی مضاعف» (EDL) شناخته می شود، معرفی کردند. در یک مطالعه دیگر توسط جانسون و نیومن [۳۷] توسعه مدل الکتروژل متخلخل توضیح داده شد. سافر و فولمن [۳۸] در مطالعه ای بر روی توسعه یک تکنیک جدید متمرکز شدند که اثر EDL در الکترودهای متخلخل را بررسی می کند. در این مطالعه، آن ها نتیجه گرفتند که حتی ریزترین سوراخ ها در دامنه اندازه های  $3-0/5$  نانومتر خیس می شوند و در فرایند یون زدایی شرکت می کنند. در سال ۱۹۷۸، در یک مطالعه توسط اورن و

فرایند جداگانه در پایین دست جریان سلول اتفاق بیفتد [۵۷]. فایده عمده بعدی FCDI این است که جریان‌های با شوری بیشتری را نسبت به CDI های ثابت می‌تواند شیرین کند [۵۶]. تیم تحقیقاتی دکتر کیم در سال ۲۰۱۴ یک سیستم جدید FCDI پیشنهاد کردند که در آن، مخزن الکترودهای مایع آند و کاتد یکی بود و یون‌های مثبت و منفی جذب شده در دستگاه به صورت الکترواستاتیکی خنثی می‌شوند [۵۸]. همچنین آن‌ها نشان دادند که انرژی مصرفی در طول شیرین‌سازی می‌تواند در روش FCDI بازیافت شود. آن‌ها در تحقیقی دیگر نشان دادند که دستگاه FCDI به راحتی قابلیت تکثیر شدن را دارد و ضمن ساخت این دستگاه جدید با ۵ سل نشان دادند راندمان الکتریکی آن ۵ برابر دستگاه با یک عدد سل است [۵۹]. آن‌ها مطالعاتی هم بر روی الکتروود مایع و درصد وزنی کربن فعال و نمک محلول در الکتروود مایع داشته‌اند [۶۰-۶۲]. آن‌ها همچنین عملکرد دستگاه را برای دو نوع مبادله گر یونی بررسی کرده‌اند [۶۲]. آن‌ها در جدیدترین تحقیق خود، به معرفی نوع جدیدی از دستگاه FCDI به نام شبکه زنبوری سه بعدی پرداخته‌اند که مزیت عمده آن در سهولت افزایش تعداد سل‌های دستگاه است. این ایده جدید هم‌اکنون در حال مطالعه برای افزایش راندمان می‌باشد [۶۳].

پورادا و همکاران [۶۴] عملکرد پیوسته‌ای از سیستم FCDI برای شیرین‌سازی آب و بازگشت انرژی از جریان‌های آب با شوری مختلف و با استفاده از گرا دیان غلظت CO<sub>2</sub> در فاز گازی پیشنهاد دادند. در مطالعه‌ای شبیه به FCDI پورادا و همکاران در سال ۲۰۱۲، یک فرم از الکترودهای در حرکت را از طریق حرکت دادن سیم‌هایی برای انجام نمک‌زدایی معرفی کردند [۶۵ و ۶۶]. در مطالعه آن‌ها ماکزیمم ظرفیت جذب نمک<sup>۲</sup> (SAC) با استفاده از کربن فعال، ۱۴/۳ mg/g به دست آمد. این مقدار در نتایج گزارش شده توسط جیون و همکاران [۵۶] برای الکتروود جریانی قدری بیش از ۴۰ mg/g (برای غلظت ورودی NaCl برابر ۳۵ گرم بر لیتر و نرخ جریان ۱ ml/min و نرخ جریان الکتروود سیال ۲ ml/min) می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط جندل و همکاران [۶۷] انجام شد، مقدار SAC برابر ۲۶۰ mg/g در شرایط غلظت ورودی NaCl ۱۵ g/l به دست آمده است. آن‌ها نشان دادند که سیستم الکتروود سیال نسبت به سیستم اسمز معکوس که حجم بیشتری شور آب تولید می‌کند و تنها ۵۰٪ بازیافت دارد برتری دارد. آن‌ها بیان کردند که عیب سیستم FCDI مسدود شدن مجراها به علت جریان کربن است. رامرسکیچن و همکاران [۶۸] نیز با معرفی هندسه جدید به مطالعه شیرین‌سازی آب با روش FCDI پرداختند. یکی دیگر از مشکلات پیش

آب شیرین کن خازنی با عبور جریان از میان الکترودهایی با نام جریان از داخل الکتروود<sup>۱</sup> پرداختند. آن‌ها از مواد جدید مونولیت آیروژل کربنی سلسله‌مراتبی برای الکترودها استفاده کردند و نشان دادند که این شکل از قرارگیری الکترودها می‌تواند زمان شیرین‌سازی را کاهش و خوراک با شوری بیشتری را شیرین‌سازی نماید. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دستگاه آن‌ها قادر است ۷۰ mM NaCl از غلظت خوراک را در هر شارژ کم کند و متوسط نمک‌زدایی ۱ g/g.min (برحسب گرم نمک‌زدایی بر گرم الکتروود بر دقیقه) می‌باشد که ۴ تا ۱۰ برابر بیشتر از شکل‌های مرسوم CDI است.

ماینت و دوتا [۴۹] در مطالعه‌ای، به ساخت الکترودهای با پوشش کربن فعال اصلاح شده با نانومیله ZnO برای سیستم یون‌زدایی خازنی پرداختند. مطالعه آن‌ها با غلظت کم محلول (۱۰۰ ppm NaCl) در یک مدل جریان از داخل خازن انجام شد. نتایج آن‌ها افزایش راندمان در اثر استفاده از نانومیله ZnO را نشان می‌دهد [۵۰]. گروه تحقیقاتی پروفیسور دوتا در تحقیقات مفصل دیگری از جمله کار لاکسمن و همکاران [۵۵-۵۱] به مطالعه شیرین‌سازی و ضد عفونی کردن آب‌های زیرزمینی شور مزه با استفاده از الکترودهای با روکش کربن فعال نانوی متخلخل در آب شیرین کن خازنی پرداختند. آن‌ها بیان کردند که با توجه به ظرفیت نمک‌زدایی و جای کم مورد نیاز آب شیرین کن خازنی این دستگاه به عنوان گزینه‌ای برای رشد و ترقی و توجه برای شیرین‌سازی آب‌های زیرزمینی قرار گیرد. آن‌ها با استفاده از ترکیب پوشش کربن فعال پوشیده شده با نانومیله‌های بلند ZnO به بهبود ۴۰٪ نسبت به الکتروولیت‌های کربن فعال ساده رسیدند [۵۲ و ۵۳]. در مطالعه آن‌ها ظرفیت جذب نمک ۱/۸ mg/g و راندمان شارژ ۸۰٪ و بهبود مصرف انرژی ۴۰٪ به دست آمد. لاکسمن و همکاران [۵۴] در تحقیقی دیگر به بررسی عددی اثر طول و قطر نانومیله ZnO بر روی نمک‌زدایی آب پرداختند. لاکسمن و همکاران [۵۵] همچنین در مطالعه تجربی دیگر به بررسی اثر تقارن و عدم تقارن الکترودها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین جذب نمک برای الکترودهای متقارن اتفاق می‌افتد.

در سال ۲۰۱۳، یک نوع جدید از CDI توسط گروه تحقیقاتی دکتر کیم [۵۶] معرفی شد که در آن الکترودهای جاری کربنی یا الکترودهای آبکی کربنی می‌توانند از قسمت الکتروود پمپ شوند. این نوع الکترودهای جاری<sup>۲</sup> FCDI دو برتری عمده نسبت به الکترودهای ثابت CDI دارند. اول اینکه در FCDI آب خوراک از داخل یک تک سلول جریان می‌یابد و دائماً می‌تواند نمک‌زدایی شود؛ بنابراین دشارژ شدن اجزای کربن‌های فعال (که شوراب را تشکیل می‌دهد) می‌تواند در یک

1. Flow Through Capacitive Deionization
2. Flow-Electrode Capacitive Deionization

صلب از یون‌ها که مجاور صفحه باردار در فاصله‌ای به اندازه شعاع یون‌ها قرار دارد فرض شد. او فرض کرد سیستم در حال تعادل است و تعداد یون‌های حاضر در لایه جذب شده دقیقاً برابر تعداد بار روی صفحه مسئله است و یک افت ولتاژ خطی از سطح باردار تا هسته بار مخالف وجود دارد و اینکه یون حجم محدود ندارد. درحالی‌که این نظریه انقلابی در زمان خودش بود و در تعداد زیادی از مطالعات از این مدل ساده استفاده شد اما نشان داده شد که یون‌ها چنین رفتاری در ذات خود ندارند و یک لایه شل و آزادی در کنار صفحه باردار شکل می‌گیرد. همچنین برای سطوح با بار زیاد یا یون‌های بزرگ، احتمال دارد تعداد یون‌های لازم برای خشی کردن بار صفحه‌ای از نظر فیزیکی به علت اندازه محدود یون‌ها برای جایگیری روی سطح باردار غیرممکن باشد [۷۸]. به منظور تصحیح این ایراد در اوایل قرن بیستم مدلی توسط کوی (۱۹۱۰) و چپمن (۱۹۱۳) مستقلاً ارائه شد [۷۵] که در ادامه معرفی می‌شود.

#### ۵. ۱. ۲. مدل کوی-چپمن<sup>۲</sup>

کوی و چپمن فرضیات مدل هلم هولتز (فرض تشکیل لایه صلب از یون‌ها کنار صفحه باردار) را با بهبود معادله پواسون-بولتزمن توسعه دادند تا افت پتانسیل و توزیع یون‌ها را در لایه جدید «پراکنده» مدل کنند. در مدل آن‌ها توزیع یون‌ها برحسب جنبش گرمایی یون‌هاست. این مدل همچنان فرض می‌کند که سیستم در تعادل است، یون‌ها نقطه باردار هستند و این یون‌ها می‌توانند بی‌نهایت به صفحه باردار نزدیک شوند. استخراج این مدل با معادله پواسون برای مختصات متعامد شروع می‌شود که ولتاژ محلی  $V$  را با بار محلی  $\rho$  برحسب  $C/m^3$  با تقسیم بر گذردهی دی‌الکتریک مرتبط می‌کند (رابطه ۱)،  $x$  و  $y$  و  $z$  مؤلفه‌های مختصات کارتزین هستند [۷۵]. فرض می‌شود که ابعاد صفحه در جهت‌های  $y$  و  $z$  بی‌نهایت است، بنابراین از گرادیان ولتاژ در آن جهت‌ها صرف نظر می‌شود. برای به دست آوردن توزیع پتانسیل الکتریکی بی‌بعد از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\sigma(x) \cdot F}{\epsilon_r \epsilon_0 V_T} \quad (2)$$

$$V_T = k_B T / e$$

$\sigma(x)$  ولتاژ حرارتی و  $\psi$  پتانسیل بی‌بعد،  $F$  ثابت فارادی،

دانسیته بار برحسب  $\text{mol/m}^3$  است. حال بنا بر معادله بولتزمن برای محاسبه غلظت محلی یون  $C_i$  برحسب  $\text{mol/m}^3$  در حضور یک پتانسیل الکتریکی از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$c_i(x) = z C_b \exp(-z_i(\psi(x) - \psi_b)) \quad (3)$$

رو در سیستم FCDI ضریب انتشار الکتریسیته پایین الکترودهای جریانی است. این مقدار در حدود ۰/۱ تا  $1 \text{ mS/cm}$  است که حاصل حرکت بار الکتریکی از یک شبکه ناپیوسته ذرات کربن است. این ضریب انتشار چند مرتبه کمتر از آن چیزی است که در الکترودهای ثابت به دست می‌آید [۶۹ و ۷۰]. به منظور حل این مشکل در سال ۲۰۱۶، مطالعه‌ای تجربی توسط دورنباش [۷۱] و همکاران انجام شد. آن‌ها بیان کردند که ضریب انتشار الکتریکی تابع قوی از درصد وزنی کربن<sup>۱</sup> (CWP) (که با  $\text{wt}\%$  بیان می‌شود) در جریان الکتروود است. آن‌ها این مقدار را تا  $35\% \text{wt}$  افزایش دادند.

از جمله آخرین پیشرفت‌ها در زمینه آب شیرین کن‌های خازنی می‌توان به مطالعه گروه تحقیقاتی دکتر کیم اشاره کرد [۷۲]. آن‌ها از یک سیستم نمک‌زدایی سه‌بعدی با استفاده از ساختارهای شبکه لانه زنبوری<sup>۲</sup> برای سیستم FCDI استفاده کرده‌اند. این دستگاه فضای بسیار کمتری نسبت به نمونه‌های قبلی FCDI اشغال می‌کند. این ایده گامی در جهت تجاری‌سازی دستگاه FCDI است. همچنین نویسندگان مقاله حاضر در مطالعاتی به بررسی اثرات ساختار لایه جداکننده (از قبیل تخلخل، ضخامت و ترشوندگی) و همچنین شرایط ورودی (خواص مکانیکی و حرارتی) جریان‌های آب نمک و الکتروود جاری بر روی کارایی دستگاه FCDI پرداخته‌اند [۷۳ و ۷۴].

### ۵. مروری بر مطالعات عددی و مدل‌سازی‌ها

در شرایط ایدئال یک مدل برای CDI باید بر اساس اصول کارکردی دستگاه بوده و قادر به پیش‌بینی عملکرد هر سیستم داده‌شده بر اساس پارامترهای قابل اندازه‌گیری باشد [۷۵]. توضیح برخی از این مدل‌ها در ادامه آمده است.

#### ۵. ۱. مدل‌سازی لایه مضاعف الکتریکی

لایه مضاعف یا لایه الکتریکی مضاعف پدیده‌ای است که در سطوح مشترک جامد-مایع اتفاق می‌افتد. یک لایه الکتریکی مضاعف یک تراکم یون‌های با بار الکتریکی خاص در نزدیکی الکتروود غیر هم‌نامی است که تحت پتانسیل الکتریکی قرار گرفته است [۷۶]. در لایه الکتریکی مضاعف دو قسمت وجود دارد: الف. لایه فشرده یا هلم هولتز، ب. لایه پراکنده یا کوی-چپمن.

#### ۵. ۱. ۱. مدل هلم هولتز

اولین توصیف لایه الکتریکی مضاعف توسط هلم هولتز در سال ۱۸۵۳ میلادی انجام شد [۷۷]. مدل پیشنهادی هلم هولتز به صورت یک لایه

1. Carbon Weight Percent (CWP)  
2. Honeycomb-Shaped Lattice Structures

$C_b$  غلظت یون بالک،  $Z_i$  علامت و اندازه ظرفیت شیمیایی (والانس) یون  $i$ ،  $\psi(x)$  پتانسیل بی بعد محلی و  $\psi_b$  پتانسیل بی بعد توده محلول است که معمولاً صفر است. این توصیف از غلظت یون می تواند برای مشخص شدن بار محلی  $\sigma$  به کار رود (وقتی علامت یون ها به کار گرفته شود) که این می تواند در یک سیستم ساده با یک الکترولیت متقارن و فرض یک الکتروود با بار منفی با کم کردن غلظت یون محلی  $C$  از  $+C$  به دست آید. با ترکیب معادله پواسون با پروفیل غلظت که توسط معادله بولتزمن داده شده است، معادله (۴) به دست می آید:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \frac{F}{\epsilon_r \epsilon_0 V_T} \cdot 2zC_b \cdot \sinh(z(\psi(x) - \psi_b)) \quad (4)$$

### ۵. ۱. ۳. مدل کوی-چپمن-استرن<sup>۱</sup>

به هر حال این تقریب در مدل کوی-چپمن (بخش قبل) به یون ها اجازه می دهد که بی نهایت به صفحه باردار نزدیک شود. به دلیل اندازه محدود یون ها و غشای آبدار آن ها، مرکز آن ها نمی تواند همان گونه که در این مدل پی بینی شده است کاملاً به صفحه باردار متصل شود. این موضوع منجر به خطای زیادی می شود به خصوص وقتی سیستم هایی با غلظت یون بالا یا ولتاژ اعمالی بالاتر از ولتاژ حرارتی (تقریباً ۲۵/۷ میلی ولت در دمای اتاق) باشد. این باعث شد که استرن معادله هلم هلتنز و کوی-چپمن را ترکیب کند؛ به طوری که یون ها اجازه نمی یابند تا از شعاع هیدرولیکی یون ها به صفحه باردار نزدیک تر شوند [۷۹]. بیشینول و همکاران [۸۰] از مدل کوی-چپمن-استرن در CDI استفاده کردند.

در حالی که این اصلاحات بهبود قابل توجهی در مدل اصلی هلم هلتنز هست ولی هنوز فرضیاتی وجود دارد که اجازه کاربرد مستقیم مدل کوی-چپمن-استرن در CDI را نمی دهد. فرض اینکه یون ها نقطه های باردار هستند، اجازه خواهد داد که غلظت های پیش بینی شده بیش از قابلیت حل نمک باشد [۷۵]. همچنین فرض صاف بودن صفحه باردار فقط وقتی می تواند معتبر باشد که حفره ای به شکل شکاف بلند و بی نهایت پهن وجود داشته باشد. لذا اصلاحاتی بر روی این مدل انجام شده که در ادامه آمده است.

### ۵. ۱. ۴. اصلاح مدل کوی-چپمن-استرن

اگرچه مدل کوی-چپمن-استرن برای لایه الکتریکی مضاعف به نظر قوی است و از آن به عنوان یک تقریب معتبر استفاده می شود، حتی در مواردی که فرضیات حاکم غلظت نمک و ولتاژ اعمالی کم باشد، شبیه سازی CDI برای این مدل پیچیده به نظر می رسد [۲۳]. ساختار

صفحه متخلخل از مواد کربنی که به عنوان الکتروود به کار برده می شود، منجر به روی هم افتادگی (تداخل) قابل توجهی از لایه پراکنده می شود. از آنجایی که مدل کوی-چپمن-استرن یک صفحه عایق تخت را در نظر می گیرد، این روی هم افتادگی باعث می شود که این مدل مقدار یون زدایی را زیاد برآورد کند. ثانیاً در مدل GCS فرض می شود که یون ها نقاط باردار هستند. این فرض برای ولتاژ اعمالی کمتر از ولتاژ حرارتی که تقریباً ۲۵/۷ میلی ولت است معتبر است. اما CDI معمولاً در ۱/۲ ولت کار می کند. بنابراین پتانسیل اعمالی روی هر الکتروود ۰/۶ ولت در شرایط تقارن است که ۲۰ برابر ولتاژ حرارتی است. بنابراین اصلاحاتی باید انجام شود تا اندازه محدود یون ها در نظر گرفته شود.

### الف. اصلاح ساختار سطح، مدل دونان اصلاح شده

مدل دونان اصلاح شده<sup>۲</sup> ناظر بر موضوعات با هندسه حفره پیچیده و لایه های الکتریکی مضاعف روی هم افتاده است با این فرض که EDL در میکرو حفره ها ( $> 2 \text{ nm}$ ) در ساختار کربنی آنقدر روی هم افتاده اند که پتانسیل داخل این میکرو حفره ها در کل حفره بدون تغییر می ماند؛ به طوری که کل نمک زدایی تابعی از حجم کل حفره ها به جای مساحت سطح است [۸۰]. این مدل همچنین فرض می کند که سیستم در تعادل است و یون ها بارهای نقطه ای هستند. فرض غلظت و پتانسیل حفره ثابت وقتی معتبر است که طول دی بای خیلی کوچک تر از قطر مؤثر یا پهنای حفره است. این مفهوم در شکل (۲) نشان داده شده است. خط توپر پروفیل ولتاژ واقعی سیستم است و خط چین نشان دهنده تقریب مدل دونان اصلاح شده است. مشابه مدل کوی-چپمن-استرن، در مدل دونان اصلاح شده غلظت در میکرو حفره ها، با فرض ظرفیت شیمیایی یکسان یون ها و نمک متقارن، با معادله بولتزمن اما با دو اصلاح توصیف می شود (رابطه ۵).  $C_{i,mi}$  غلظت یون  $i$  در میکرو حفره است و  $C_{salt,MA}$  غلظت یون های نمک در ماکرو حفره ها است که برابر با غلظت توده یون است. در اولین اصلاح، ولتاژ در حفره ثابت در نظر گرفته می شود بنابراین تغییری در غلظت با فاصله از صفحه باردار وجود ندارد. ثانیاً یک ترم جذب  $\mu_{att}$  توسط پرودا [۲۳] اضافه شد تا انرژی جذب غیر الکترواستاتیک که منجر به جذب یون به کربن در غیاب پتانسیل اعمالی می شود، محاسبه گردد.

$$c_{i,mi} = c_{salt,MA} \exp(-z_i(\psi_{St} - \psi_b) + \mu_{att}) \quad (5)$$

مدل دونان اصلاح شده از لحاظ تئوری در موردی که لایه های پراکنده روی هم افتاده اند، خیلی خوب کار می کند هر چند در یک کربن با یک درصد کم از میکرو حفره ها یا شوری بالا، این فرض حفظ

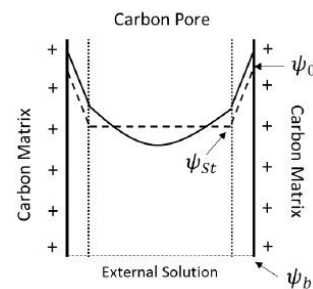
اساس ترم کسر حجمی حساب کند [۷۵، ۸۲ و ۸۳]. رابطه CS اغلب دقیقاً با بسط ویریا برآزش می شود [۸۴]. رابطه CS برای ضرایب تراکم کمتر از ۰/۵۵ به شدت دقیق است. لایه استرن به عنوان یک خازن مدل می شود تا پتانسیل بی بعد در صفحه استرن  $\psi_{St}$  تعیین شود [۷۵].

همان طور که گفته شد، مدل کوی-چپمن-استرن برای حفره های بزرگ که لایه های الکتریکی مضاعف تداخلی ندارند و صفحه باردار تخت است و مدل دونان اصلاح شده برای حفره های خیلی کوچک ( $2 \text{ nm} <$ ) که لایه الکتریکی مضاعف روی هم افتادگی زیادی دارد کاربرد دارند [۸۵]. هیلدریند [۷۵] دو مدل mD و GCS را با استفاده از معادله حالت CS از لحاظ اندازه محدود یون اصلاح کرده و از بین این دو مدل، مدل GCS اصلاح شده با معادله حالت CS را برای تمام اندازه حفره (در نظر گرفتن حفره های متوسط) توسعه داده است. به این منظور یک اصلاح ساده از شرایط مرزی انجام می شود؛ به طوری که مشتق اول پتانسیل در مرکز حفره صفر در نظر گرفته می شود.

## ۲. مدل سازی دینامیکی جریان در دستگاه CDI

اولین مطالعه عددی دوبعدی توسط جیون و همکاران [۸۸-۸۶] انجام شده است. آن ها برای مدل کردن انتقال جرم به حل معادله نرست پلانک پرداخته اند و معادله پواسون برای پتانسیل الکتریکی را در نظر گرفته اند. آن ها برای شبیه سازی EDL از مدل کوی-چپمن-استرن استفاده کردند. شبیه سازی آن ها برای یک تک حفره انجام شده است. در مطالعه آن ها ضمن حل عددی به بررسی پارامتری مشخصات حفره پرداخته شده است. در مطالعه دیگری، مدل دینامیکی CDI توسط همتی فر و همکاران [۸۹] در تیم تحقیقاتی دکتر سانتیاگو در دانشگاه استفرد انجام شده است. آن ها از مدل دونان اصلاح شده برای مدل سازی لایه الکتریکی مضاعف استفاده کرده اند. آن ها برای ناحیه محیط متخلخل هیچ گونه جریانی را متصور نشدند و آثار آن را مانند چاه و چشمه در نظر گرفتند. آن ها از یک معادله پیوستگی برای انتقال جرم یون استفاده کردند و با جمع و تفریق معادله پیوستگی با استفاده از تقریب ختایی الکتریکی، معادلات بقای نمک و توزیع پتانسیل را در دو بخش، فضای بین دو الکترود و داخل الکترودها (با ملاحظات مربوط به تخلخل میکرو و ماکرو حفره ها) به دست آوردند [۸۹]. همتی فر و همکاران [۸۹] پروفیل سرعت در بین دو الکترود را توسعه یافته در نظر گرفته اند که تأثیری از میدان الکتریکی نمی پذیرد و هیچ جریانی را در محیط متخلخل متصور نیستند. همچنین کیو و همکاران در تیم تحقیقاتی دکتر سانتیاگو به مدل سازی دوبعدی نمک زدایی در یک دستگاه آب شیرین کن خازنی جریان از داخل الکترود (مطابق شکل ۱) پرداخته اند [۹۰]. مدل سازی جریان با حل کامل معادلات ناور-استوکس در حضور میدان الکتریکی

نخواهد شد؛ زیرا طول دی بای آقدر بزرگ نیست که باعث روی هم افتادگی مورد توجه و یک ولتاژ ثابتی در حفره شود.  $Matt$  نیز ظاهراً ترم مزاحمی است به طوری که به نظر می رسد این ترم به عنوان پارامتر انطباق اضافه شده تا اطمینان دهد مدل بهتر داده را بیان می کند. به علاوه به علت تعداد پارامترهای انطباق حاضر در این مدل مانند  $Matt$  و  $\psi_{St}$ ، این مدل هنوز یک مدل پیشگو برای کارکرد الکترود با پارامترهای فیزیکی آن نیست.



شکل (۲): روی هم افتادگی (تداخل) لایه های الکتریکی مضاعف در یک میکرو حفره اصلاح شده [۸۱]

## ب. اصلاح اندازه محدود یون

گرچه مدل کوی-چپمن-استرن برای حفره های بزرگ یعنی وقتی روی هم افتادگی قابل توجهی وجود ندارد معتبر است، در مواردی که غلظت بالاست و وقتی یون ها به عنوان بارهای نقطه ای مدل می شوند، این مدل غلظت تخمینی را بیشتر از نتایج ممکن گزارش می کند. به این علت اصلاحات مختلفی برای آن ارائه شده است. یکی از این مدل ها تخمین عمومی متوسط کروی<sup>۱</sup> (GMSA) است. GMSA بر اساس بسته ای از شبکه زنجیری بسیار مشبک از معادله اورنستین-زرنیک است که تعامل و فعل و انفعالات ملکول ها/اتم های کروی در محلول را بیان می کند. مدل GMSA معیابی دارد. این مدل به منظور اصلاح اندازه محدود یون از پارامترهای تجربی و معادلاتی استفاده می کند که ایدئال نیست. به علاوه این مدل غلظت اضافی در طول کل لایه پراکنده را محاسبه نمی کند و فقط از طول GMSA و بدون به کارگیری یک روش برای تعیین پروفیل غلظت در لایه پراکنده به منظور اصلاح آن استفاده می کند [۷۵].

یک تئوری دیگر در چگونه در نظر گرفتن اندازه محدود یون، معادله حالت کارناهان-استارلینگ<sup>۲</sup> (CS) است. این مدل توسط نورمن کارناهان و کنس استارلینگ در سال ۱۹۶۹ توسعه یافته است. معادله CS از یک ترم پتانسیل الکتروشیمیایی اضافی بی بعد استفاده می کند تا حجم محدود یون را با تقریب پتانسیل الکتروشیمیایی مورد نیاز غلظت یون بر

1. General Mean Spherical Approximation (GMSA)  
2. Carnahan-Starling Equation of State



و لحاظ کردن اثرات میدان الکتریکی بر روی جریان [۹۲-۹۴] و در محیط متخلخل [۹۵] در دستگاه آب شیرین کن خازنی توسط نویسندگان این مقاله در حال انجام است و در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.

## ۶. دستگاه آب شیرین کن خازنی کوپل با انرژی خورشیدی

مطالعه بر روی کوپل انرژی‌های پاک و دستگاه‌های تصفیه آب یکی از زمینه‌های جذاب برای بسیاری از محققان است. در مطالعه بیتار و احمد [۹۶] به مقایسه اتصال چند نوع از دستگاه‌های آب شیرین کن با انرژی خورشیدی و هسته‌ای پرداخته شده است. آن‌ها در گزارش خود ۱۰ ترکیب از دستگاه‌های آب شیرین کن MED، MSF و RO را با دو نوع انرژی هسته‌ای و خورشیدی (فوتولتائیک و متمرکز) مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که ارزان‌ترین تکنولوژی از بین تکنولوژی‌های مورد مطالعه برای تولید آب شیرین، ترکیب انرژی خورشیدی و دستگاه اسمز معکوس (RO) است. از جمله مطالعات در زمینه شیرین‌سازی آب شور با انرژی خورشیدی می‌توان به مطالعه گرجیان و همکاران [۵] اشاره کرد. آن‌ها به طراحی و ساخت یک دستگاه نمک‌زدایی سهموی خورشیدی با کانون نقطه‌ای پرداختند. آن‌ها نشان دادند که بیشینه تولید آب شیرین در روز، ۵/۱۲ کیلوگرم در بیشینه تابش خورشید  $627 \text{ W/m}^2$  است. نتایج آن‌ها نشان داد دمای هوا و میزان شوری آب نمک بر نرخ تولید آب شیرین تأثیری ندارد. محققان دیگری نیز بر روی موضوع شیرین‌سازی آب شور با استفاده از تکنولوژی تقطیر خورشیدی مطالعاتی داشته‌اند از جمله مراجع [۱۴] و [۱۵]. بنا بر اطلاع نویسندگان تاکنون هیچ مطالعه‌ای بر روی کوپل دستگاه آب شیرین کن خازنی و انرژی فوتولتائیک خورشیدی انجام نشده است. باید یادآوری شود که دستگاه FCDI برای یون‌زدایی نیاز به ولتاژی از مرتبه ۱ و جریان مستقیم دارد. این دقیقاً همان چیزی است که با استفاده از پنل‌های خورشیدی با هزینه کم قابل تأمین است. از آنجا که کشور ایران مشکل کم‌آبی و موهبت انرژی خورشیدی را کنار هم داراست، نویسندگان این مقاله برای اولین بار به صورت عملی دستگاه آب شیرین کن خازنی الکتروود جاری را با انرژی خورشیدی کوپل کرده‌اند.

نوع دستگاه مورد مطالعه، سیستم آب شیرین کن خازنی با الکتروودهای جاری است. همان طور که قبلاً گفته شد، فرق اصلی این نوع از دستگاه آب شیرین کن با نوع عمومی آن، الکتروودهای جاری به جای الکتروودهای صلب است. این نوع دستگاه در واقع جدیدترین ایده در آب شیرین کن‌های خازنی است که توسط یکی از نویسندگان این مقاله در سال ۲۰۱۳ مطرح شده است [۵۶].

شکل (۳) نمایی از دستگاه آب شیرین کن خازنی الکتروود جاری با

تأمین انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد. آب نمک وارد دستگاه می‌شود و بعد از عبور از یک جداکننده پلیمری محیط متخلخل در مرکز دستگاه، آب شیرین شده خارج می‌شود. دو طرف محیط متخلخل با تبادل‌گرهای یونی آنیون و کاتیون از کلکتورهای هادی الکتریسیته (که در بردارنده کانال‌های عبور الکتروود جاری می‌باشند) جدا می‌شود. تبادل‌گرهای یونی دارای ضخامت ۱۶۰ میکرومتر و ساخت ژاپن است. مساحت سطح مشترک بین الکتروود جاری و تبادل‌گر یونی ۱۲/۷ سانتی‌متر مربع است. لایه بیرونی دستگاه که نگه دارنده تجهیزات داخلی هستند، عایق الکتریسیته است. الکتروودهای جاری از یک طرف وارد کانال شده و پس از عبور از کانال تعبیه شده بر روی کلکتور از طرف دیگر آن خارج می‌شود. از یک واشر سیلیکونی برای جلوگیری از اتصال هر کلکتور با کلکتور روبه‌روی استفاده می‌شود. مخزن آند و کاتد می‌تواند جدا باشد و بعد از جذب یون در دستگاه در مرحله دیگر یون‌های جذب شده در آند و کاتد با معکوس کردن جریان الکتریسیته دفع شود. ولی راه‌حل ساده‌تر این است که این دو مخزن یکی شوند و یون‌های منفی و مثبت جذب شده در یک مخزن با همدیگر ترکیب و ختنی شوند. لذا در این آزمایش، از روش دوم استفاده می‌شود و مبدأ و مقصد هر دو جریان الکتروود منفی و مثبت یک مخزن است.

الکتروود جاری که محلولی از آب مقطر و نمک و کربن فعال است، از حل همگن کربن فعال تجاری در محلول آب نمک ۰/۱ مول به دست می‌آید. درصد وزنی کربن در الکتروود جاری ۱۰ می‌باشد. این مخلوط به مدت ۲۴ ساعت به وسیله مخلوط‌کن مغناطیسی به یک محلول همگن تبدیل و قابل استفاده می‌شود. شکل کرووی کربن فعال به وسیله میکروسکوپ الکترونی اسکن و تأیید شده است. اندازه متوسط ذرات کرووی شکل کربن فعال که با استفاده از آنالیز اندازه ذرات برآورد شده، ۱۲/۸۳ میکرومتر است. مساحت سطح مخصوص، قطر حفره متوسط و حجم کل حفره ذرات کربن فعال با روش برانور-امت-تالر به ترتیب برابر  $3011 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ،  $2/49 \text{ nm}$  و  $1/63 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$  می‌باشد.

در گام اول برای تأمین انرژی الکتریکی، از چهار سلول خورشیدی که مشخصه هر کدام ۰/۵ وات، ۲ ولت و ۰/۲۵۰ آمپر است، به صورت موازی استفاده شد. زاویه نگاه‌دارنده سلول‌ها با افق با توجه به عرض جغرافیای محل آزمایش (شهر دجان کره جنوبی با عرض جغرافیای ۳۶/۲ درجه) برای روز ۱۶ دی ماه ۱۳۹۶ مقدار ثابت ۱۶/۹ درجه برای دریافت بیشترین تابش در ظهر در نظر گرفته شد. دمای هوای بیرون حدود ۳ درجه سانتی‌گراد بود. جدول (۲) راندمان نمک‌زدایی ( $E\%$ ) برحسب دبی حجمی آب نمک را نشان می‌دهد. راندمان نمک‌زدایی عبارت است از نسبت اختلاف غلظت نمک ورودی و خروجی

جدول (۲): راندمان نمک زدایی آب دریا (۳۵ g/L) در  $FR_{W}$  مختلف

$FR_{W}$ (mL/min)	۰/۵	۱	۲
$V_{cell}$ (V)	۱/۵	۱/۱۱	۱/۰۴
$c_{out}$ (g/L)	۱۱/۴	۱۷/۳	۲۵
$E\%$	۶۷/۴	۵۰/۶	۲۸/۶

### ۷. جمع بندی

نیاز به آب سالم و شیرین، یکی از مشکلات حال حاضر و پیشروی بشر است. در میان تکنولوژی های آب شیرین کن، آب شیرین کن های خازنی به علت استفاده از پوشش های کربنی در ابعاد نانو و افزایش راندمان در الکترودهای متخلخل و جداسازی یون از سیال پایه و در نتیجه کاهش هزینه و انرژی، به ویژه در سال های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده است. اما در داخل کشور، آنچنان که باید به این موضوع پرداخته نشده است. در سطح جهانی آزمایش های تجربی در این زمینه انجام شده و همچنان در حال انجام است. در این مطالعه به مرور مطالعات تجربی، عددی و مدل های متعدد معرفی و توسعه داده شده برای بیان فعل و انفعالات در آب شیرین کن خازنی پرداخته شد. در بخش دوم این مطالعه، به بررسی کوپل دستگاه آب شیرین کن خازنی الکتروود جاری با انرژی فتوولتائیک خورشیدی پرداخته شد. به این منظور ابتدا سل FCDI مورد مطالعه معرفی شد. در این مطالعه از پنل های خورشیدی به صورت مستقیم برای تأمین انرژی مصرفی جذب یون استفاده شد. نتایج نشان داد که آب دریا با گذر از این دستگاه با اتصال به پنل خورشیدی ۲ وات، در یک مرحله ۵۰ درصد شیرین شد. در آزمون دیگر برای رساندن آب نمک خروجی از آزمایش اول به آب قابل شرب، از پنل خورشیدی ۰/۷۵ ولت استفاده شد و ۵۰ میلی لیتر آب شور خروجی از مرحله قبل در یک سیکل بسته با گذشت ۱ ساعت به آب قابل شرب تبدیل شد.

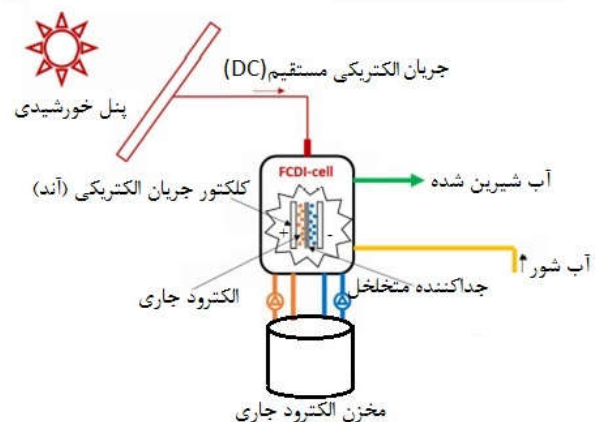
### فهرست علائم

$c$	غلظت (g/L یا $\text{mol/m}^3$ )
$E$	راندمان نمک زدایی (%)
$F$	ثابت فارادی (C/mol)
$T$	دما (K)
$V$	ولتاژ (V)
$x, y, z$	مؤلفه های مختصات کارتزین
$z$	علامت و اندازه ظرفیت شیمیایی (والانس)

### علائم یونانی

$\rho$	بار محلی ( $\text{C/m}^3$ )
$\mu_{att}$	جذب غیر الکترواستاتیک بی بعد
$\sigma(x)$	دانسیته بار ( $\text{mol/m}^3$ )

الکتروولیت به غلظت نمک ورودی الکتروولیت. در جدول (۲)،  $C_{out}$  (g/L) مقدار غلظت نمک خروجی آب نمک است و  $V_{cell}$  ولتاژ اندازه گیری شده از مرکز سل در انتهای فرایند نمک زدایی هر تست می باشد. اختلاف بین ولتاژ سل و ولتاژ اعمالی صرف افت ولتاژ به علت مقاومت الکتریکی دستگاه و مدار خارجی می شود. باید توجه شود که آب خالص در ولتاژ ۱/۲۳ V الکتروولیز می شود که باید از آن اجتناب شود. مؤلفان این مقاله طی آزمایش هایی بر روی دستگاه FCDI با توجه به تغییرات PH مقدار ولتاژ ۱/۳۵V را برای شروع الکتروولیز به دست آوردند که جزئیات آن در مقالات بعدی خواهد آمد. از جدول (۲) مشاهده می شود که به ازای دبی حجمی ۰/۵ mL/min ولتاژ مرکز سل به حدود ۱/۵V می رسد که بالاتر از ولتاژ الکتروولیز آب است لذا کاربردی نیست. نتایج نشان داد یک سل آب شیرین کن خازنی با مصرف ۲ وات انرژی فتوولتائیک خورشیدی (به عنوان توان الکتریکی لازم برای جذب یون) توانایی شیرین سازی آب دریا تا حدود ۵۰ درصد در یک بار عبور جریان آب نمک از سل را دارد. برای رساندن این خروجی آب نمک به آب قابل شرب می توان این آب نمک خروجی را در یک سیکل بسته و تکرار شونده از سل FCDI عبور داد. برای این آزمون دبی حجمی الکتروولیت ۲ mL/min به کار گرفته می شود. به این منظور اگر از ۳ پنل خورشیدی با مشخصه (۱/۵ V / ۱۷۰ mA / ۰/۲۵ W) به صورت موازی استفاده شود، ۵۰ mL آب نمک با غلظت ۲۰ g/L بعد از ۸۰ دقیقه به آب قابل شرب (غلظت ۱ g/L) تبدیل می شود. و همچنین ۵۰ mL آب نمک خروجی از مرحله اول با غلظت حدود ۱۷ g/L را با گذشت حدود ۱ ساعت به آب قابل شرب تبدیل می کند. در این حالت، ولتاژ سل در انتهای فرایند همچنان کمتر از ولتاژ الکتروولیز خواهد بود. نتایج نشان داد که امکان شیرین سازی آب دریا با انرژی خورشیدی با سل FCDI وجود دارد.



شکل (۳): طرحواره از کوپل دستگاه آب شیرین کن خازنی و انرژی فتوولتائیک خورشیدی

st	لايه استرن	گذردهی دی الکتریک	$\epsilon_r$
i	شمارنده یون (+ یا -)	پتانسیل الکتریکی بی بعد	$\psi$
mi	میکرو حفره	زیر نویس ها	
mA	ماکرو حفره	بالک	b
		مرکز سل	cell

## مراجع

- [۱] Karagiannis, I. C. and Soldatos, P. G., "Water desalination cost literature: review and assessment", *Desalination* Vol. 223, pp. 448-456, 2008.
- [2] Tiwari G. N. and Tiwari A. K., *Solar distillation practice for water desalination systems*, Anshan, California, 2008.
- [3] <http://porcesh.ir/27179/> last visited on 03/10/2017.
- [4] Sharqawy, M., "Thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data", *Desalination and Water Treatment*, Vol. 16, No. 10, pp. 354-380, 2010.
- [۵] گرجیان، شیوا، ساخت و ارزیابی دستگاه نمک زدایی سهموی خورشیدی با کانون نقطه‌ای، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۲.
- [6] Wikipedia. Saline water. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Saline\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Saline_water), last visited on 08/20/2016, 2013.
- [7] Darwish, M. A. and Al-Najem, N. M., "Energy consumption by multi-stage flash and reverse osmosis desalters", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 399-416, 2000.
- [8] El-Dessouky, H., Ettouney, H., Al-Fulajj, H. and Mandani, F., "Multistage flash desalination combined with thermal vapor compression", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 39, pp. 343-356, 2000.
- [9] Al-Shammiri, M. and Safar, M., "Multi-effect distillation plants: state of the art", *Desalination*, Vol. 126, pp. 45-59, 1999.
- [10] Ettouney, H., "Visual basic computer package for thermal and membrane desalination processes", *Desalination*, Vol. 165, pp. 393-408, 2004.
- [11] Mandani, F., Ettouney, H., El-Dessouky, H. and Li, B., "H<sub>2</sub>O absorption heat pump for single-effect evaporation desalination process", *Desalination*, Vol. 128, pp. 161-76, 2000.
- [12] Tleimat, M. W., *Freezing methods. Principles of Desalination*, Part B, 2nd Ed., K S Spiegler and A D Laird, New York: Academia Press. pp. 360-400, 1980.
- [13] Parekh, S., Farid, M. M., Selman, J. R. and Al-Hallaj, S., "Solar desalination with a humidification-dehumidification technique—a comprehensive technical review", *Desalination*, Vol. 160, No. 2, pp. 167-186, 2004.
- [14] Lindblom J., "Solar thermal technologies for seawater desalination: state of the art, in solar energy", *Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby*, pp. 93-108, 2003.
- [15] Bhardwaj, R., ten Kortenaar, M. V. and Mudde, R. F., "Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation", *Appl. Energy* Vol. 154, pp. 480-490, 2015.
- [۱۶] اسماعیلی، علیرضا، شکیب، سید احسان، عمیدپور، مجید، «تحلیل انرژی و انرژی کوپلینگ نیروگاه سیکل ترکیبی و آب شیرین کن تبخیری چند مرحله‌ای»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره دوم، شماره اول، صفحه ۴۰-۴۷، ۱۳۹۱.
- [۱۷] جعفریان دهکردی، علی، عظیمی باویل علیایی، سعید، بهره‌مند جوی، مجتبی، «تحلیل ترموآکونومیک تولید همزمان آب و توان از طریق نمک‌زدایی حرارتی در کنار چرخه ترکیبی پستشاری»، دوره سوم، شماره دوم، صفحه ۳۶-۴۳، ۱۳۹۲.
- [۱۸] امام دوست، نازیلا، کوهی کمالی، رامین، توفیق، علی اصغر، پالیزدار یحیی، «تعیین نقطه بهینه ترکیب آب شیرین کن، چند مرحله‌ای تبخیری با نیروگاه سیکل ترکیبی»، دوره چهارم، شماره دوم، صفحه ۵۲-۶۳، ۱۳۹۳.
- [۱۹] عباسپور، قادر، غائبی، هادی، «ارزیابی عملکرد تلفیق آب شیرین کن چند اثره تقطیری با تراکم بخار (MED-TVC) در یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما»، دوره هفتم، شماره دوم، صفحه ۶۲-۷۷، ۱۳۹۶.
- [20] Van der Bruggen B., "Desalination by distillation and by reverse osmosis — trends towards the future", *Membrane Technology*, Vol. 2, pp. 6-9, 2003.
- [21] Wang, Xiao-L., Gong, Y. and Yu, Li-X., "Process simulation of desalination by electro dialysis of an aqueous solution containing a neutral solute", *Desalination*, Vol. 172, pp. 157-172, 2005.
- [22] Suss, M. E., Porada, S., Sun, X., Biesheuvel, P. M., Yoon, J. and Presser, V., "Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it?", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 8, pp. 2296, 2015.
- [23] Porada, S., Zhao, R., Van der Wal, A., Presser, V. and Biesheuvel, P. M., "Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization", *Prog. In Mater. Sci.*, Vol. 58, pp. 1388-1442, 2013.
- [24] Subramani, A., et al., "Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: A review", *Water Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 1907-1920, 2011.
- [25] Anderson, M., Cudero, A. L., Palma, J., "Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: will it compete?", *Electrochim Acta*, Vol. 55, pp. 3845-56, 2010.
- [26] Blair, J. W. and Murphy, G.W., "Saline water conversion", *Adv. Chem. Ser.*, Vol. 27, pp. 206-23, 1960.
- [27] Arnold, B. B. and Murphy, G. W., "Studies on

- electrochemistry of carbon and chemically modified carbon surfaces*", J. Phys. Chem., Vol. 65, pp. 135-8, 1961.
- [28] Wood, E. N., Tucker, J. H., Papastamataki, A., Caudle, D., Hock, R. and Murphy, G. W., "Electrochemical demineralization of water with carbon electrodes", Washington D.C.: U. S. Dept. of the Interior, 1965.
- [29] Evans, S. and Hamilton W. S., "The mechanism of demineralization at carbon electrodes", J. Electrochem Soc, Vol. 113, pp. 1314-9, 1966.
- [30] Murphy, G. W. and Caudle, D., "Mathematical theory of electrochemical demineralization in flowing systems", Electrochim Acta, Vol. 12, pp. 1655-64, 1967.
- [31] Reid, G. W., Townsend, F. M. and Stevens, A. M., "Filed operation of a 20 gallons per day pilot plant unit for electrochemical desalination of brackish water", Washington: U.S. Dept. of the Interior, 1968.
- [32] Murphy, G. W., Cooper, J. L. and Hunter J. A., "Activated carbon used as electrodes in electrochemical demineralization of saline water", Research and progress report No. 399, Washington: U.S. Dept. of the Interior, 1969.
- [33] Evans, S., Accomazzo, M. A. and Accomazzo, J. E., "Electrochemically controlled ion exchange", J. Electrochem Soc, Vol. 116, pp. 307-9, 1969.
- [34] Accomazzo, M. A. and Evans, S., "Electrochemically controlled ion exchange", J. Electrochem Soc., Vol. 116, pp. 309-11, 1969.
- [35] Farmer, J. C., Fix, D. V., Mack, G. V., Pekala, R. W. and Poco, J. F., "The use of capacitive deionization with carbon aerogel electrodes to remove inorganic contaminants from water", In: Low Level Waste Conference, Orlando, 1995.
- [36] Johnson, A. M., Venolia, A. W., Wilbourne, R. G., Newman, J., Wong, C. M., Gilliam, W. S. and et al., "The electro sorb process for desalting water", Research and progress report No. 516, Washington: U.S. Dept. of the Interior, 1970.
- [37] Johnson, A. M. and Newman, J., "Desalting by means of porous carbon electrodes", J. Electrochem Soc, Vol. 118, pp. 510-7, 1971.
- [38] Soffer, A. and Folman, M., "The electrical double layer of high surface porous carbon electrode", J. Electroanal Chem Interfacial Electrochem, Vol. 38, pp. 25-43, 1972.
- [39] Oren, Y. and Soffer, A., "Electrochemical parametric pumping", J. Electrochem Soc, Vol. 125, pp. 869-75, 1978.
- [40] Farmer, J. C., Fix, D. V., Mack, G. V., Pekala, R. W. and Poco, J. F., "Capacitive deionization of NaCl and NaNO<sub>3</sub> solutions with carbon aerogel electrodes", J. Electrochem Soc, Vol. 143, pp. 159-69, 1996.
- [41] Farmer, J. C., Bahowick, S. M., Harrar J. E., Fix D. V., Martinelli, R. E., Vu, A. K. and et al., "Electro sorption of chromium ions on carbon aerogel electrodes as a means of remediating ground water", Energy Fuels, Vol. 11, pp. 337-47, 1997.
- [42] Frackowiak, E., Jurewicz, K., Szostak, K. and Béguin, F., "Nanotubular materials as electrodes for supercapacitors", Fuel Processing Technology, Vol. 77, No. 1, pp. 213-219, 2002.
- [43] Wang, X. Z., Li, M. G., Chen, Y. W., Cheng, R. M., Huang, S. M., Pan, L. K., and Sun, Z., "lectrosorption of ions from aqueous solutions with carbon nanotubes and nanofibers composite film electrodes", APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 89, pp. 053127, 2006.
- [44] Li, H., Gao, Y., Pan, L., Zhang, Y., Chen, Y. and Sun, Z., "Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibers electrodes and ion-exchange membranes", water research, Vol. 42, pp. 4923-4928, 2008.
- [45] Oh, H. J., Lee, J. H., Ahn, H. J. and aChi, C. S., "Nanoporous activated carbon cloth for capacitive deionization of aqueous solution", Thin Solid Films, Vol. 515, No. 1, pp. 220-225, 2006.
- [46] Lee, J. B., Park, K. K., Eum, H. M. and Lee, C. W., "Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization", Desalination, Vol. 196, pp. 125-134, 2006.
- [47] Suss, M. E., Baumann, T. F., Bourcier, W. L., Spadaccini, C. M., Rose, K. A., Santiago, J. G. and Stadermann, M., "Capacitive desalination with flow-through electrodes", Energy & Environmental Science, Vol. 5, No. 11, pp. 9511-9519, 2012.
- [48] Suss, M. E., Baumann, T. F., Worsley, M. A., Rose, K. A., Jaramillo, T. F., Stadermann, M. and Santiago, J. G., "Impedance-based study of capacitive porous carbon electrodes with hierarchical and bimodal porosity", Journal of Power Sources, Vol. 241, pp. 266-273, 2013.
- [49] Myint, M. T. Z. and Dutta, J., "Fabrication of zinc oxide nanorods modified activated carbon cloth electrode for desalination of brackish water using capacitive deionization approach", Desalination, Vol. 305, pp. 24-30, 2012.
- [50] Myint, M. T. Z., Al-Harhi, S. H. and Dutta, J., "Brackish water desalination by capacitive deionization using zinc oxide micro/nanostructures grafted on activated carbon cloth electrodes", Desalination, Vol. 344, pp. 236-242, 2014.
- [51] Laxman, K., Myint, M. T. Z., Al Abri, M., Sathe, P., Dobretsov, S. and Dutta, J., "Desalination and disinfection of inland brackish ground water in a capacitive deionization cell using nanoporous activated carbon cloth electrodes", Desalination, Vol. 362, pp. 126-132, 2015.
- [52] Laxman, K., Myint, M. T. Z., Khan, R., Pervez, T. and Dutta, J., "Effect of a semiconductor dielectric coating on the salt adsorption capacity of a porous electrode in a capacitive deionization cell", Electrochimica Acta, Vol. 166, pp. 329-337, 2015.
- [53] Laxman, K., Myint, M. T. Z., Bourdoucen, H., and Dutta, J., "Enhancement in ion adsorption rate and desalination efficiency in a capacitive deionization cell through improved electric field distribution using electrodes composed of activated carbon cloth coated with zinc oxide nanorods", applied materials & interfaces, Vol. 6, No. 13, pp. 10113-10120, 2014.
- [54] Laxman, K., Myint, M. T. Z., Khan, R., Pervez, T. and Dutta, J., "Improved desalination by zinc oxide nanorod induced electric field enhancement in capacitive deionization of brackish water", Desalination, Vol. 359, pp. 64-70, 2015.

- [55] Laxman, K., Al Gharibi, L. and Dutta, J., "Capacitive deionization with asymmetric electrodes: Electrode capacitance vs electrode surface area", *Electrochimica Acta*, Vol. 176, pp. 420–425, 2015.
- [56] Jeon, S. I., Park, H. R., Yeo, J. G., Yang, S., Cho, C. H., Han, M. H., and Kim, D. K., "Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 6, pp. 1471–1475, 2013.
- [57] Hatzell, K. B., Iwama, E., Ferris, A., Daffos, B., Urita, K., Tzedakis, T., Chauvet, F., Taberna, P. L., Gogotsi, Y. and Simon, P., "Capacitive deionization concept based on suspension electrodes without ion exchange membranes", *Electrochem. Commun.*, Vol. 43, pp. 18–21, 2014.
- [58] Jeon, S. I., Yeo, J. G., Yang, S. C., Choi, J. C., Kim, D. K. and Mater, J. Chem., "Ion storage and energy recovery of flow-electrode capacitive deionization process", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2, pp. 6378–6383, 2014.
- [59] Yang, S. C., Jeon, S. I., Kim, H., Choi, J., Yeo, J. G., Park, H. R. and Kim, D. K., "Stack design and operation for scaling up the capacity of flow-electrode capacitive deionization technology", *ACS Sustainable Chem. Eng.*, Vol. 4, No. 8, pp. 4174-4180, 2016.
- [60] Yang, S. C., Choi, J., Yeo, J. G., Jeon, S. I., Park, H. R. and Kim, D. K., "Flow-electrode capacitive deionization using an aqueous electrolyte with a high salt concentration", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 50, No. 11, pp. 5892–5899, 2016.
- [61] Park, H. R., Choi, J., Yang, S., Kwak, S. J., Jeon, S. I., Han, M. H. and Kim, D. K., "Surface-modified spherical activated carbon for high carbon loading and its desalting performance in flow-electrode capacitive deionization", *The Royal Society of Chemistry*, Vol. 6, pp. 69720–69727, 2016.
- [62] Yanga, S. C., Kima, H., Jeon, S. I., Choia, J., Yeob, J. G., Parka, H. R., Jinc, J. and Kim, D. K., "Analysis of the desalting performance of flow-electrode capacitive deionization under short-circuited closed cycle operation", *Desalination*, Vol. 424, pp. 110–121, 2017.
- [63] Cho, Y., Lee, K. S., Yang, S. C., Choi, J., Park, H. R. and Kim, D. K., "A novel three-dimensional desalination system utilizing honeycomb-shaped lattice structures for flow-electrode capacitive deionization", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 10, pp. 1746-1750, 2017.
- [64] Porada, S., Weingarth, D., Hamelers, H. V. M., Bryjak M., Presser, V. and Biesheuvel, P.M., "Carbon flow electrodes for continuous operation of capacitive deionization and capacitive mixing energy generation", *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2, No. 24, pp. 9313–9321, 2014.
- [65] Porada, S., Sales, B. B., Hamelers, H. V. M. and Biesheuvel, P. M., "Water Desalination with Wires", *J. Phys. Chem. Lett.*, Vol. 3, pp. 1613–1618, 2012.
- [66] Porada, S., Borchardt, L., Oschatz, M., Bryjak, M., Atchison, J. S., Keesman, K. J., Kaskel, S., Biesheuvel P. M. and Presser, V., "Direct prediction of the desalination performance of porous carbon electrodes for capacitive deionization", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 6, pp. 3700-12, 2013.
- [67] Gendel, Y., Rommerskirchen, A., David, O. and Wessling, M., "Batch mode and continuous desalination of water using flowing carbon deionization (FCDI) technology", *Electrochemistry Communications*, Vol. 46, pp. 152–156, 2014.
- [68] Rommerskirchen, A., Gendel, Y. and Wessling, M., "Single module flow-electrode capacitive deionization for continuous water desalination", *Electrochemistry Communications*, Vol. 60, pp. 34-37, 2015.
- [69] Xu, P., Drewes, J. E., Heil, D., and Wang, G., "Treatment of brackish produced water using carbon aerogel-based capacitive deionization technology", *Water Res.*, Vol. 42, pp. 2605–2617, 2008.
- [70] Jung, H. H., Hwang, S. W., Hyun, S. H., Lee, K. H., and Kim, G. T., "Capacitive deionization characteristics of nanostructured carbon aerogel electrodes synthesized via ambient drying", *Desalination*, Vol. 216, pp. 377–385, 2007.
- [71] Doornbusch, G. J., Dykstra, J. E., Biesheuvel, P. M. and Suss, M. E., "Fluidized bed electrodes with high carbon loading for water desalination by capacitive deionization", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 4, pp. 3642-3647, 2016.
- [72] Cho, Y., Lee, K. S., Yang, S. C., Choi, J., Park, H. R., and Kim, D. K., "A novel three-dimensional desalination system utilizing honeycomb-shaped lattice structures for flow-electrode capacitive deionization", *Energy & Environmental Science*, Vol. 10, No. 8, pp. 1746-1750, 2017.
- [73] Nikfar, M., Alemrajabi, A., Choo, K. Y., Youn, Y. and Kim, D. K., "Experimental study on the structure of spacer in a flow-electrode capacitive deionization", *Desalination and water treatment*, In press, 2020.
- [74] Nikfar, M., Alemrajabi, A., Choo, K. Y., Kwak, S. J. and Kim, D. K., "Investigation on the Effect of Inlet Condition of Flow-Electrode and Electrolyte on the Water Desalination Performance of FCDI", *Heat and mass transfer*, In press, 2020.
- [75] Heldenbrand, A., *Development of a predictive and mechanistic model for capacitive deionization*, Master of science thesis, RICE University, USA, 2015.
- [76] Laxman Kunjali, K., water desalination by nanostructuring enhanced control of capacitive deionization, PhD thesis, Department of Electrical and Computer Engineering College of Engineering, Sultan Qaboos University, Sultanate of Oman, 2015.
- [77] Helmholtz, H., "Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche", *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 165, No. 6, pp. 211-233, 1853.
- [78] Burt, R., Birkett, G., Zhao, X. S., "A review of molecular modelling of electric double layer capacitors", *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 16, pp. 6519-6538, 2014.
- [79] Stern, H. O., "Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht", *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*, Vol. 30, No. 21-22, pp. 508-516, 1924.

- [80] Biesheuvel, P. M., Zhao, R., Porada, S. and Van der Wal, A., "Theory of membrane capacitive deionization including the effect of the electrode pore space", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 360, pp. 239-248, 2011.
- [81] Biesheuvel, P. M., Porada, S., Levi, M. and Bazant, M. Z., "Attractive forces in microporous carbon electrodes for capacitive deionization", *J. Solid State Electrochem*, Vol. 18, pp. 1365–1376, 2014.
- [82] López-García, J. J., Horno, J. and Grosse, C., "Influence of the finite size and effective permittivity of ions on the equilibrium double layer around colloidal particles in aqueous electrolyte solution", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 428, pp. 308-315, 2014.
- [83] Carnahan, N. F. and Starling, K. E., "Equation of state for nonattracting rigid spheres", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 51, No. 2, pp. 635, 1969.
- [84] Song, Y., Mason, E. A. and Stratt, R. M., "Why Does the Carnahan-Starling Equation Work So Well?", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 93, pp. 6916-6919, 1989.
- [85] Biesheuvel, P. M., "Thermodynamic cycle analysis for capacitive deionization", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 332, pp. 258-264, 2009.
- [86] Jeon, B. G., NO, H. C., Jeong, I. K. and Lee, J. I., "Development of a two-dimensional coupled-implicit numerical tool for the optimal design of CDI electrodes", *Desalination*, Vol. 274, pp. 226–236, 2011.
- [87] Jeon, B. G. and NO, H. C., "Development of a two-dimensional coupled-implicit numerical tool for analysis of the CDI operation", *Desalination*, Vol. 288, pp. 66–71, 2012.
- [88] Jeon, B. G. and NO, H. C., "Multi-dimensional simulation tool development for the performance evaluation of a CDI electrode and its geometry parameter optimization", *Desalination and Water Treatment*, Vol. 51, pp. 1377–1384, 2013.
- [89] Hemmatifar, A., Stadermann, M. and Santiago, J. G., "Two-Dimensional Porous Electrode Model for Capacitive Deionization", *J. Phys. Chem. C*, Vol. 119, No. 44, pp. 24681-24694, 2015.
- [90] Qu, Y., Campbell, P. G., Hemmatifar, A., Knipe, J. M., Loeb, C. K., Reidy, J. J., Hubert, M. A., Stadermann, M. and Santiago, J. G., "Charging and transport dynamics of a flow-through electrode capacitive deionization system", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 122, No. 1: pp. 240–49, 2018.
- [91] Laughton, M.A. and Warne, D.J., *Electrical Engineer's Reference Book*. 16th Ed. Newnes, Boston, Oxford England, 2003.
- [92] Masliyah, J.H. and Bhattacharjee, S., *Electrokinetic and colloid transport phenomena*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1994.
- [93] Mirbozorgi, S. A. and Niazmand, H., "Numerical investigation and study of inductive voltage in perature deriven fluid flow in fine vessels", *journal of Amirkabir, Mechanical Engineering*, Vol. 42, No. 2, 2010.
- [94] Newman, J. and Thomas-Alyea, K. E., *ELECTROCHEMICAL SYSTEMS*, Third Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [95] Rashidi, S., Nouri-Borujerdi, A., Valipour, M. S., Ellahi, R. and Pop, I., "Stress-jump and continuity interface conditions for a cylinder embedded in a porous medium", *Transp Porous Med*, Vol. 107, pp. 171–186, 2015.
- [96] Bitar, R. W. and Ahmad, A., "solar vs nuclear: which is cheaper for water desalination?", Policy Brief #2. AUB Policy Institute (Issam Fares Institute for Public Policy and International Affairs) American University of Beirut, 2017.