

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 4, pp: 44-62

Overview of Different Architectures of Capacitive Deionization Cells and Comparison of their Performance in Water Desalination

F. Mianjian¹, R. Khoshbouy^{2*}

1. MSc. Student, Green Carbon Research Center, Chemical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Assist. Prof., Green Carbon Research Center, Chemical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
(Corresponding Author) r.khoshbouy@sut.ac.ir

(Received Feb. 9, 2023 Accepted June 10, 2023)

To cite this article:

Mianjian, F., Khoshbouy, R. 2023. "Overview of different architectures of capacitive deionization cells and comparison of their performance in water desalination"
Journal of Water and Wastewater, 34(4), 44-62. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.384602.3323>.

Abstract

Considering the necessity of access to fresh water for sustainable growth and development, the use of various technologies for desalination of salt water is one of the solutions to increase access to fresh water. Various problems of conventional water desalination methods have led to the emergence of new methods such as capacitive deionization technology. CDI technology is an emerging electrochemical adsorption technology to remove water-soluble ions. In recent years, the development of this technology has attracted the attention of many researchers from the functional and economic point of view. Recent research results show that to overcome the challenges of CDI technology, focusing on two areas of effective porous electrodes and applied architectures can be more effective than other solutions. Therefore, this article provides a brief overview of CDI technology and investigates its emergence, progress, and challenges. Furthermore, various types of structures with capacitive electrodes have been introduced along with their unique features, drawbacks, and advantages. Also, this article describes in detail the quantitative and qualitative performance comparison of different geometries of CDI technology, such as flow-by CDI, flow-through CDI, MCDI, FCDI and i-CDI. The results show that, currently, CDI technology using nanostructured carbon electrodes is economical for the deionization of low and medium salinity waters (3 g/L). Despite numerous challenges, capacitive deionization technology has the potential to provide a sustainable source of fresh water in the future. This technology offers a clean and environmentally friendly solution, with low energy consumption and economical operation.

Keywords: Water Desalination, Nanostructured Carbon Electrodes, Capacitive Deionization, Electrosorption, CDI, Clean Technology.



Extended Abstract

1. Introduction

Currently, many countries face a shortage of freshwater. This article introduces capacitive deionization¹, which is an emerging and promising electrochemical water desalination technology. After examining the challenges of this technology, two areas of development of different geometric structures and the development of carbon nanostructure electrodes were proposed as having the main roles in the development of this technology. For this reason, in the following, the classification of different geometric structures of the capacitive deionization system, the examination of the characteristics of the types of geometric structures with capacitive electrodes, and a comparison of the performances of different geometries will be discussed.

2. An overview of conventional water desalination methods

Currently, reverse osmosis, electro dialysis, multi-stage flash distillation, and multi-effect distillation are the most common desalination methods used by 64%, 23%, 8% and 4% of the world's major refineries, respectively (Al-Karaghoul and Kazmerski, 2013).

2.1. Disadvantages of current desalination methods and reasons for emergence of new methods

High investment costs, high operating costs, high energy consumption, process complexity, the need for specialized staff, and secondary environmental problems associated with current desalination technologies have led to the development of new technologies and optimization of conventional technologies (Busch and Mickols, 2004).

3. CDI

CDI is an electrochemical technology that employs electric fields to temporarily adsorb ions in a solution to a charged porous surface. This process is called deionization as the removal of charged species (through capacitive effects and Faraday reactions) occurs. The use of porous carbon electrodes, which become positive and negative poles when a voltage difference is applied, has led to the inclusion of the term "capacitance" in the name of this process.

CDI is a desalination process in which two electrodes are alternately charged and discharged to adsorb ions from a solution. During the charging or adsorption phase, water enters the cell, and ions are adsorbed by the electrodes, resulting in an outflow of fresh water. During the discharge or desorption phase, ions are released from the electrodes, resulting in concentrated brine outflow (Dykstra, 2018).

¹ Capacitive Deionization (CDI)

3.1. Schematic of CDI

A simple CDI cell consists of two porous electrodes with a flow channel (spacer channel) between them (Fig. 1). CDI technology desalinate water by passing it through a cell for deionization, producing fresh and saltwater streams sequentially. Therefore, CDI always consists of at least two stages of water desalination and electrode regeneration.

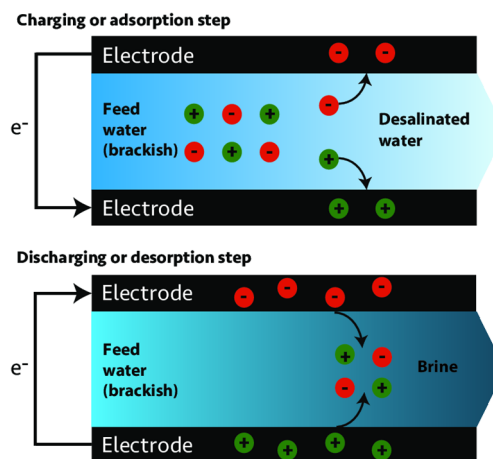


Fig. 1. Performance of a CDI cell for water desalination (Dykstra, 2018)

3.2. Description of the simple CDI cell

Fig. 2 illustrates a CDI cell at the laboratory scale. This system consists of two parallel porous carbon electrodes separated by a nonconductive spacer. The feed solution enters the cell by a peristaltic pump with a constant flow rate and flows in the space between the two electrodes. The cell's electric current is supplied by the power supply. Additionally, the conductivity meter can measure and record changes in the ionic conductivity of the feed solution owing to salt removal (Folaranmi et al., 2020).

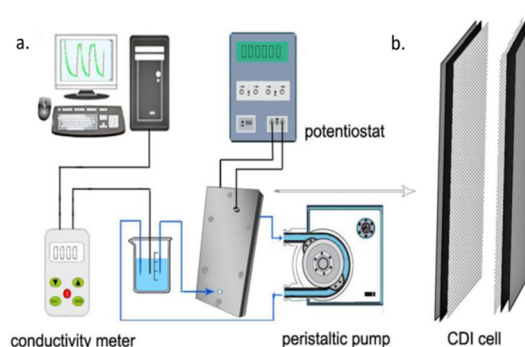


Fig. 2. A simple CDI cell (Folaranmi et al., 2020)

3.3. History of emergence and advancement of CDI technology

CDI is a novel approach for desalinating saltwater. In the past two decades, the field of CDI has seen significant advancements owing to the development of various CDI cell structures

and enhancements in the electrode properties. Recent advancements in CDI technology have focused on enhancing stability, reducing energy consumption and investment costs, streamlining cell manufacturing, and simplifying the overall process. Table 1 presents the timeline of the introduction of various geometric architectures of CDI. Figures 3 and 4 depict the growing trend in the number of studies and publications on this topic in recent years.

Table 1. Timetable related to the introduction of different cell structures (Folaranmi et al., 2020)

Electrochemical technology	Innovators	Year
Flow-by CDI	Bair and Murphy	1960
Flow-through CDI	Johnson	1970
MCDI	Lee	2006
Desalination battery	Pasta	2012
Flow electrode CDI	Jeon	2013
Hybrid CDI	Lee	2014
i-CDI	Gao	2015
Cation intercalation desalination	Smith and Dimello	2016

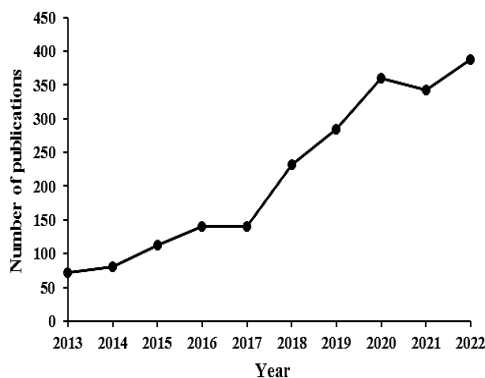


Fig. 3. Published articles about CDI technology in the last 10 years (the data was extracted from the Scopus site)

4. Various architectures of CDI technology

In the last decade, various structures have been developed for CDI technology. Flow-by CDI, Membrane CDI¹, flow-through CDI, inverted-CDI², Flow Electrode CDI³, Hybrid CDI, Cation intercalation desalination, and Desalination battery are the various structures of this technology (Fig. 5).

The electrodes utilized in the introduced structures can be categorized into two types: capacitive electrodes and battery electrodes. Cell configurations, such as flow-by CDI, MCDI, flow-through CDI, i-CDI, and FCDI, utilize capacitive electrodes to desalinate water via non-Faraday mechanisms, which include electrostatic and capacitive effects. The popularity of capacitive electrodes in research has grown

¹ Membrane CDI (MCDI)
² Inverted-CDI (i-CDI)
³ Flow Electrode CDI (FCDI)

because of their affordability and ease of production compared with battery electrodes (Tang et al., 2019).

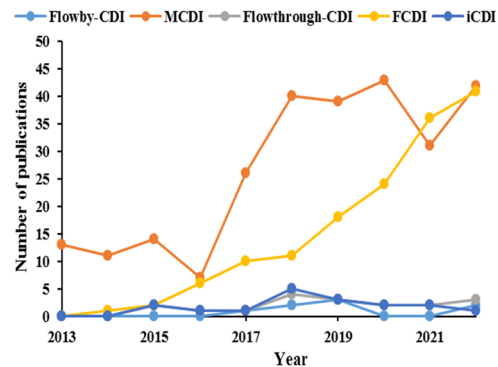


Fig. 4. Published articles about CDI technology with different structures in the last 10 years (the data was extracted from the Scopus site)

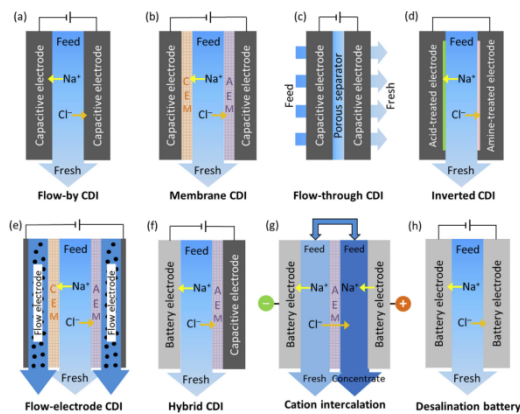


Fig. 5. Conventional architecture of different CDI cells (Tang et al., 2019)

4.1. Introducing structures with capacitive electrodes and their characteristics

4.1.1. Flow-by CDI

Flow-by CDI, illustrated in Fig. 5-a, consists of two graphite current collectors and two porous carbon electrodes specially designed for capacitive ion adsorption. These electrodes are separated by a separator.

4.1.2. Flow-through CDI

In the flow-through CDI structure (Fig. 5-c), incoming water passes directly through the electrodes and runs parallel to the applied electric field. Unlike flow-by CDI cells, the separator does not primarily serve as a channel for fluid flow. As a result, flow-through CDI cells are more compact and smaller in size compared to flow-by CDI cells.

4.1.3. MCDI

In MCDI (Fig. 5-b), a cation exchange membrane⁴ is placed near the cathode, and an

⁴ Cation Exchange Membrane (CEM)

anion exchange membrane¹ is placed near the anode. The incorporation of IEMs into CDI effectively prolongs the electrode lifespan by preventing direct water exposure and reducing Faraday reactions.

4.1.4. FCDI

FCDI (Fig. 5-e) is similar to MCDI and was developed by substituting flowing electrodes (made of carbon suspension) instead of fixed electrodes between current collectors and IEMs. This structure offers two main advantages: the continuous production of fresh water and the capability to deionize water with high salinity.

4.1.5. i-CDI

i-CDI (Fig. 5-d), which is a modified version of flow-by CDI, employs an anode with a net negative surface charge and a cathode with a net positive surface charge. The i-CDI cell exhibits superior operating lifetime and stability compared to other structures. However, it is important to note that i-CDI has a lower salt removal capacity (Tang et al., 2019).

4.2. Results of studies and performance comparison of structures with capacitive electrodes

The review of published articles reveals that both flow-by CDI and MCDI structures have demonstrated effective performance in the removal of diverse ionic pollutants, including heavy metal ions, mineral pollutants, and organic pollutants such as ionizable dyes and antibiotics. These findings highlight the versatility and efficacy of these structures in addressing a wide range of pollution challenges (Tang et al., 2019). Economic evaluations indicate that flow-by CDI and MCDI are considered cost-effective options for desalinating water with low and medium salinity levels, typically up to 3 g/L. These structures offer a favorable balance between performance and affordability, making them suitable choices for desalination applications (Folaranmi et al., 2020; Tang et al., 2019).

5. Challenges and prospects in water desalination using CDI technology

CDI technology, an emerging technology, has attracted considerable interest in the past years as a promising approach to water desalination. This technology shows great potential in addressing the global challenge of water scarcity and has sparked research efforts for further advancements and applications (Welgemoed and Schutte, 2005). CDI technology faces several key challenges that must be addressed for its widespread adoption and successful implementation. These challenges include reducing the energy consumption for desalination of high-salinity waters, increasing

cell adsorption capacity, improving stability, reducing initial investment costs, reducing operational capital, and facilitating easy setup across laboratory, semi-industrial, and industrial scales.

Recent research articles have identified the construction of efficient porous electrodes and the development of functional geometries as the two main challenges in the development of CDI technology. To improve the performance and economy of CDI, the primary strategy is to focus on these two areas to increase the efficiency of CDI technology. The design and production of optimal porous carbon electrodes are crucial for reducing manufacturing costs and energy consumption, and improving cell and electrode stability. Currently, numerous studies have been conducted on the fabrication of cost-effective porous electrodes with high adsorption capacity.

The utilization of biomass waste for the production of CDI electrodes offers a dual benefit: waste management and addressing the water crisis while creating additional value. As such, future advancements in this field could significantly impact the economic optimization of CDI. Investigating the various applications of the CDI process and improving and optimizing this process to remove inorganic pollutants such as heavy metal ions, nitrates, and phosphates are among the important research fields of this technology worldwide (Choi et al., 2019). With successive advances in this field, it is hoped that CDI will be used in the future to efficiently and economically remove pollutants, such as heavy metals and nitrates.

6. Conclusions

The crisis of decreasing access to fresh water necessitates the design and implementation of new and economical desalination methods. CDI is an emerging electrochemical method for water desalination that has garnered significant attention from researchers. Improvements in CDI structures and electrode fabrication have enhanced the performance of this technology. The challenges facing CDI technology include reducing energy consumption, increasing adsorption capacity, improving sustainability, reducing initial investment and operational costs, and facilitating scalability.

Research has shown that the development of optimal porous electrodes and functional structures are effective solutions to these challenges. This article examines the various structures of CDI technology, including their appearance and related process parameters. The advantages and disadvantages of each capacitive geometry are presented. Despite challenges, CDI has the potential to provide fresh water globally as a clean, environmentally friendly, low-energy, and economical technology.

¹ Anion Exchange Membrane (AEM)



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۴، صفحه: ۴۴-۶۲

بررسی هندسه‌های مختلف فناوری یون‌زدایی خازنی و مقایسه عملکرد آنها در شیرین‌سازی آب

فاطمه میانجیان^۱، رضا خوشبوی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات کربن سبز، دانشکده مهندسی شیمی،
دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
۲- استادیار، مرکز تحقیقات کربن سبز، دانشکده مهندسی شیمی،
دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
(نویسنده مسئول) r.khoshbouy@sut.ac.ir

(دریافت ۱۴۰۱/۱۱/۲۰ پذیرش ۱۴۰۲/۳/۲۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
میانجیان، ف.، خوشبوی، ر.، ۱۴۰۲، "بررسی هندسه‌های مختلف فناوری یون‌زدایی خازنی و مقایسه عملکرد آنها در شیرین‌سازی آب"
مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۴)، ۴۴-۶۲. <https://doi.org/10.22093/wwj.2023.384602.3323>

چکیده

با توجه به ضرورت دسترسی به آب شیرین برای رشد و توسعه پایدار، استفاده از فناوری‌های مختلف شیرین‌سازی آبهای شور، یکی از راهکارهای افزایش دسترسی به آب شیرین است. مشکلات متعدد روش‌های متداول شیرین‌سازی آب، منجر به ظهور روش‌های نوینی همچون فناوری یون‌زدایی خازنی شده است. فناوری CDI یک فناوری الکتروشیمیایی جذبی نوظهور برای حذف یون‌های محلول در آب است که در سال‌های اخیر، توسعه این فناوری از دیدگاه عملکردی و اقتصادی مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که برای رفع چالش‌های پیش روی این فناوری، تمرکز روی دو حوزه الکترودهای متخلخل بهینه و هندسه‌های کاربردی، می‌تواند تأثیرگذارتر از سایر راهکارها باشد. بنابراین این پژوهش، علاوه بر معرفی کوتاهی از تاریخچه ظهور و پیشرفت فناوری CDI، به بررسی مروری انواع ساختارهای هندسی دارای الکترودهای خازنی و معایب و مزایای هر کدام از آنها پرداخت. همچنین مقایسه کمی و کیفی عملکرد هندسه‌های مختلف فناوری CDI با جریان بین الکترودها، CDI غشایی، CDI با جریان عبوری، CDI معکوس و CDI با الکترودها در حال جریان را به تفصیل بیان کرد. نتایج نشان داد، در حال حاضر فناوری CDI با استفاده از الکترودهای نانوساختار کربنی برای یون‌زدایی آبهای با شوری کم و متوسط (۳ گرم در لیتر) اقتصادی است. با وجود چالش‌های مختلف، این فناوری می‌تواند در آینده به‌عنوان یک فناوری پاک و دوستدار محیط‌زیست، با مصرف کم انرژی و به صورت اقتصادی، امکان تأمین آب شرب شیرین را فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: نمک‌زدایی آب، الکترودهای نانوساختار کربنی، یون‌زدایی خازنی، الکترو جذب، فناوری پاک



۱- مقدمه

فناوری، دو حوزه توسعه ساختارهای هندسی مختلف و توسعه الکترودهای نانو ساختار کربنی به‌عنوان دارنده نقش اصلی در پیشرفت این فناوری مطرح شدند. به همین سبب، در ادامه به طبقه‌بندی ساختارهای هندسی مختلف سیستم CDI، معرفی و بررسی ویژگی‌های انواع ساختارهای هندسی دارای الکترودهای خازنی و همچنین مقایسه عملکرد هندسه‌های مختلف پرداخته خواهد شد. همچنین، نتایج مربوط به آخرین دستاوردهای مرتبط با روش CDI با تمرکز روی هندسه‌های مختلف و بررسی مزایا و معایب هندسه‌های مختلف بر اساس پارامترهای مؤثر بر عملکرد آنها ارائه خواهد شد.

۲- مروری بر روش‌های مرسوم شیرین‌سازی آب

فناوری‌های متداول شیرین‌سازی آب به دو دسته فرایندهای حرارتی و فرایندهای غشایی تقسیم‌بندی می‌شوند. اسمز معکوس^۲، الکترودیالیز^۳، تقطیر فلش چند مرحله‌ای^۴ و تقطیر چند اثره^۵ متداول‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب هستند. در حال حاضر، RO، MSFD، MED و ED به ترتیب به میزان ۶۴، ۲۳، ۸ و ۴ درصد در تصفیه‌خانه‌های بزرگ جهان کاربرد دارند (Busch and Mickols, 2004, Al-Karaghoul and Kazmerski, 2013, Elimelech and Phillip, 2011).

۲-۱- بررسی معایب روش‌های متداول شیرین‌سازی آب و

دلایل ظهور روش‌های نوین

سرمایه اولیه و سرمایه در گردش بالای موردنیاز برای فرایندهای متداول شیرین‌سازی آب موجب محدودیت استفاده از این روش‌ها می‌شود. مصرف بالای انرژی نیز یکی از محدودیت‌های اصلی استفاده از فناوری‌های شیرین‌سازی است. میزان مصرف انرژی روش‌های مختلف در جدول ۱ آمده است.

مشکلات مربوط به فرایندهای مرسوم شیرین‌سازی آب تنها به موارد بیان شده، محدود نمی‌شوند. از جمله مشکلات فرایندی مربوط به فناوری‌های غشایی، می‌توان به استفاده از مواد شیمیایی به‌منظور جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی غشاها،

در حال حاضر، بسیاری از کشورهای دنیا با کمبود آب شیرین مواجه هستند. ۷۱ درصد از سطح کره زمین پوشیده از آب است، اما تنها ۲/۵ درصد از کل آب‌های موجود را آب‌های شیرین تشکیل می‌دهند و دلایل مختلفی نیز منجر به کاهش منابع آب شیرین شده است (شکل ۱). فعالیت‌های انسانی از جمله تغییر سبک زندگی، استفاده نادرست از آب و آلودگی آبها، ناشی از تخلیه فاضلاب‌ها به آب‌های سطحی و حوادث طبیعی مانند خشک‌سالی، سیل و تغییرات آب و هوایی از مهم‌ترین دلایل کاهش منابع آب شیرین هستند. همچنین افزایش استخراج آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان، منجر به ورود تدریجی نمک به چاه‌ها و سفره‌های زیرزمینی می‌شود. از طرفی با رشد جمعیت و توسعه روزافزون شهرنشینی، نیاز به آب آشامیدنی سالم نیز افزایش یافته است. مصرف آب بین سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۸۰ دو برابر شده و بسیاری از کشورها مانند ایران با خطر کم‌آبی مواجه شده‌اند (Kılıç, 2020).

بنابراین لازم است در اسرع وقت تدابیری برای بهبود وضعیت موجود اتخاذ و اجرا شوند. در مرحله اول باید به مدیریت منابع آب موجود پرداخت؛ اما روش‌های مدیریت منابع آبی همواره پاسخ‌گوی نیاز به آب شیرین نخواهند بود. در مرحله دوم باید به افزایش منابع آب شیرین پرداخت. افزایش آب شیرین در دسترس از طریق شیرین‌سازی منابع آبی شور موجب بهبود شرایط فعلی می‌شود. به همین دلیل، برنامه‌ریزی برای توسعه فناوری‌های نمک‌زدایی اقتصادی اهمیت زیادی دارد (Amy et al., 2017).

شیرین‌سازی آب‌های شور قدمت طولانی دارد، اما امروزه به‌دلیل افزایش نیاز به آب شیرین در بخش‌های شهری، کشاورزی و صنعتی، اهمیت بررسی و توسعه روش‌های شیرین‌سازی آب در حال افزایش است. مقدار زیاد هزینه موردنیاز برای سرمایه‌گذاری اولیه، سرمایه عملیاتی بالا و شرایط عملیاتی سخت روش‌های متداول شیرین‌سازی منجر به معرفی فناوری‌های جدید، پایدار و اقتصادی شده است.

در این پژوهش، به معرفی فناوری یون‌زدایی خازنی^۱ که یک فناوری الکتروشیمیایی جذبی نوظهور و امیدوارکننده است، پرداخته شد. بعد از بررسی چالش‌های پیش روی توسعه این

² Reverse Osmosis (RO)

³ Electrodialysis (ED)

⁴ Multi-Stage Flash Distillation (MSFD)

⁵ Multiple-Effect Distillation (MED)

¹ Capacitive Deionization (CDI)



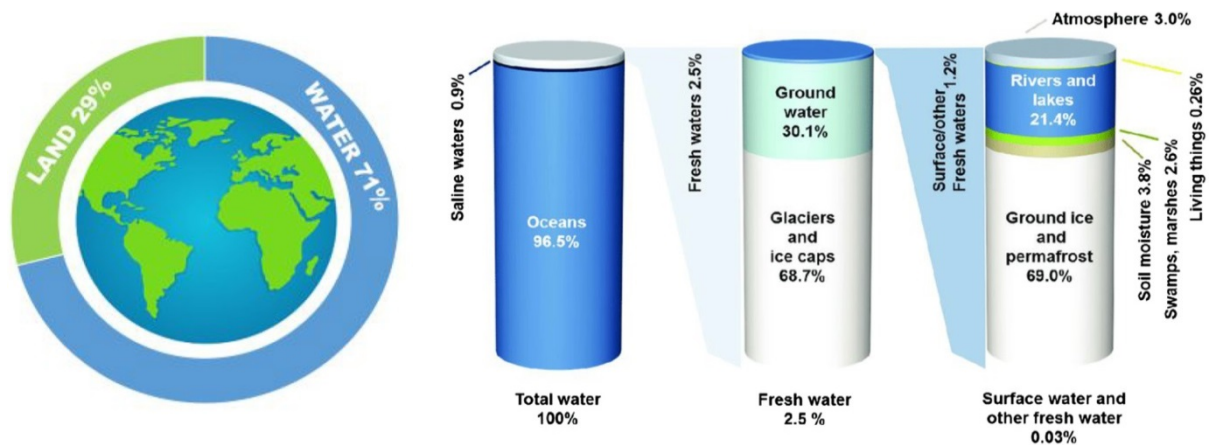


Fig. 1. The distribution of salt and fresh water in the world and availability of fresh water (Emmanuel et al., 2023)
 شکل ۱- میزان توزیع آب شور و شیرین در کره زمین و میزان دسترسی به آب شیرین (Emmanuel et al., 2023)

نقش خازن عمل کرده و این یون‌ها را از محیط آبی جذب و ذخیره می‌سازند. CDI، یک جایگزین امیدوارکننده برای فناوری‌های متداول شیرین‌سازی آب به ویژه برای نمک‌زدایی آب‌های شور کم تا متوسط است. مصرف انرژی کم، عدم ایجاد اثرات محیط‌زیستی ثانویه، ساختار ساده تجهیزات و فرایند ساده از مزایای اصلی این فناوری هستند (Murphy and Tucker, 1966, Folaranmi et al., 2020).

۳- فناوری شیرین‌سازی CDI

CDI یک فناوری شیرین‌سازی (یون‌زدایی) الکتریکی است که از میدان‌های الکتریکی برای جذب موقت گونه‌های یونی موجود در محلول به سطح متخلخل باردار استفاده می‌کند. از آنجایی که حذف گونه‌های باردار (از طریق اثرات خازنی و واکنش‌های فارادی) انجام می‌شود، این فرایند یون‌زدایی نام‌گرفته است. همچنین استفاده از الکترودهای متخلخل کربنی که با اعمال اختلاف ولتاژ به قطب مثبت و منفی تبدیل می‌شوند، منجر به استفاده از کلمه خازنی در نام این فرایند شده است. به بیان دیگر، CDI یک فناوری الکتروشیمیایی برای جذب یون از محلول، با شارژ و تخلیه متناوب دو الکترود است. در طی مرحله شارژ یا جذب، آب ورودی به داخل سلول جریان می‌یابد و یون‌ها در الکترودها جذب می‌شوند، در نتیجه یک جریان خروجی آب شیرین ایجاد می‌شود. در طول مرحله تخلیه یا دفع، یون‌ها از الکترودها دفع می‌شوند و در نتیجه یک جریان خروجی آب نمک (غلیظ) ایجاد می‌شود (Dykstra, 2018).

جدول ۱- انرژی موردنیاز روش‌های مختلف شیرین‌سازی آب (Almarzooqi et al., 2014)

Table 1. Energy required by different water desalination methods (Almarzooqi et al., 2014)

Desalination technology	Required energy (Kw/m ³)
MSFD	10-58
MED	6-58
RO	2-6
ED	0.4-8.7

جلوگیری از رسوب ذرات و گرفتگی غشا اشاره کرد. تخلیه بقایای این مواد شیمیایی به دریاها، منجر به مشکلات جدیدی می‌شود. به‌طور کلی، هزینه زیاد سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه زیاد عملیاتی، پیچیدگی فرایند، نیاز به حضور اپراتور متخصص و مشکلات محیط‌زیستی ثانویه مربوط به فناوری‌های نمک‌زدایی فعلی، منجر به ضرورت توسعه فناوری‌های جدید و بهینه‌سازی فناوری‌های مرسوم شده است؛ بنابراین توسعه فناوری‌های پایدار، با عملکرد ساده، هزینه و مصرف انرژی کم ضروری است (Busch and Mickols, 2004, Al-Karaghoul and Kazmerski, 2013, Elimelech and Phillip, 2011).

CDI به‌عنوان یک فناوری نوین برای حذف یون‌ها، مولکول‌ها، آلاینده‌های معدنی و آلاینده‌های آلی باردار از آب معرفی شده است. این فناوری از طریق خاصیت الکترواستاتیکی ایجاد شده، یون‌های موجود در آب را به روی الکترودهای متخلخل که دارای بار الکتریکی ناهمنام هستند، هدایت می‌کند و این الکترودها در



۳-۱- شماتیک CDI

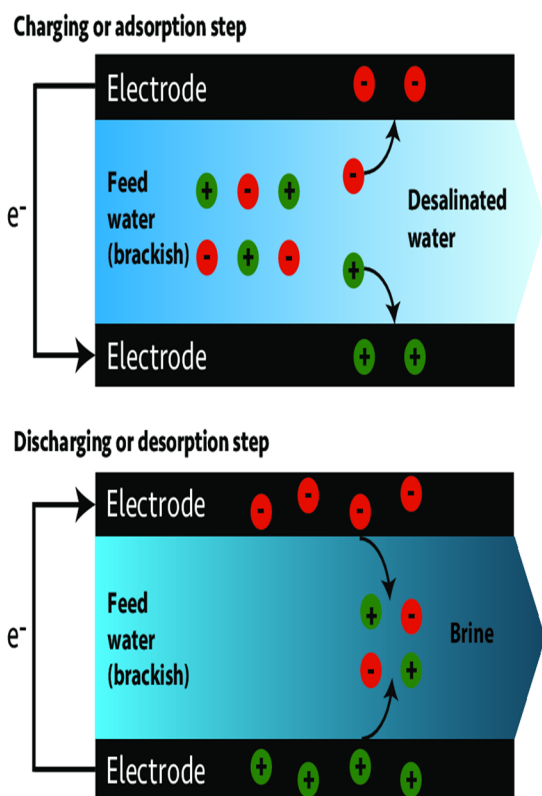


Fig. 2. Performance of a CDI cell for water desalination (Dykstra, 2018)

شکل ۲- عملکرد یک سلول CDI برای شیرین‌سازی آب (Dykstra, 2018)

اندازه‌گیری و ثبت است (Folaranmi et al., 2020).

۳-۳- تاریخچه ظهور و پیشرفت فناوری CDI

روش CDI در مقایسه با روش‌های سنتی و معمول شیرین‌سازی (نمک‌زدایی از آب‌های شور)، یک فرایند جدید است. طی دو دهه گذشته، ظهور مداوم ساختارهای سلولی مختلف CDI و بهبود خواص الکترودها منجر به پیشرفت‌های فوق‌العاده‌ای در زمینه CDI شده است. این پیشرفت‌ها در رابطه با بهبود پایداری، کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و عملیاتی، افزایش سهولت ساخت سلول و ساده‌تر شدن فرایند، انجام شده‌اند. جدول ۲، زمان معرفی ساختارهای هندسی مختلف CDI را نشان می‌دهد. همچنین روند افزایشی تعداد پژوهش‌های انجام شده و پژوهش‌های منتشر شده در طول سال‌های اخیر در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

یک سلول CDI ساده، از دو الکتروده متخلخل با یک کانال جریان (کانال فاصله‌دهنده) در بین آنها تشکیل شده است (شکل ۲). فناوری CDI با عبور دادن جریانی از آب برای یون‌زدایی و تولید متوالی جریانی از آب شیرین و آب شور از یک سلول انجام می‌شود، بنابراین CDI همیشه حداقل از دو مرحله شیرین‌سازی آب و بازسازی الکتروده تشکیل شده است:

- مرحله شیرین‌سازی آب (تصفیه): در این مرحله با توجه به اینکه دو الکتروده با بار مخالف در محلولی حاوی یون غوطه‌ور شده‌اند، یون‌ها توسط میدان‌های الکتریکی جذب الکترودهای متخلخل باردار می‌شوند. به بیان دیگر، با اعمال اختلاف ولتاژ الکتریکی، میدان الکتریکی در سراسر محلول به‌طور یکنواخت ایجاد و باعث انتقال یون‌ها می‌شود. به دلیل بار منفی سطحی الکتروده منفی (کاتد)، کاتیون‌ها مانند یون سدیم در کاتد جذب می‌شوند و نزدیک به سطح باردار باقی می‌مانند. هم‌زمان، آنیون‌ها مانند یون کلرید در منافذ الکتروده با بار مثبت (آند) جذب می‌شوند. پس از مدتی، تمام حجم منافذ قابل دسترس الکترودها توسط یون‌ها اشباع می‌شود و سلول به ماکسیمم ظرفیت ذخیره‌سازی خود می‌رسد.

- مرحله بازسازی الکتروده: پس از اشباع شدن منافذ، باید مرحله تخلیه یون‌ها از منافذ انجام شود. در مرحله بازسازی، اعمال ولتاژ قطع می‌شود و در نتیجه یون‌ها آزاد می‌شوند و جریان آب نمک غلیظ تولید می‌شود (Suss et al., 2015, Porada et al., 2013).

۳-۲- شرح سلول ساده CDI

شکل ۳، یک سلول CDI آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل دو الکتروده متخلخل کربنی موازی است که توسط یک فاصله‌دهنده غیررسانای الکتریکی به ضخامت حدود ۵۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرون از هم جدا شده‌اند.

این امر از کمبود انرژی الکتریکی جلوگیری می‌کند و جریان یافتن مایع را تسهیل می‌بخشد. محلول ورودی توسط یک پمپ پرستالتیک با سرعت جریان ثابت وارد سلول می‌شود و در فضای بین دو الکتروده جاری می‌شود. منبع تغذیه، جریان الکتریکی سلول را تأمین می‌کند و ولتاژ موردنیاز توسط منبع تغذیه به الکترودها اعمال می‌شود. همچنین، تغییر هدایت یونی محلول ورودی در اثر حذف نمک و شیرین‌سازی، توسط یک رسانایی‌سنج قابل



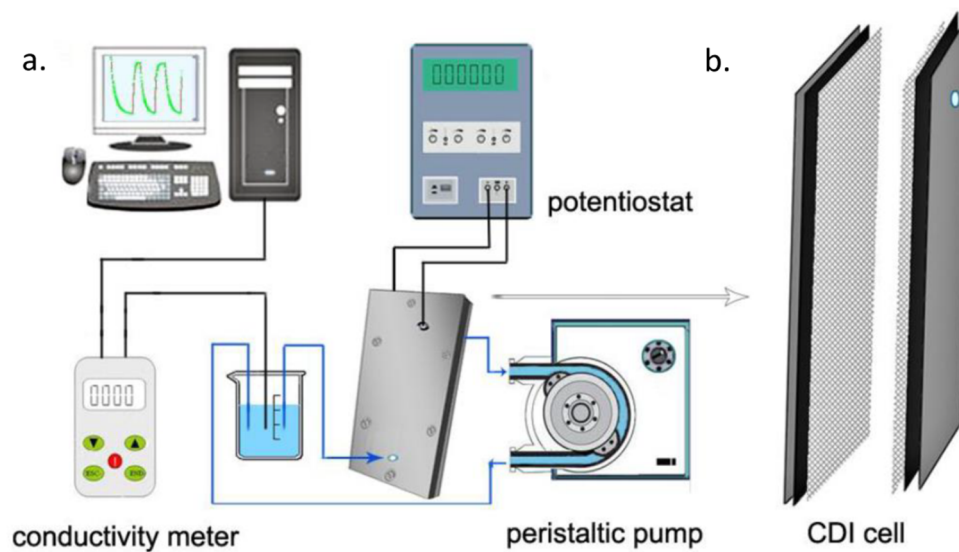


Fig. 3. A simple CDI cell (Folaranmi et al., 2020)
 شکل ۳- تصویر یک سلول ساده CDI (Folaranmi et al., 2020)

جدول ۲- جدول زمانی مربوط به معرفی ساختارهای سلولی مختلف CDI (Folaranmi et al., 2020)

Table 2. Timetable related to the introduction of different cell structures (Folaranmi et al., 2020)

Electrochemical technology	Innovators	Year
Flow-by CDI	Bair and Murphy	1960
Flow-through CDI	Johnson	1970
MCDI	Lee	2006
Desalination battery	Pasta	2012
Flow electrode CDI	Jeon	2013
Hybrid CDI	Lee	2014
Inverted CDI	Gao	2015
Cation intercalation desalination	Smith and Dimello	2016

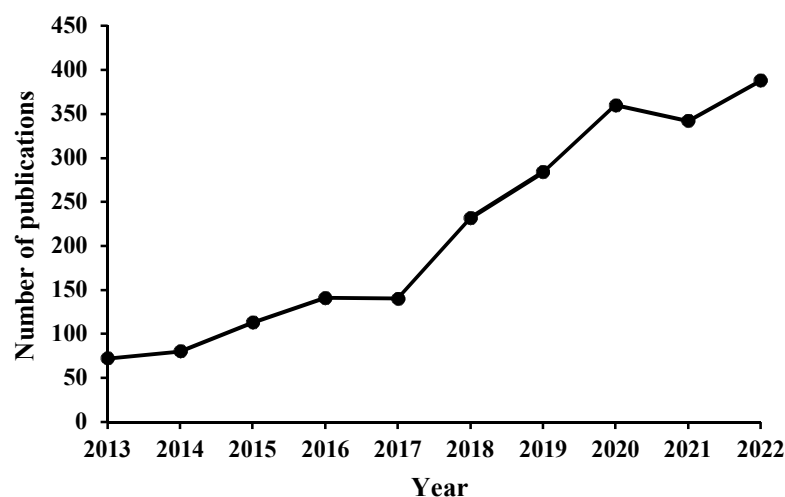


Fig. 4. Published articles about CDI technology in the last 10 years (the data was extracted from the Scopus site)
 شکل ۴- تعداد کل پژوهش‌های منتشر شده در زمینه فناوری‌های CDI در طول ۱۰ سال اخیر (داده‌ها از سایت Scopus استخراج شده‌اند)



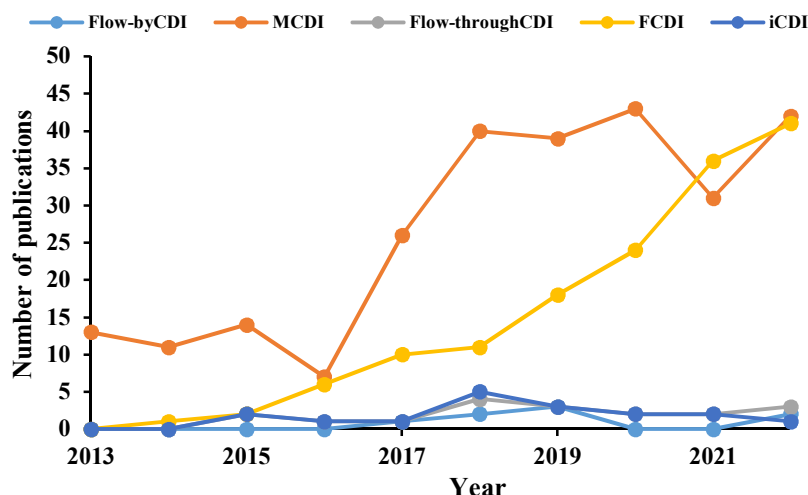


Fig. 5. Published articles about CDI technology with different structures in the last 10 years (the data was extracted from the Scopus site)

شکل ۵- پژوهش‌های منتشر شده در زمینه فناوری‌های CDI با ساختارهای هندسی مختلف در ۱۰ سال اخیر (داده‌ها از سایت Scopus استخراج شده‌اند)

شده است (Tang et al., 2019).

۱-۴- معرفی ساختارهای دارای الکترودهای خازنی و ویژگی‌های آنها

۱-۴-۱- ساختار Flow by CDI

ساختار Flow-by CDI اولین ساختار هندسی CDI است که در سال ۱۹۶۷ معرفی شد. یک سلول Flow-by CDI (شکل ۶) شامل دو کلکتور جریان گرافیتی، دو الکترود از جنس مواد متخلخل کربنی برای جذب یون‌ها به صورت خازنی و یک کانال فاصله‌دهنده برای عبور آب است. با اعمال اختلاف پتانسیل بین دو الکترود (معمولاً در حدود ۰/۷ تا ۱/۴ ولت)، کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در کانال فاصله‌دهنده به سمت الکترودهای متخلخل (کاتد و آند) هدایت و در نهایت جذب می‌شوند. به عبارتی یون‌ها به صورت الکترواستاتیکی در ساختار کربنی الکترود نگه داشته می‌شوند (Tang et al., 2019).

۱-۴-۲- سلول Flow through CDI

سلول flow-through CDI (شکل ۷-c) اولین بار در سال ۱۹۷۰ بررسی شد. در این ساختار، آب ورودی مستقیماً از درون الکترودها و به موازات جهت میدان الکتریکی اعمال شده جریان می‌یابد.

۴- فناوری‌های الکتروشیمیایی مربوط به CDI و هندسه‌های مختلف مرسوم

در طول یک دهه گذشته، ساختارهای مختلفی برای روش CDI معرفی شده است. ساختارهای سلولی CDI با جریان بین الکترودها^۱، CDI غشایی^۲، CDI با جریان عبوری^۳، CDI با الکترود در حال جریان^۴، CDI هیبریدی^۵، نمک‌زدایی کاتیونی^۶ و نمک‌زدایی باتری^۷ ساختارهای مختلف این فناوری هستند (شکل ۶).

الکترودهای به کار رفته در ساختارهای معرفی شده به دو دسته الکترودهای خازنی و الکترودهای باتری دسته‌بندی می‌شوند. لول‌های دارای الکترودهای خازنی (Flow-by CDI، MCDI، Flow-through CDI، i-CDI و FCDI)، یون‌ها را از طریق مکانیسم غیر فاردادی (اثرات الکترواستاتیک و خازنی) حذف می‌کنند. سهولت در ساخت و هزینه کم الکترودهای خازنی نسبت به الکترودهای باتری، منجر به افزایش پژوهش روی این الکترودها

¹ Flow-by CDI

² Membrane CDI (MCDI)

³ Flow-Through CDI

⁴ Inverted-CDI (i-CDI)

⁵ Flow Electrode CDI (FCDI)

⁶ Hybrid CDI

⁷ Cation Intercalation Desalination

⁸ Desalination Battery



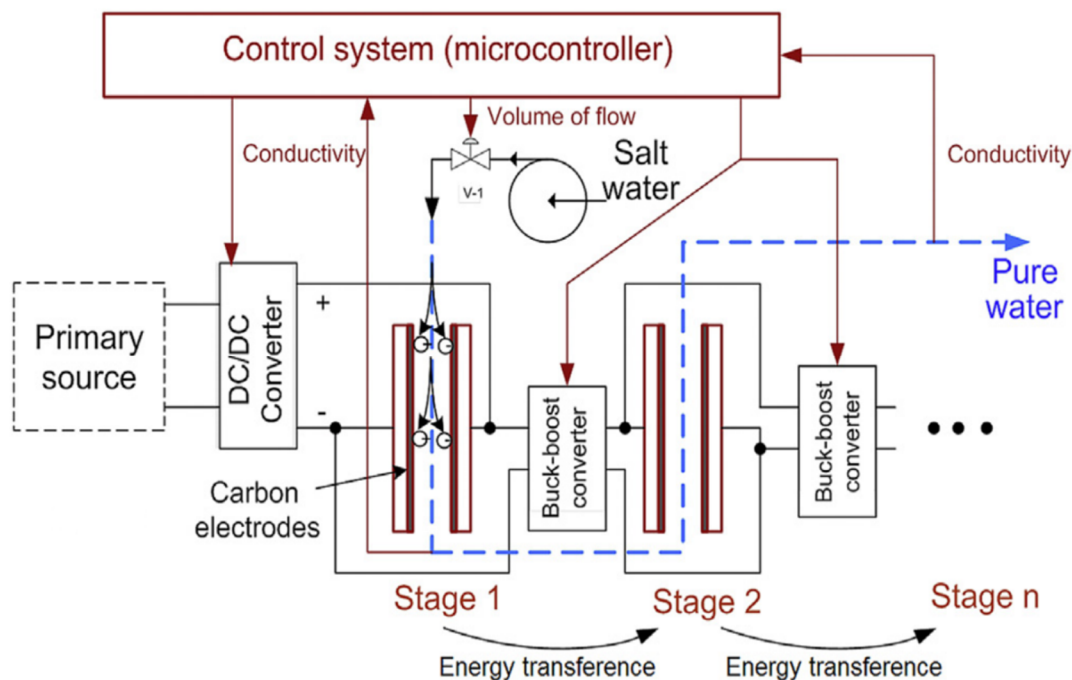


Fig. 6. Conventional architecture of different CDI cells (Tang et al., 2019)
 شکل ۶- معماری مرسوم سلول‌های مختلف CDI (Tang et al., 2019)

در مجاورت کاتد و یک غشای تبادل آنیونی^۳ در مجاورت آند قرار می‌گیرد. استفاده از IEM ها در CDI روشی مؤثر برای افزایش طول عمر الکترودها از طریق جلوگیری از آب شستگی مستقیم و کاهش واکنش‌های فارادایی است. یکی از مزایای قدرتمند CDI در مقایسه با سایر فناوری‌های نمک‌زدایی بازیابی نسبی انرژی است. هم‌زمان با مرحله دفع یون، انرژی موردنیاز برای شارژ الکترودها در طول نمک‌زدایی تا حدی قابل بازیابی است و برای شارژ سلول MCDI دیگری که در مرحله جذب یون عمل می‌کند، قابل استفاده خواهد بود. در شکل ۷، نمونه‌ای از ساختاری دارای دو سلول CDI با ویژگی بازیابی انرژی، رسم شده است. همچنین این انرژی را می‌توان در یک محیط ذخیره‌سازی انرژی مانند ابر خازن برای استفاده بعدی ذخیره کرد (Tang et al., 2019).

۴-۱-۴- ساختار FCDI

ساختار FCDI (شکل ۷-b) مشابه ساختار MCDI است و با جایگزین کردن الکترودهای در حال جریان به جای الکترودهای ثابت در بین کلکتورهای جریان و IEM ها ایجاد شده است.

از آنجایی که جداکننده به‌عنوان یک کانال اصلی برای جریان سیال عمل نمی‌کند، سلول‌های Flow-through CDI فشرده‌تر و کوچکتر از سلول‌های Flow-by CDI هستند. به همین سبب، عملکرد یون‌زدایی در ساختار Flow-through CDI نسبت به ساختار Flow-by CDI بهبود یافته است و در هر مرحله تصفیه، غلظت یون‌های ورودی بیشتر کاهش می‌یابد (جذب یون بیشتری انجام می‌شود). البته در شرایطی با توان عملیاتی مشابه، آب ورودی به ساختار Flow-through CDI، باید با فشار بیشتری نسبت به ساختار Flow-by CDI وارد سلول شود. به منظور کاهش فشار موردنیاز در این نوع ساختار، ساخت الکترودهای ویژه با اندازه حفره‌های مهندسی شده ضروری است (Tang et al., 2019).

۴-۱-۳- ساختار MCDI

در سال ۲۰۰۶، با افزودن غشاهای تبادل یونی^۱ به کنار الکترودها و معرفی ساختاری با نام MCDI (شکل ۷-b) یکی از پیشرفت‌های مهم این حوزه انجام شد. در این ساختار یک غشای تبادل کاتیونی^۲

³ Anion Exchange Membranes (AEM)

¹ Ion Exchange Membranes (IEMs)
² Cation Exchange Membranes (CEM)



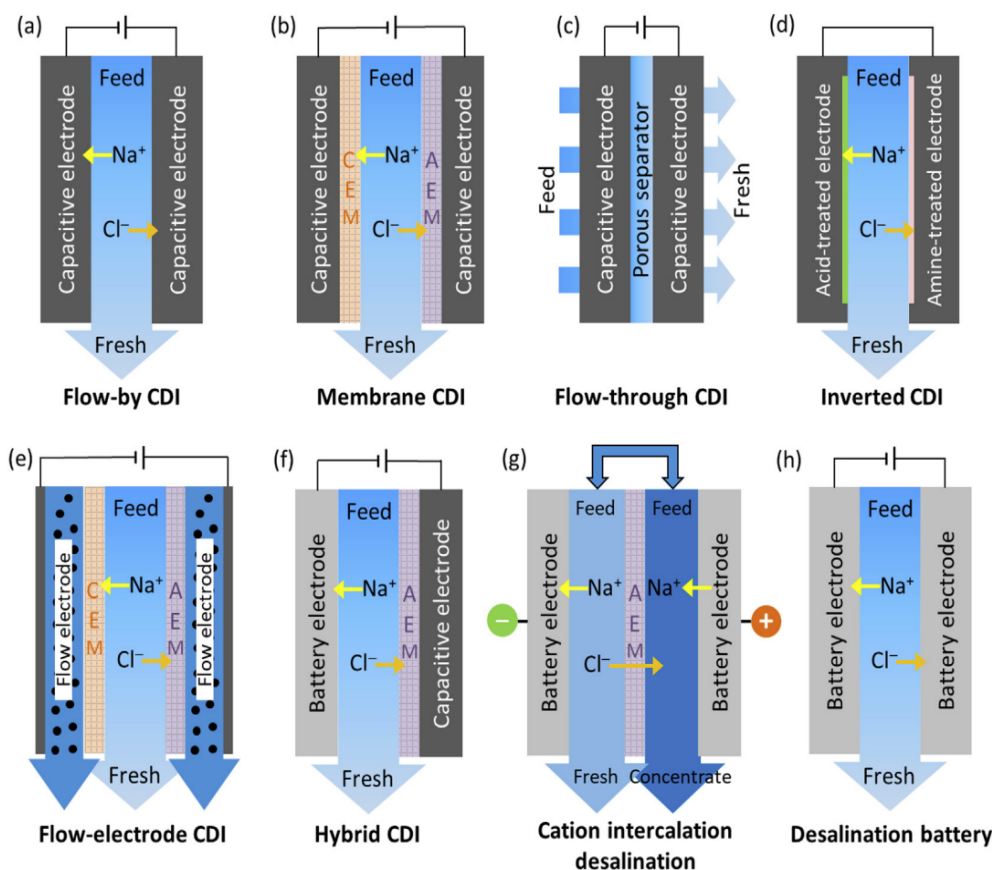


Fig. 7. Schematic of a CDI method with energy recovery control system (Tang et al., 2019)

شکل ۷- شماتیک یک سیستم CDI دارای سیستم کنترل بازایی انرژی (Tang et al., 2019)

یون‌زدایی (تولید آب شیرین) و پس از آن یک مرحله بازسازی (تولید آب نمک غلیظ) عمل می‌کنند (Tang et al., 2019). در شکل ۸-a یک سلول FCDI نشان داده شده که ورود جریان پیوسته‌ای از الکترودهای کربنی بدون بار به سلول قابل مشاهده است. شکل ۸-b نشان‌دهنده فرایند بازسازی الکترود در پایین دست سلول با مخلوط کردن دوغاب کربن مثبت و منفی است. همچنین در این بخش، جداسازی کربن از آب از طریق ته‌نشینی انجام می‌شود. شکل ۸-c نیز نشان‌دهنده یک سیستم نمک‌زدایی پیوسته FCDI است که تنها یک ماژول و یک الکترود در جریان دارد. از زمانی که FCDI در سال ۲۰۱۳ پیشنهاد شد، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. پژوهش‌های بسیاری با تمرکز بر روی بررسی جریان الکترود، بهبود طراحی ساختار سلول و افزایش بازده انرژی با هدف بهبود عملکرد FCDI در حال انجام هستند (Tang et al., 2019).

الکترودهای در حال جریان از سوسپانسیون کربنی ساخته شده‌اند. این ساختار دو مزیت عمده نسبت به ساختارهای دارای الکترودهای ثابت دارد. مزیت اول حذف مداوم یون و تولید مداوم آب شیرین است، زیرا بازسازی الکترود (مرحله دفع یون) می‌تواند به صورت یک فرایند جداگانه در پایین دست سلول انجام شود و شیرین‌سازی آب برای بازسازی الکترود متوقف نخواهد شد. مزیت دوم قابلیت یون‌زدایی آب با شوری بالا است که به دلیل ظرفیت بی‌نهایت جذب یون این ساختار ممکن شده است. ظرفیت بی‌نهایت جذب یون FCDI به دلیل ورود مداوم ذرات کربن بدون بار به سلول در حال شارژ (در حال نمک‌زدایی) حاصل می‌شود. ظرفیت حذف نمک سلول‌های MCDI تا حد زیادی توسط الکترودهای ثابت محدود می‌شود و همین مسئله باعث می‌شود MCDI فقط برای تصفیه آب با شوری کم تا متوسط مناسب باشد. همچنین، سلول‌های MCDI به صورت متناوب با یک مرحله



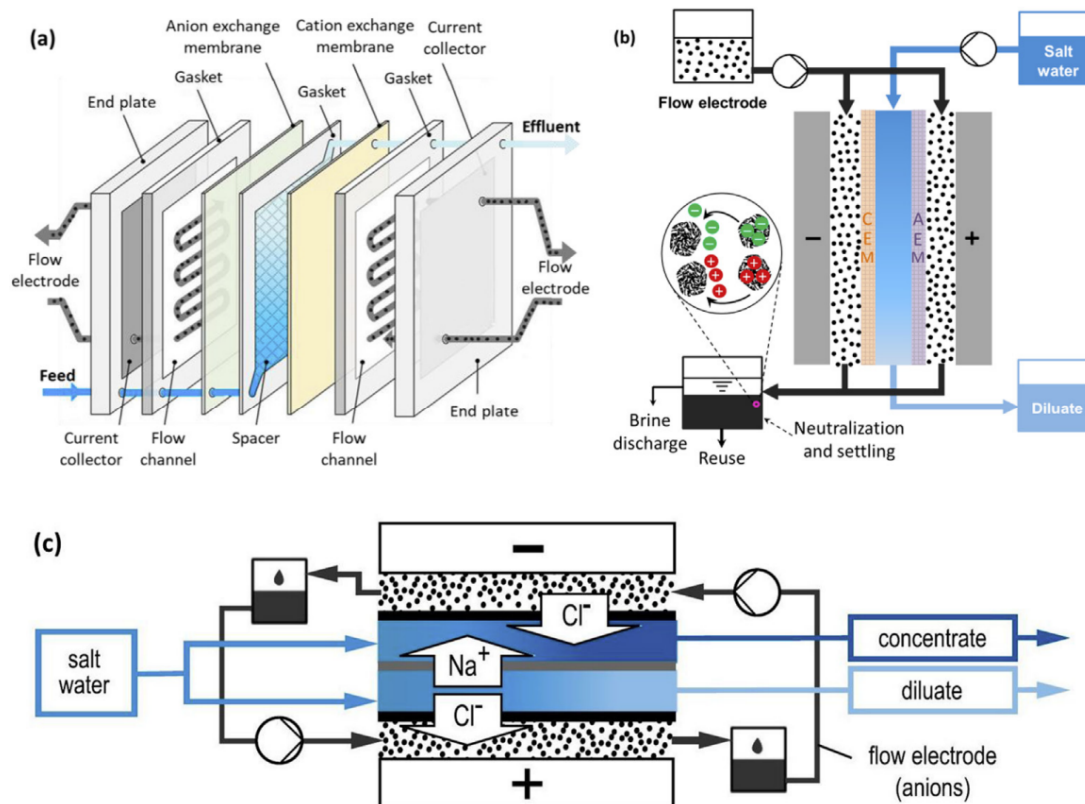


Fig. 8. Schematic of a typical FCDI cell (Tang et al., 2019)
 شکل ۸- تصویر شماتیک یک سلول FCDI (Tang et al., 2019)

۴-۲- نتایج بررسی‌ها و مقایسه عملکرد ساختارهای دارای الکترودهای خازنی

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، نتایج به‌دست آمده از بررسی پژوهش‌های منتشر شده نشان می‌دهد که ساختارهای Flow-by CDI، FCDI و MCDI به‌طور گسترده‌تری نسبت به سایر ساختارهای هندسی برای نم‌زدایی آبهای شور و تصفیه فاضلاب در حال بررسی هستند. از طرفی CDI Flow-by و MCDI در حذف آلاینده‌های مختلف یونی نیز عملکرد موفقی نشان داده‌اند. از جمله این آلاینده‌های یونی می‌توان یون فلزات سنگین مانند Cu (II)، Cr(III)، Cr(VI)، Pb(II)، Cd(II)، V(V)، Fe(II)، Fe(III)، As(III) و آلاینده‌های معدنی مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، NO_3^- ، F^- ، Br^- ، SO_4^{2-} ، NH_4^+ ، $B(OH)_4^-$ و نیز آلاینده‌های آلی مانند رنگ‌های قابل یونیزاسیون و آنتی‌بیوتیک‌ها را نام برد (Tang et al., 2019). علاوه بر کاربردهای فوق، سلول‌های CDI Flow-by و MCDI را می‌توان به‌صورت ترکیبی با سایر فناوری‌ها برای دستیابی به درصد بالایی از حذف یون استفاده کرد. ترکیبی از CDI Flow-by با RO

۴-۱-۵- سلول i-CDI

در طول فرایند یون‌زدایی با ولتاژ ثابت، ناپایداری در عملکرد سلول CDI و کاهش میزان حذف یون‌های محلول در جریان آب ورودی در طول فرایند چرخه‌ای، انجام می‌شود. این مسئله به دلیل تشکیل لایه‌های حاصل از اکسیداسیون (به‌عنوان مثال، گروه‌های کربوکسیلیک)، در سطح الکتروود کربنی رخ می‌دهد. این لایه‌ها به دلیل اکسیداسیون آند در یک محلول آبی تشکیل می‌شوند. در سال ۲۰۱۵، به‌منظور حل مشکل بیان شده، سلول i-CDI (شکل d-۷) معرفی شد.

سلول i-CDI از اصلاح سلول CDI Flow-by با استفاده از یک آند با بار سطحی خالص منفی و یک کاتد با بار سطحی خالص مثبت حاصل شده است. طول عمر عملیاتی و پایداری سلول i-CDI بسیار بهتر از سایر ساختارهای هندسی است، اما این سلول دارای ظرفیت حذف نمک کمی است. ظرفیت حذف نمک این سلول به دلیل بازه ولتاژ کاری محدود آن، کم است (Tang et al., 2019).



۵- چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده در شیرین‌سازی آب با استفاده از فناوری CDI

اگرچه فناوری CDI یک فناوری نوظهور است، اما در طول چندین سال گذشته، به‌عنوان یک فناوری نوین شیرین‌سازی آب از طریق اثرات خازنی و فرایندهای الکتروشیمیایی جذبی توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Welgemoed and Schutte, 2005). مصرف کم انرژی، هزینه‌های کم عملیاتی و عدم تولید آلودگی ثانویه از جمله مهم‌ترین مزایای این فرایند محسوب می‌شود (Almarzooqi et al., 2014). کاهش میزان مصرف انرژی برای نمک‌زدایی آبهای با شوری زیاد، افزایش ظرفیت جذب سلول، بهبود پایداری، کاهش هزینه موردنیاز برای سرمایه‌گذاری اولیه، کاهش سرمایه عملیاتی و راه‌اندازی آسان در مقیاس‌های

برای تولید آب فوق خالص و آب شیرین باکیفیت مطلوب از آب دریا، نتایج خوبی داشته است (Tang et al., 2019). همچنین ارزیابی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که ساختار CDI Flow-by و MCDI برای شیرین‌سازی آبهای با شوری کم و متوسط (تا ۳ گرم در لیتر)، اقتصادی محسوب می‌شوند (Folaranmi et al., 2020, Tang et al., 2019).

جدول ۳ مزایا، معایب و تفاوت‌های اساسی ساختارهای Flow-by CDI، MCDI، FCDI، i-CDI را بیان می‌کند. این مزایا و معایب به شکل ساختاری متفاوت و اجزای مختلف به کار رفته در این پنج ساختار، مربوط هستند. همچنین جدول ۴، نتایج مربوط به پژوهش‌های اخیر در خصوص میزان حذف نمک توسط ساختارهای بیان شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مزایا و معایب سلول‌های i-CDI، FCDI، MCDI، flow-through CDI، flow-by CDI و i-CDI

Table 3. Advantages and disadvantages of flow-by CDI, flow-through CDI, MCDI, FCDI and i-CDI

Technology	Advantages	Disadvantages	Differences
Flow-by CDI	Easy to set up Low capital cost	Low mSAC Low selectivity	Does not use IEM.
Flow-through CDI	Easy to set up High kinetics	Low mSAC High electrode cost High energy demand	Does not use IEM. It has a different direction of water flow (perpendicular to the electrodes).
MCDI	High kinetics High charge efficiency High mSAC	High energy demand Ion adsorption limitation due to the use of fixed electrodes	It uses IEM.
FCDI	Improved ion adsorption Increased capacitance due to continuous charging of fresh carbon particles into the cell	Low charge transfer Low flow rate of feed solution	It can use IEM. Electrodes are not fixed on the current collectors. It has a continuous flow of suspension electrodes.
i-CDI	High operational life High stability	Low mSAC High electrode cost due to creating a net surface charge on the electrode surface	Does not use IEM. It uses electrodes with net positive and negative surface charge.



جدول ۴- نتایج پژوهش‌های اخیر در خصوص پنج ساختار i-CDI و FCDI, MCDI, flow-through CDI, flow-by CDI

Table 4. The results of recent studies regarding the five structures flow-by CDI, flow-through CDI, MCDI, FCDI and i-CDI

No.	Architectures	Initial concentration (ppm NaCl)	Electrode material	Salt removal percentage	Capacity (mg/g)	Ref.
1	Flow-by CDI	630	AC/TiO ₂	58	-	(Zou et al., 2008)
2	Flow-by CDI	100	ACC/ZnO	34	-	(Myint and Dutta, 2012)
3	Flow-by CDI	200	ACC	32	-	(Xing et al., 2019)
4	Flow-by CDI	1000	NG-CNFs ¹	-	14.79	(Liu et al., 2015b)
5	Flow-by CDI	500	Graphene gel	-	49.34	(Ma et al., 2018)
6	Flow-by CDI	300	3D Graphene modified with SWCNT	-	48.73	(Cao et al., 2018)
7	Flow-by CDI	800	GO ² /resorcinol formaldehyde microsphere (GORFM)	-	35.52	(Liu et al., 2015a)
8	Flow-by CDI	800	GO-CNT/AC	-	21.3	(Lee et al., 2018)
9	Flow-by CDI	500	3D Graphene grafted with amine-sulfonic functional group	-	13.72	(Liu et al., 2016)
10	Flow-by CDI	300	Flexible Graphene	-	18.43	(El-Deen et al., 2016)
11	MCDI	300	rGO/TiO ₂	-	9.1	(El-Deen et al., 2015)
12	MCDI	1000	AC	83.6	-	(Kim et al., 2010)
13	MCDI	13	AC	99.2	-	(Lee and Choi, 2012)
14	MCDI	2925	Bi-tortuous activated carbon electrodes coated	-	8.1	(Bhat et al., 2019)
15	MCDI	500	Iron-grafted TiO ₂ nanoparticle layer on the porous carbon electrode	-	18.5	(Min et al., 2018)
16	MCDI	300	Flexible 3D nanoporous graphene	-	14.32	(El-Deen et al., 2016)
17	FCDI	500	AC	46	-	(Lim et al., 2022)
18	FCDI	500	Biochar45% AC55%	92	-	(Lim et al., 2022)
19	FCDI	500	Biochar	96	-	(Lim et al., 2022)
20	i-CDI	750	Modified AC	25	-	(Ntakirutimana and Tan, 2021)
21	Flow-through CDI	60	AC	-	0.25	(Wang et al., 2011)
22	Flow-through CDI	60	ACF ³	-	1.4	(Wang et al., 2011)
23	Flow-through CDI	60	CNT	-	0.75	(Wang et al., 2011)
24	Flow-through CDI	100	Carbon aerogel	-	3.25	(Wang et al., 2011)
25	Flow-through CDI	100	CNT-CNF composites	-	3.25	(Wang et al., 2011)
26	Flow-through CDI	100	CNT sponges	-	4.5	(Wang et al., 2011)

¹ Nitrogen Doped Carbon Nanofibers (NG-CNFs)

² Graphene Oxide (GO)

³ Activated Carbon Fiber (ACF)



طراحی و ساخت الکترودهای متخلخل کربنی بهینه در کاهش هزینه ساخت، کاهش مصرف انرژی و پایداری سلول و الکتروود اهمیت زیادی دارد. در حال حاضر پژوهش‌های متعددی با تمرکز بر روی ساخت الکترودهای متخلخل مقرون‌به‌صرفه با ظرفیت جذب زیاد در حال انجام است. در شکل ۱۰، درصد کاربرد و بررسی مواد مختلف برای ساخت الکترودها در پژوهش‌های منتشر شده، ارائه شده است. همچنین اخیراً، استفاده از منابع تجدیدپذیر همچون ضایعات زیست‌توده برای ساخت الکترودهای خازنی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Xie et al., 2018). استفاده از ضایعات زیست‌توده برای ساخت الکترودهای CDI هم‌زمان با ایجاد ارزش افزوده، به مدیریت این ضایعات و حل بحران آب کمک می‌کند؛ بنابراین در آینده، پیشرفت در این حوزه می‌تواند تأثیر زیادی در بهینه‌سازی اقتصادی CDI داشته باشد. بررسی کاربردهای مختلف فرایند CDI، بهبود و بهینه‌سازی این فرایند برای حذف آلاینده‌های غیرآلی مانند یون فلزات سنگین، نیترات و فسفات از جمله زمینه‌های پژوهشی مهم در دانشگاه‌های معتبر دنیا

مختلف آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی این فناوری هستند.

حوزه‌های قابل بررسی و پیشرفت این فناوری به‌طور کلی شامل موارد مربوط به مواد سازنده الکتروود، کاربردهای این فناوری، حالت عملیاتی، طراحی سلول، واکنش‌های فارادایی و مدل‌های نظری است که تمرکز پژوهشی بر روی این حوزه‌ها می‌تواند معایب فناوری CDI را رفع کند. در حال حاضر، پژوهش‌های بسیار زیادی با هدف ارتقا و توسعه این دانش به‌منظور دستیابی به یک فناوری پایدار و با مصرف کم انرژی در حال انجام است. پیشرفت در مسیر کاهش مصرف انرژی فناوری CDI، در شکل ۹ از مقایسه میزان مصرف انرژی فناوری RO و MCDI قابل مشاهده است.

طبق جهت‌گیری پژوهش‌های اخیر پژوهشگران جهانی، ساخت الکترودهای متخلخل کارآمد و توسعه هندسه‌های کاربردی دو گلوگاه اصلی توسعه فناوری CDI در بین حوزه‌های قابل پیشرفت این فناوری هستند. راهکار اصلی بهبود عملکردی و اقتصادی CDI، تمرکز بر این دو حوزه با هدف افزایش بازده فناوری CDI است.

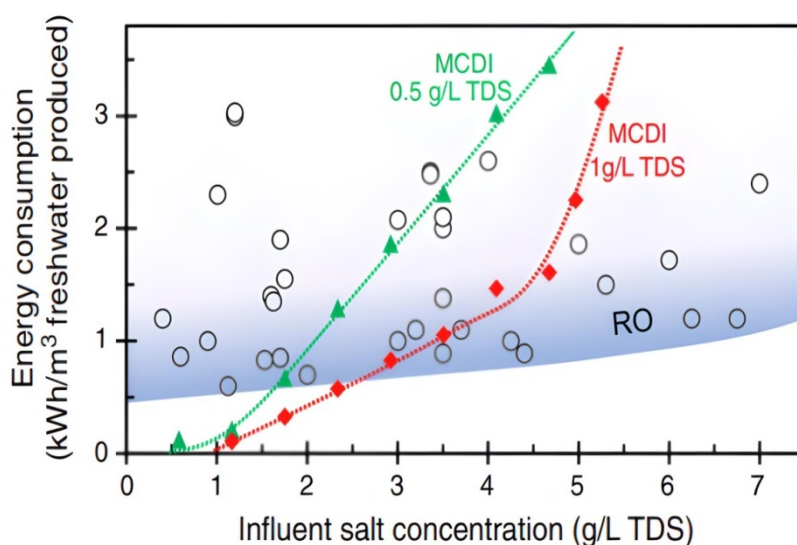


Fig. 9. Comparison of energy consumption of MCDI and RO. Triangles: MCDI energy consumption to bring the salt concentration to the level of 0.5 g/L (the upper limit of TDS for good drinking water). Rhombus: MCDI energy consumption to reduce salt concentration to 1 g/L (the upper limit of TDS for drinking water). Circles: RO data. (Zhao et al., 2013)

شکل ۹- مقایسه مصرف انرژی بین MCDI و RO. مثلث‌ها: مصرف انرژی MCDI برای رساندن غلظت نمک به ۰/۵ گرم در لیتر (حد بالای TDS برای آب آشامیدنی خوب). لوزی‌ها: مصرف انرژی MCDI برای کاهش غلظت نمک به ۱ گرم در لیتر (حد بالای TDS برای آب آشامیدنی). دایره‌ها: داده‌های RO. (Zhao et al., 2013)



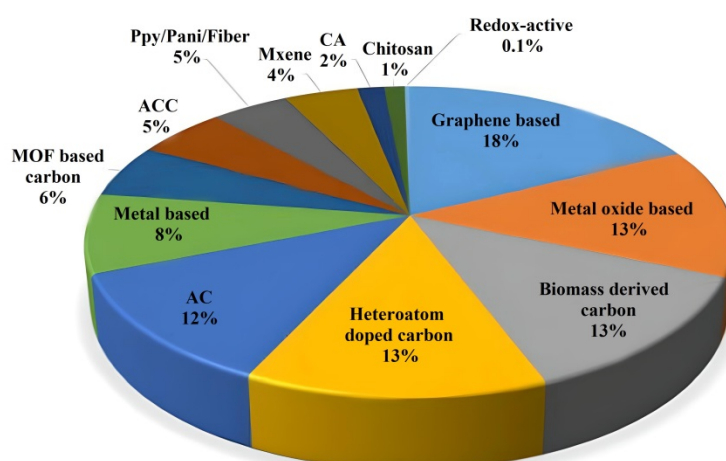


Fig. 10. Percentage of publications with materials perspective (2012-2020) (Datar et al., 2022)
 شکل ۱۰- درصد کاربرد مواد مختلف در مقالات منتشر شده در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ (Datar et al., 2022)

روند پژوهش‌های جهانی نشان داده که در رفع چالش‌های پیش‌روی این فناوری، تمرکز بر روی دو حوزه توسعه الکترودهای متخلخل بهینه و توسعه هندسه‌های کاربردی می‌تواند تأثیرگذارتر از سایر راهکارها باشد. این پژوهش با تمرکز بر روی ساختارهای هندسی مختلف CDI، به طبقه‌بندی، به معرفی و بررسی ابعاد مختلف این فناوری از لحاظ شکل ظاهری و پارامترهای فرایندی مربوطه پرداخت. علاوه بر این، ساختارهای هندسی با الکترودهای خازنی و ویژگی‌های آنها بررسی شد و مزایا و معایب هر کدام از هندسه‌های خازنی ارائه شد. نتایج نشان داد که با وجود چالش‌های مختلف، این فناوری می‌تواند در آینده به‌عنوان یک فناوری پاک و دوستدار محیط‌زیست، با مصرف کم انرژی و به صورت اقتصادی، امکان تأمین آب شرب شیرین را در سراسر جهان فراهم کند.

۷- قدردانی

به این وسیله نویسندگان، از حمایت مالی و تجهیزاتی مرکز تحقیقات کربن سبز دانشگاه صنعتی سهند، در انجام این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

به شمار می‌آید (Choi et al., 2019). با پیشرفت‌های متوالی در این حوزه، امید است در آینده از CDI برای حذف کارآمد و اقتصادی آلاینده‌هایی همچون فلزات سنگین و نیترات استفاده شود.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بحران کاهش دسترسی به آب شیرین و معایب روش‌های نمک‌زدایی مرسوم، طراحی و استفاده از روش‌های نوین و اقتصادی نمک‌زدایی آب ضروری است. فناوری CDI، یک روش الکتروشیمیایی جذبی نوظهور برای نمک‌زدایی آب است که اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. پیشرفت‌های مربوط به حوزه ساختارهای مختلف CDI و ساخت انواع مختلفی از الکترودها، عملکرد این فناوری را بهبود بخشیده است. چالش‌های پیش‌روی این فناوری در مواردی همچون کاهش میزان مصرف انرژی، افزایش ظرفیت جذب، بهبود پایداری، کاهش هزینه موردنیاز برای سرمایه‌گذاری اولیه، کاهش سرمایه عملیاتی و سهولت راه‌اندازی در مقیاس‌های مختلف خلاصه شده است.

References

- Al-Karaghoul, A. & Kazmerski, L. L. 2013. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>.
- Almarzooqi, F. A., Al Ghaferi, A. A., Saadat, I. & Hilal, N. 2014. Application of capacitive deionisation in water desalination: a review. *Desalination*, 342, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.031>.



- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., et al. 2017. Membrane-based seawater desalination: present and future prospects. *Desalination*, 401, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.002>.
- Bhat, A. P., Reale, E. R., Del Cerro, M., Smith, K. C. & Cusick, R. D. 2019. Reducing impedance to ionic flux in capacitive deionization with Bi-tortuous activated carbon electrodes coated with asymmetrically charged polyelectrolytes. *Water Research X*, 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100027>.
- Busch, M. & Mickols, W. 2004. Reducing energy consumption in seawater desalination. *Desalination*, 165, 299-312. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.035>.
- Cao, J., Wang, Y., Chen, C., Yu, F. & Ma, J. 2018. A comparison of graphene hydrogels modified with single-walled/multi-walled carbon nanotubes as electrode materials for capacitive deionization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 518, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.02.019>.
- Choi, J., Dorji, P., Shon, H. K. & Hong, S. 2019. Applications of capacitive deionization: desalination, softening, selective removal, and energy efficiency. *Desalination*, 449, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.10.013>.
- Datar, S. D., Mane, R. & Jha, N. 2022. Recent progress in materials and architectures for capacitive deionization: a comprehensive review. *Water Environment Research*, 94, e10696. <https://doi.org/10.1002/wer.10696>.
- Dykstra, J. E. 2018. Desalination with porous electrodes: mechanisms of ion transport and adsorption. PhD Thesis. Wageningen University. Netherlands. <https://doi.org/10.18174/443551>.
- El-Deen, A. G., Boom, R. M., Kim, H. Y., Duan, H., Chan-Park, M. B. & Choi, J. H. 2016. Flexible 3D nanoporous graphene for desalination and bio-decontamination of brackish water via asymmetric capacitive deionization. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8, 25313-25325. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b08658>.
- El-Deen, A. G., Choi, J. H., Kim, C. S., Khalil, K. A., Almajid, A. A. & Barakat, N. A. 2015. TiO₂ nanorod-intercalated reduced graphene oxide as high performance electrode material for membrane capacitive deionization. *Desalination*, 361, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.033>.
- Elimelech, M. & Phillip, W. A. 2011. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*, 333, 712-717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>.
- Emmanuel, S. S., Adesibikan, A. A. & Saliu, O. D. 2023. Phylogenically bioengineered metal nanoarchitecture for degradation of refractory dye water pollutants: a pragmatic minireview. *Applied Organometallic Chemistry*, 37, e6946. <https://doi.org/10.1002/aoc.6946>.
- Folaranmi, G., Bechelany, M., Sifat, P., Cretin, M. & Zaviska, F. 2020. Towards electrochemical water desalination techniques: a review on capacitive deionization, membrane capacitive deionization and flow capacitive deionization. *Membranes*, 10, 96. <https://doi.org/10.3390/membranes10050096>.
- Kılıç, Z. 2020. The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4, 239-241. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00250>.
- Kim, Y. J., Hur, J., Bae, W. & Choi, J. H. 2010. Desalination of brackish water containing oil compound by capacitive deionization process. *Desalination*, 253, 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.022>.
- Lee, B., Park, N., Kang, K. S., Ryu, H. J. & Hong, S. H. 2018. Enhanced capacitive deionization by dispersion of CNTs in activated carbon electrode. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6, 1572-1579. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01750>.
- Lee, J. H. & Choi, J. H. 2012. The production of ultrapure water by membrane capacitive deionization (MCDI) technology. *Journal of Membrane Science*, 409, 251-256. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.03.064>.
- Lim, J., Shin, Y. U. & Hong, S. 2022. Enhanced capacitive deionization using a biochar-integrated novel flow-electrode. *Desalination*, 528, 115636. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115636>.
- Liu, L., Liao, L., Meng, Q. & Cao, B. 2015a. High performance graphene composite microsphere electrodes for capacitive deionisation. *Carbon*, 90, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.04.009>.
- Liu, P., Wang, H., Yan, T., Zhang, J., Shi, L. & Zhang, D. 2016. Grafting sulfonic and amine functional groups on 3D graphene for improved capacitive deionization. *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 5303-5313. <https://doi.org/10.1039/C5TA10680J>.



- Liu, Y., Xu, X., Lu, T., Sun, Z., Chua, D. H. & Pan, L. 2015b. Nitrogen-doped electrospun reduced graphene oxide-carbon nanofiber composite for capacitive deionization. *Rsc Advances*, 5, 34117-34124. <https://doi.org/10.1039/C5RA00620A>.
- Ma, J., Wang, L. & Yu, F. 2018. Water-enhanced performance in capacitive deionization for desalination based on graphene gel as electrode material. *Electrochimica Acta*, 263, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.041>.
- Min, B. H., Choi, J. H. & Jung, K. Y. 2018. Improvement of capacitive deionization performance via using a Tiron-grafted TiO₂ nanoparticle layer on porous carbon electrode. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35, 272-282. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0270-3>.
- Murphy, G. & Tucker, J. 1966. The demineralization behavior of carbon and chemically-modified carbon electrodes. *Desalination*, 1, 247-259. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80256-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80256-8).
- Myint, M. T. Z. & Dutta, J. 2012. Fabrication of zinc oxide nanorods modified activated carbon cloth electrode for desalination of brackish water using capacitive deionization approach. *Desalination*, 305, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.08.010>.
- Ntakirutimana, S. & Tan, W. 2021. Synergistic effects of ionic and nonionic surfactants treatment on activated carbon electrodes for inverted capacitive deionization. *Separation and Purification Technology*, 258, 117987. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117987>.
- Porada, S., Zhao, R., Van Der Wal, A., Presser, V. & Biesheuvel, P. 2013. Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Progress in Materials Science*, 58, 1388-1442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>.
- Suss, M., Porada, S., Sun, X., Biesheuvel, P., Yoon, J. & Presser, V. 2015. Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it? *Energy and Environmental Science*, 8, 2296-2319. <https://doi.org/10.1039/C5EE00519A>.
- Tang, W., Liang, J., He, D., Gong, J., Tang, L., Liu, Z., et al. 2019. Various cell architectures of capacitive deionization: recent advances and future trends. *Water Research*, 150, 225-251. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.064>.
- Wang, L., Wang, M., Huang, Z. H., Cui, T., Gui, X., Kang, F., et al. 2011. Capacitive deionization of NaCl solutions using carbon nanotube sponge electrodes. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 18295-18299. <https://doi.org/10.1039/c1jm13105b>.
- Welgemoed, T. & Schutte, C. F. 2005. Capacitive deionization technology™: an alternative desalination solution. *Desalination*, 183, 327-340. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.054>.
- Xie, Z., Shang, X., Yan, J., Hussain, T., Nie, P. & Liu, J. 2018. Biomass-derived porous carbon anode for high-performance capacitive deionization. *Electrochimica Acta*, 290, 666-675. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.09.104>.
- Xing, W., Liang, J., Tang, W., Zeng, G., Wang, X., Li, X., et al. 2019. Perchlorate removal from brackish water by capacitive deionization: experimental and theoretical investigations. *Chemical Engineering Journal*, 361, 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.074>.
- Zhao, R., Porada, S., Biesheuvel, P. & Van Der Wal, A. 2013. Energy consumption in membrane capacitive deionization for different water recoveries and flow rates, and comparison with reverse osmosis. *Desalination*, 330, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.017>.
- Zou, L., Morris, G. & Qi, D. 2008. Using activated carbon electrode in electrosorptive deionisation of brackish water. *Desalination*, 225, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.014>.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

