

Numerical Simulation of the saline water electrolysis process using electromagnetic waves

Akbar Eghbali, Mohammad Reza Karafi *, Mohammad Hossein Sadeghi

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Microwave irradiation has been used to speed up chemical reactions in comparison to conventional reactions. Because the electromagnetic waves cause increasing molecular vibrations. Energy consumption is reduced by using electromagnetic waves. As a result, electrode corrosion rate is reduced. In this article, a numerical method has been used to compare saline water electrolysis (EL) and saline water electromagnetic electrolysis reactor (EMER). Axisymmetric geometry is considered in simulations and steady and frequency dependent analysis are conducted. Continuity equations and Navier-Stokes equation for fluid flow, and Nernst-Planck equation for mass transfer flow, and the Maxwell equation for electromagnetic wave modeling are taken into account. At the first, the effect of electromagnetic waves on the ion separation has been investigated. Results have shown that an obvious enhancement has occurred in ion separation due to electromagnetic irradiation. The dechlorination in EMER process has been improved more than three times in comparison with EL process. Also, the ion separation has been enhanced linearly by increasing the cell potential and initial salinity. The quantitative results of each parameter are shown in the paper.

Review History:

Received: Mar. 15, 2023

Revised: Mar. 04, 2024

Accepted: Mar. 05, 2024

Available Online: Mar. 29, 2024

Keywords:

Electrolysis

Electromagnetic Waves

Numerical Simulation

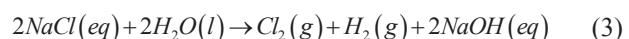
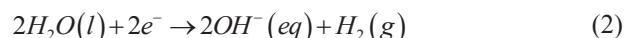
1- Introduction

Dechlorination has been defined as a chemical process by which some or most of the chlorine has been removed [1]. Some of problems have been recognized in seawater electrolysis. The main problem is the low conductivity of the electrolyte and subsequent high power requirements [2]. The power consumption comparison of some electrodes and the energy consumption depending on the salinity level for the target oxidants production have been investigated by Lacasa et al. [3]. Also, the influence of salinity, current density and operation mode (batch and single-pass) on inactivation and total residual chlorine production rates have been investigated by Nanayakkara et al. [4]. The microwave-enhanced chemical reactions have presented a dramatic acceleration in reaction rates and selectivity [5]. A wide variety of chemical transformations have been done using a microwave reaction vessel by Zhang and Hayward [6]. The present paper concentrates on the simulation of saline water electrolysis (EL) and saline water electromagnetic electrolysis reactor (EMER) to demonstrate the effect of microwave irradiations on saline water electrolysis.

outer radius of 18 mm as the cathode, inner radius of 4, 6, 8, and 10 mm as the anode, and the height of 50 mm has been used for the electrolysis process.

3- Chemical Reactions and equations

The electrochemical chlorine evolution reaction and hydrogen evolution reaction are two half-reactions [7]:



The continuity and Navier-Stokes equations have been used for mass and momentum balance. The mass flux of species i in the electrolyte is given by the Nernst-Planck equation. [8]:

2- Geometry and computational domain

The geometry and boundary conditions of the present paper are shown in Figure 1. A cylindrical reactor with an

*Corresponding author's email: karafi@modares.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

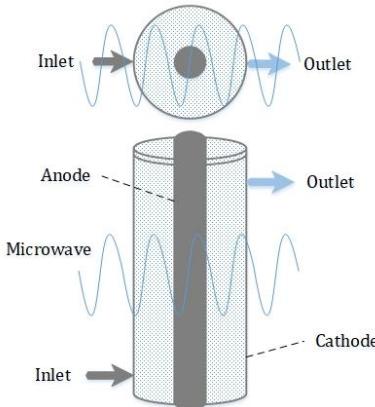


Fig. 1. Schematic diagram of EMER

Table 1. Basic parameters used in the model

Value	Description
10-16 V	DC potential
2.5E-9 m ² /s	Diffusion coefficient, Na
2E-9 m ² /s	Diffusion coefficient, Cl
298.15 K	Temperature
110-440 mol/m ³	Inlet concentration, Na
110-440 mol/m ³	Inlet concentration, Cl
0.05 m	Channel length
4-10 mm	Anode Radius
18 mm	Cathode Radius

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla p + \nabla \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] + \vec{F} \quad (5)$$

$$\vec{N}_i = -D_i \nabla c_i - Z_i \mu_i c_i \nabla \Phi + \vec{u} c_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{N}_i = 0 \quad (7)$$

where ρ , u , p , μ , c_i , D_i , Z_i , μ_i , Φ and u are the density, the velocity vector, the gauge pressure, dynamic viscosity, concentration, diffusion coefficient, charge number of species i , ionic migration, electric potential, and the flow velocity vector respectively. Maxwell's equations and the equation of continuity are a set of equations indicating the relationships between the fundamental electromagnetic quantities [9].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (11)$$

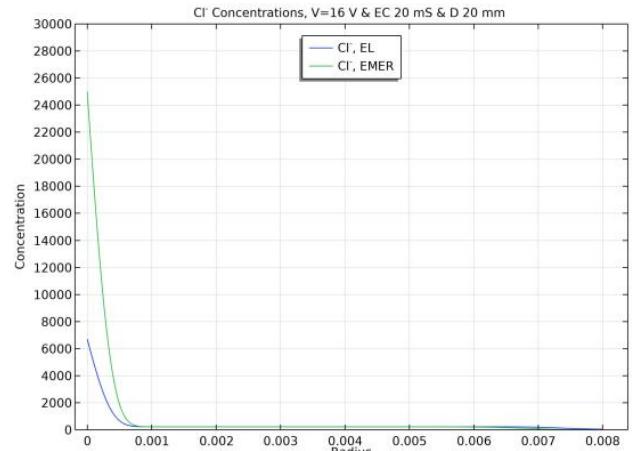


Fig. 2. Comparison of Cl⁻ concentrations (mol/m³) between EL and EMER

4- Numerical approach

The COMSOL v6.0 has been used to solve the above-mentioned governing equations. The working conditions including the geometric parameters and other working parameters are listed in Table 1.

5- Results

Figure 2 illustrates the concentration comparison of Cl⁻ ions between EL and EMER for V=16V and D=20mm. Electromagnetic enhancement in Cl⁻ ion distributions is

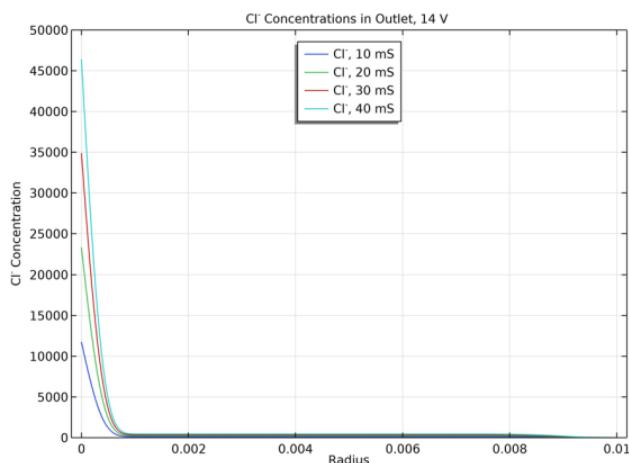


Fig. 3. The effect of salinity on the Cl⁻ concentrations (mol/m³) in EMER

clearly observed. The differences between EMER and EL ion concentrations can be explained by decreasing the energy requirement and increasing the reaction rate in the presence of electromagnetic waves, which illustrates a significant electromagnetic effect.

The effect of salinity on the Cl⁻ concentration has been shown in Figure 3. It seems that the performance of ion separation has been improved by increasing the salinity.

6- Conclusions

The comparison of EL and EMER have been done numerically and a rapid ion separation increase is observed in EMER simulation because of decreasing the energy requirement under electromagnetic irradiation. Also, As the salinity increased the ion separation raised linearly due to better migration of species in solution.

References

- [1] A. Plappally, Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7) (2012) 4818-4848.
- [2] G. S. W. Hsu, C. W. Hsia, and S. Y. Hsu, Effects of electrode settings on chlorine generation efficiency of electrolyzing seawater, *Journal of Food and Drug Analysis*, 23(4) (2015) 729-734.
- [3] E. Lacasa, E. Tsolaki, Z. Sbokou, M. A. Rodrigo, D. Mantzavinos, and E. Diamadopoulos, Electrochemical disinfection of simulated ballast water on conductive diamond electrodes, *Chemical Engineering Journal*, 223 (2013) 516-523.
- [4] K. N. Nanayakkara, A. K. Alam, Y.-M. Zheng, and J. P. Chen, A low-energy intensive electrochemical system for the eradication of Escherichia coli from ballast water: Process development, disinfection chemistry, and kinetics modeling, *Marine Pollution Bulletin*, 64(6) (2012) 1238-1245.
- [5] W. Xu, J. Zhou, Z. Su, Y. Ou, and Z. You, Microwave catalytic effect: a new exact reason for microwave-driven heterogeneous gas-phase catalytic reactions, *Catalysis Science & Technology*, 6(3) (2016) 698-702.
- [6] X. Zhang, D. Hayward, Applications of microwave dielectric heating in environment-related heterogeneous gas-phase catalytic systems, *Inorganica Chimica Acta*, 359(11) (2006) 3421-3433.
- [7] S. Jiang, Y. Liu, H. Qiu, C. Su, and Z. Shao, High selectivity electrocatalysts for oxygen evolution reaction and anti-chlorine corrosion strategies in seawater splitting, *Catalysts*, 12(3) (2022) 261.
- [8] J. Lu, D. J. Li, L. L. Zhang, and Y. X. Wang, Numerical simulation of salt water electrolysis in parallel-plate electrode channel under forced convection, *Electrochimica Acta*, 53(2) (2007) 768-776.
- [9] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India, (1989).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Eghbali, M. R. Karafi, M. H. Sadeghi, *Numerical Simulation of the saline water electrolysis process using electromagnetic waves*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(11) (2024) 283-286.

DOI: [10.22060/mej.2024.22277.7592](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22277.7592)





شبیه‌سازی عددی فرآیند الکتروولیز آب شور به کمک امواج الکترومغناطیسی

اکبر اقبالی^{ID}، محمد رضا کرفی^{*}، محمد حسین صادقی

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰

کلمات کلیدی:

الکتروولیز

امواج الکترومغناطیسی

شبیه‌سازی عددی

خلاصه: در این تحقیق فرآیندهای الکتروولیز آب شور در هندسه متقاضان محوری و به صورت‌های پایا و وابسته به فرکانس شبیه‌سازی شده است. معادلات پیوستگی و نویر استوکس برای جریان سیال، معادله نرنس نسل پلانک برای انتقال شار جرمی ذرات و معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیس در نظر گرفته شده‌اند. اعمال امواج الکترومغناطیسی به آب، موجب افزایش جنبش مولکولی شده و در نتیجه با عبور جریان کمتر از قطب‌های آند و کاتد، فرآیند تجزیه امالح صورت می‌پذیرد. همچنین با عبور جریان کمتر از قطب‌ها، سرعت خوردگی نیز کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نیز حاکی از تاثیر قابل توجه امواج الکترومغناطیس در جداسازی یونهای کلر و سدیم بوده است. بر اساس نتایج میزان جداسازی یون‌ها در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی آب شور بیش از سه برابر جداسازی یون‌ها در فرآیند الکتروولیز آب شور بوده است. همچنین تاثیر پارامترهای مختلفی چون قطر آند، ولتاژ الکتریکی و غلظت الکتروولیت شبیه‌سازی گردیده و نتایج مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از افزایش میزان جداسازی یون‌ها با افزایش هر یک از پارامترهای ولتاژ و غلظت الکتروولیت است. این در حالی است که بیشترین و کمترین میزان جداسازی یون‌ها در قطرهای الکتروود ۸ و ۱۶ میلی‌متر حاصل شده است.

۱- مقدمه

برای غلبه بر انرژی پیوند مولکولی نمک‌ها، چگالی جریان را در سطح لازم حفظ کرد. این امر خود بیانگر این است که مواردی نظیر جریان عبوری از الکتروودها و نوع آن، سطح ولتاژ، مساحت الکتروود و فاصله آنها از یکدیگر باید مورد توجه قرار داشته باشند [۳].

توان مصرفی الکتروولیز آب نمک برای الکتروودهای مختلف و سطوح شوری مختلف توسط لاکاسا و همکاران بررسی شده است [۴]. آنها نشان دادند که برای الکتروودهای اکسید ایریدیوم به همراه تیتانیوم^۱ و پلاتین به همراه تیتانیوم^۲، مصرف انرژی بهینه در محدوده چگالی جریان ۳۰-۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع رخ می‌دهد. در سالهای اخیر تلاشهایی بر روی توسعه مدل‌های ریاضی برای توصیف عملکرد الکتروولیز صورت گرفته است [۵]. مدل‌های تجربی توسعه یافته به دلیل دقت بالا برای توصیف تاثیر پارامترهای عملکردی، بیشتر مورد توجه بوده‌اند. به ویژه مدل اولبرگ [۶] که مطالعه قابل توجهی بر روی عملکرد الکتروولیز داشته است. انرژی باد در کارکیائی و همکاران [۷] و نیز انرژی خورشیدی در کار جیانگ و همکاران

اگرچه نزدیک به سه چهارم سطح زمین را آب پوشانده است، اما تنها ۲/۵ درصد از تمامی آبهای زمین تازه و شیرین بوده که بخش بزرگی از این آبهای شیرین، در یخچال‌ها و توده‌های یخی محصور شده و از دسترس خارج است. پیش‌بینی می‌شود تقاضای آب تا سال ۲۰۵۰، افزایشی ۵۵ درصدی داشته باشد و در نتیجه آن میزان دسترسی به آب پاک و قابل اطمینان کاهش چشمگیری خواهد داشت [۱]. فناوری‌های نمک‌زدایی مختلفی برای جداسازی نمک از آب شور، تولید آب با درصد نمک پایین وجود دارد. بیشتر فناوری‌ها بر روی تقطیر (فرآیندهای حرارتی) یا غشاء برای جداسازی نمک از آب تکیه دارند. در کنار این دو نوع فناوری، فرآیندهای شیمیایی نیز برای جداسازی نمک از آب شور ارائه شده‌اند [۲]. در فرآیند الکتروولیز محلول آب نمک با جریان مستقیم، هرچه سطح تماس الکتروودها با الکتروولیت (آب نمک) بیشتر باشد، بازده بالاتری از الکتروولیز نیز حاصل می‌گردد. در صورتی که هدف از الکتروولیز کاهش نمک‌های محلول در آب باشد، می‌بایست

۱ IrO₂/Ti

۲ Pt/Ti

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: karafi@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسنده‌گان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



امواج الکترومغناطیسی با هدف گرمایش گزینشی کربن، نتایج ترمودینامیکی متفاوتی برای واکنش‌ها در پی خواهد داشت [۱۵]. در کار دیگر این گروه، تبدیل هیدروژن سولفید^۳ به هیدروژن و فسفر توسط امواج میکروموج مورد بررسی قرار گرفت که تاثیر این امواج در کارابی فرآیند قابل توجه گزارش شده است [۱۶].

تبدیل موثر مونو اکسید نیتروژن و تجزیه هیدروژن سولفید به کمک امواج الکترومغناطیسی توسط توکونیتی و همکاران بررسی شد که کاهش چشمگیر انرژی فعالسازی فرآیند به کمک امواج الکترومغناطیسی را به دنبال داشته است [۱۷]. وانگ و وانگ به بازنگری مطالعات صورت گرفته در خصوص تاثیر امواج میکروموج بر روی پالایش پساب پرداختند که نتایج گزارش شده حاکی از کارآمدی این امواج برای این فرآیندها بوده است [۱۸]. از جمله این موارد می‌توان به تاثیر این امواج در حذف فنول از پساب در کارلیو و همکاران اشاره نمود [۱۹]. لی و همکاران نیز تاثیر امواج میکروموج در تسريع شکست پیوند متیل اورنج را بررسی نموده‌اند [۲۰].

شبیه‌سازی فرآیند الکترولیز نیز از جمله مطالعات سالهای اخیر بوده است. آیپک شبیه‌سازی عددی اسیدشویی الکترولیزی فولاد را گزارش داده است [۲۱]. لو و همکاران یک مدل عددی پایا برای الکترولیز آب شور با جابجایی اجباری را ارائه داده است [۲۶]. معادلات نویر استوکس و نرنست پلانک با استفاده از تکنیک المان محدود حل شده است تا نفوذ، جابجایی و مهاجرت یونی را مدل کنند. همچنین کین و باتو حل معادلات کوپل شده نرنست پلانک، نویر استوکس و ماکسول را برای شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیکی به همراه میدان مغناطیسی گزارش کردند [۲۷].

با اینکه مطالعات بسیاری در خصوص تاثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی فرآیندهای شیمیایی صورت گرفته است، لکن بررسی تاثیر این امواج بر روی نمک‌زدایی از آب شور بسیار محدود بوده است. در فرآیند الکترولیز آب شور که شکست پیوندها توسط جریان مستقیم الکتریستیه رخ می‌دهد و اعمال امواج الکترومغناطیسی به آب، موجب افزایش جنبش مولکولی شده و در نتیجه با عبور جریان کمتر از قطب‌های آند و کاتد، فرآیند تجزیه امالح صورت می‌پذیرد. همچنین با عبور جریان کمتر از قطب‌ها، سرعت خوردگی و تولید محصولات جانبی که امری نامطلوب محسوب می‌شود نیز کاهش می‌یابد. در نهایت می‌توان اشاره داشت که استفاده از امواج الکترومغناطیسی در الکترولیز آب شور، علاوه بر بهبود بازده انرژی، موجب کنترل بهتر فرآیند با کاهش میزان خوردگی و تولید محصولات جانبی نیز خواهد شد.

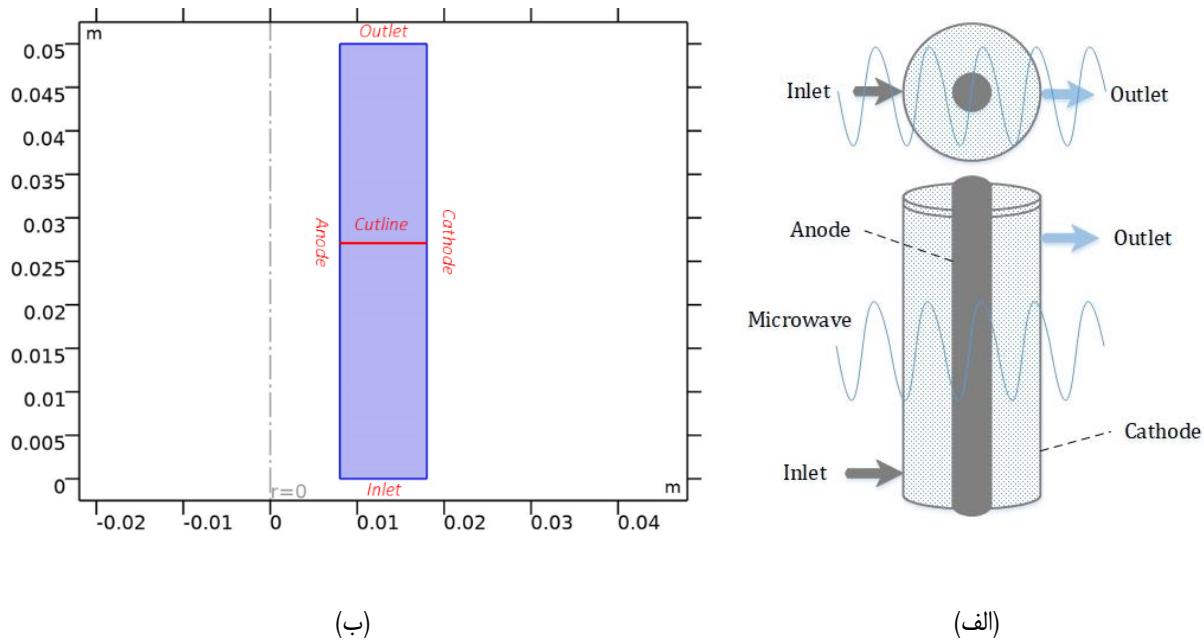
[۸] برای الکترولیز استفاده شده است. همچنین کیائی و همکاران [۹] تاثیر شبکه برق را بر روی الکترولیز مورد بررسی قرار داده‌اند. ترکیب الکترولیز با نیروگاه میکرو با هدف کنترل فرآیند توسط گیاوالی و اوساوا [۱۰] صورت گرفته است.

امواج الکترومغناطیسی در محدوده میکروموج (با فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز) برای سرعت بخشیدن به واکنش‌های شیمیایی بکار رفته و نرخ واکنش‌ها را در مقایسه با حالت عادی افزایش می‌دهند [۱۱-۱۵]. به عنوان نمونه برای پالایش پساب به کمک امواج الکترومغناطیسی در مقایسه با روش‌های گرمایشی مرسوم، مزایای فراوانی چون کارابی بالا، زمان واکنش کوتاه، هزینه‌های کم و حذف آلاینده‌های ثانویه مطرح شده است [۱۶-۲۰]. انرژی امواج الکترومغناطیسی برای بهبود سنتز مواد، واکنش‌های پلیمری، علم مواد، نانوفناوری و بیومکانیک بکار رفته و کاربردهای روزافزونی داشته است [۲۱]. دلایل مختلفی برای توجیه توانایی امواج الکترومغناطیس در بهبود فرآیندهای شیمیایی ارائه شده است. گابریل و همکاران عنوان کرده‌اند که بهبود فرآیندها به دلیل اثرات حرارتی و جنبشی امواج بوده و در نتیجه گرمایش سریع و افزایش دما در استفاده از این امواج مشاهده شده است [۲۲]. از دیدگاه دیگر، این بهبود ناشی از برهمکنش‌های گزینشی میدان الکترومغناطیسی در برخورد با مولکولهای ماده مورد آزمایش یا کاتالیست‌هاست و به عنوان اثرات غیرحرارتی امواج الکترومغناطیس شناخته می‌شود [۲۳ و ۲۴].

ژو و همکاران رویکرد جدیدی از بکارگیری امواج میکروموج برای حذف مونو اکسید نیتروژن^۱ به صورت حذف انتخابی معرفی نمودند [۱۱]. این گروه همچنین واکنش‌های شیمیایی سیستم‌های کاتالیستی ناهمگون را تحت اثر امواج الکترومغناطیسی بررسی کرده‌اند [۱۲]. نتایج آنها نشان می‌دهد که سرعت واکنش‌های شیمیایی که با حضور امواج الکترومغناطیس حاصل می‌شود، در روش مرسوم و بدون حضور امواج الکترومغناطیس قابل حصول نخواهد بود. تاثیر گزینشی امواج الکترومغناطیس در استخراج اکسیژن از مونو اکسید نیتروژن و با حضور کاتالیست^۲ در پژوهش دیگری از همان گروه بررسی شده است [۱۳]. همچنین آنها تاثیر مجموعه‌ای از پارامترهای واکنشی از جمله رفتار گرمایشی امواج الکترومغناطیسی، دمای واکنش، دمای گاز خروجی، توان ورودی امواج و غلظت اکسیژن را بررسی کردند [۱۴]. آنها دریافتند که امواج الکترومغناطیسی دارای تاثیر گزینشی در مود واکنش کاتالیستی هستند. علاوه بر این مشاهده کردند که استفاده از

1 NO

2 BaMnxMg1xO₃



شکل ۱. (الف) شماتیک هندسی و (ب) مدل عددی و شرایط مرزی راکتور الکترومغناطیسی

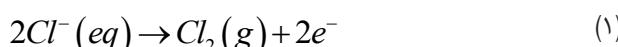
Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) computational area of microwave assisted electrolysis reactor system

اعمال می‌شود. مرز پایین ورودی جریان و مرز بالا خروجی جریان در نظر گرفته شده است. مرز سمت چپ که شعاع داخلی محاسبه می‌شود به عنوان آند و مرز سمت راست که شعاع خارجی محاسبه می‌شود به عنوان کاتد در نظر گرفته شده است. در مشبندی تعداد ۱۵۰۰۰ المان در هندسه متقان محوری ایجاد شده و به علت گرادیان بزرگتر سرعت و غلظت، مناطق نزدیک به دیواره الکتروودها دارای مشبندی ریزتری خواهند بود.

۲- واکنش‌های شیمیایی

الکتروولیز آب نمک شامل دو نیم واکنش در الکتروودها و یک واکنش کلی در الکتروولیت می‌باشد. نیم واکنش آند شامل آزادسازی کلر و نیم واکنش کاتد شامل آزادسازی هیدروژن است. شکستن پیوند نمک محلول در آب نیز در واکنش الکتروولیت رخ می‌دهد. مقدار هیپوکلریت سدیم تولید شده مستقیماً با مقدار جریان الکتریکی گزارنده شده از داخل الکتروولیت متناسب می‌باشد. فرآیند شیمیائی الکتروولیز آب نمک به صورت زیر می‌باشد [۲۹].

واکنش آند



در این مقاله تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی عملکرد الکتروولیز آب نمک شبیه‌سازی شده است که مطالعه آزمایشگاهی آن توسط همین گروه صورت گرفته است [۲۸]. جهت ارزیابی مدل، میدان جریان سیال در راکتور با مدل تحلیلی مقایسه شده و در ادامه نتایج شبیه‌سازی الکتروولیز آب شور^۱ با الکتروولیز الکترومغناطیسی آب شور^۲ مقایسه شده است. در نهایت نیز تأثیر پارامترهایی چون قطر الکتروود آند، ولتاژ و شوری محلول بر عملکرد الکتروولیز الکترومغناطیسی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز و مطابق با کار آزمایشگاهی همین گروه [۲۸] شبیه‌سازی شده است.

۲- ملاحظات شبیه‌سازی

۱- هندسه و شرایط مرزی

شبیه‌سازی حاضر بر روی یک هندسه متقان محوری مطابق با کار آزمایشگاهی [۲۸] انجام شده است که دارای طول ۵۰ میلیمتر، قطر خارجی ۳۶ میلیمتر و قطر داخلی ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلیمتر می‌باشد. مدل هندسی در نظر گرفته شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان جرمی ورودی با شوری اولیه معادل ۱۱۰، ۲۲۰، ۳۳۰ و ۴۴۰ مول بر متر مکعب به مدل

1 Electrolysis (EL)

2 Electromagnetic electrolysis reactor (EMER)

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla p + \nabla \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] + \vec{F} \quad (7)$$

که در آن ρ چگالی سیال، u بردار سرعت، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال و F نیروی حجمی است. در یک محلول یونی که در معرض میدان الکتریکی قرار دارد، انتقال ذرات باردار با سه مکانیزم مهاجرت (ناشی از گرادیان ولتاژ)، جابجایی (ناشی از جریان سیال) و نفوذ (ناشی از گرادیان غلظت) صورت می‌گیرد. در اثر مهاجرت، یونهای مثبت در راستای میدان الکتریکی و از پتانسیل مثبت به سمت پتانسیل منفی مهاجرت نموده و یونهای منفی مسیر معکوس را طی خواهند کرد. شار جرمی ذرات i اکتروولیت توسط معادله زیر نوشت پلانک بیان می‌شود [۳۱]:

$$\vec{N}_i = -D_i \nabla c_i - Z_i \mu_i c_i \nabla \Phi + \vec{u} c_i \quad (8)$$

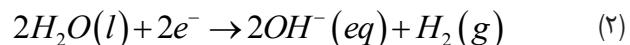
که در آن c_i غلظت، D_i ضریب نفوذ، μ_i مهاجرت یونی، Z_i عدد بار ذره i و Φ پتانسیل الکتریکی است. سه انتقال جرم نفوذ، مهاجرت یونی و جابجایی به ترتیب ترمهای اول، دوم و سوم معادله فوق هستند. همچنین معادله پیوستگی جرم ذره i عبارت است از:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{N}_i = 0 \quad (9)$$

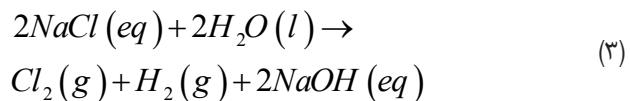
معادلات ماکسول روابط میان مقادیر اساسی امواج الکترومغناطیسی چون شدت میدان الکتریکی E ، چگالی شار الکتریکی یا جابجایی الکتریکی D ، شدت میدان مغناطیسی H ، چگالی شار مغناطیسی B ، چگالی جریان J و چگالی بار الکتریکی r را بیان می‌کنند. معادلات می‌توانند به صورت دیفرانسیل یا انتگرالی بیان شوند. برای میدان‌های عمومی متغیر با زمان، معادلات ماکسول می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند [۳۲]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (10)$$

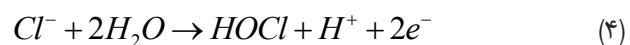
واکنش کاتد



واکنش کلی



تعادل ترمودینامیکی کلر در محلول بسیار پیچیده است و در صورتی که pH محلول کوچکتر از $7/46$ باشد، مشابه معادله (۴) اسید هیپوکلروس^۱ و اگر بزرگتر از مقدار مذکور باشد، مشابه معادله (۵) یون هیپوکلریت^۲ تشکیل می‌شود [۳۰]:



یونهای سدیم^۳، کلر^۴ و هیدروکسید^۵ به عنوان یونهای داخل جریان در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۳- فیزیک‌های مورد استفاده

آبنمک یک سیال تراکم‌ناپذیر نیوتونی است و جریان سیال در ورودی به صورت آرام در نظر گرفته می‌شود. معادلات پیوستگی و نویر استوکس برای تعادل جرم و مومنتوم سیال به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (6)$$

-
- | | |
|---|---------|
| 1 | $HOCl$ |
| 2 | ClO^- |
| 3 | Na^+ |
| 4 | Cl^- |
| 5 | OH^- |

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی برای شبیه‌سازی فرآیند الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی

Table 1. Physical parameters used in the simulation of EMER

عنوان	مقدار	واحد (یکا)
پتانسیل (ولتاژ)	۱۶-۱۰	V
ضریب نفوذ سدیم	$۲/۵ \times 10^{-۹}$	m^2/s
ضریب نفوذ کلر	$۲/۰ \times ۱۰^{-۹}$	m^2/s
دما	۲۹۸/۱۵	K
غلظت ورودی سدیم	۴۴۰-۱۱۰	mol/m^3
غلظت ورودی کلر	۴۴۰-۱۱۰	mol/m^3
طول کanal	۰.۰۵	m
شعاع آند	۱۰-۴	mm
شعاع کاتد	۱۸	mm

۲- روابط عددی

از نرم‌افزار کامسول^۱ برای حل معادلات حاکم استفاده شده است.

پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل در جدول ۱ ارائه شده‌اند که این مشخصات بر اساس مدل آزمایشگاهی و مشخصات فیزیکی یون‌های سدیم و کلر تعیین شده‌اند.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (12)$$

به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، میدان سرعت سیال شبیه‌سازی شده برای خروجی کanal در این مدل با حل تحلیلی [۳۳] مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی تطبیق نزدیکی با نتایج تحلیلی داشته است. لذا با توجه به دقیقت محاسبات میدان سرعت، پروفیل سرعت تحلیلی به عنوان سرعت ورودی کanal اعمال شده است. همچنین کاتورهای دوبعدی و سه‌بعدی میدان سرعت برای راکتور الکتروولیز آب‌نمک در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

معادله اساسی دیگر، معادله پایستگی بار الکتریکی است که عبارت است از:

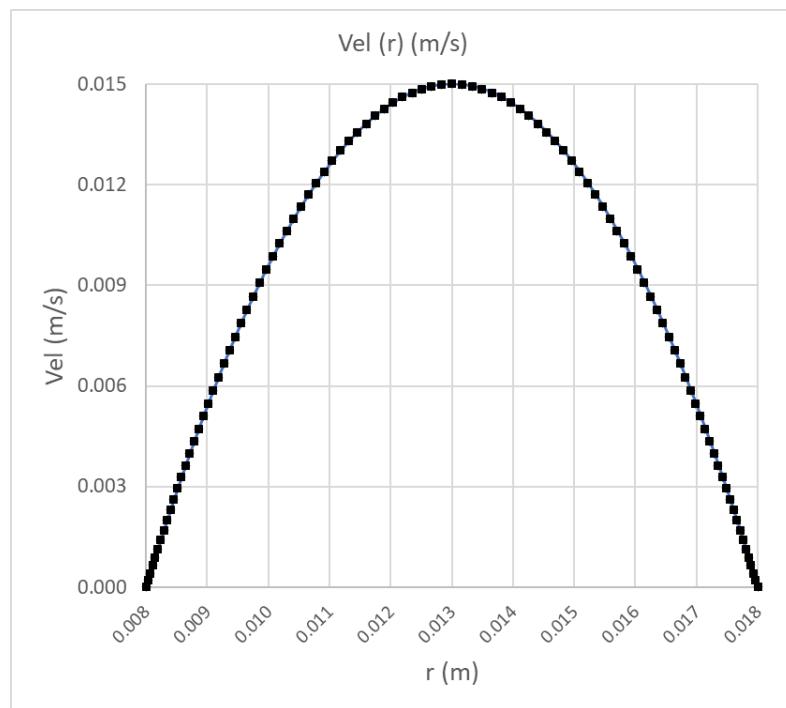
$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (14)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- تأثیر امواج الکترومغناطیسی

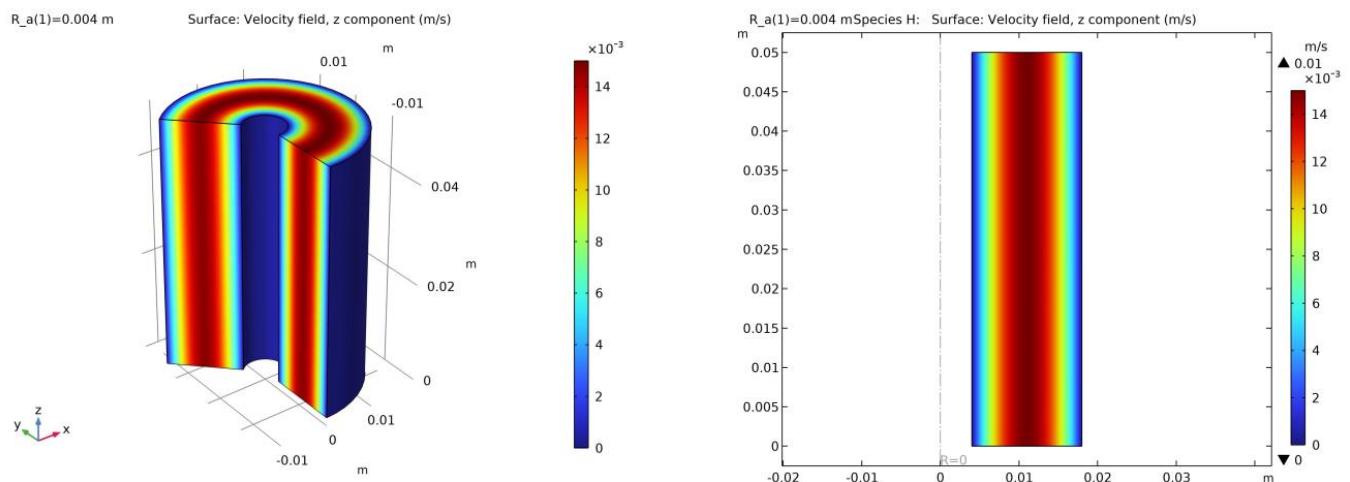
مقایسه غلظت یون‌های کلر و سدیم میان شبیه‌سازی الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی برای ولتاژ اعمالی ۱۶ ولت و قطر آند ۲۰ میلیمتر در شکل ۴ ارائه شده است. از نتایج شکل ملاحظه می‌شود که برای هر دو راکتور

از بین پنج معادله فوق، تنها سه معادله مستقل هستند. دو معادله اول به همراه معادله پایستگی بار الکتریکی یک سیستم مستقل را تشکیل می‌دهند.



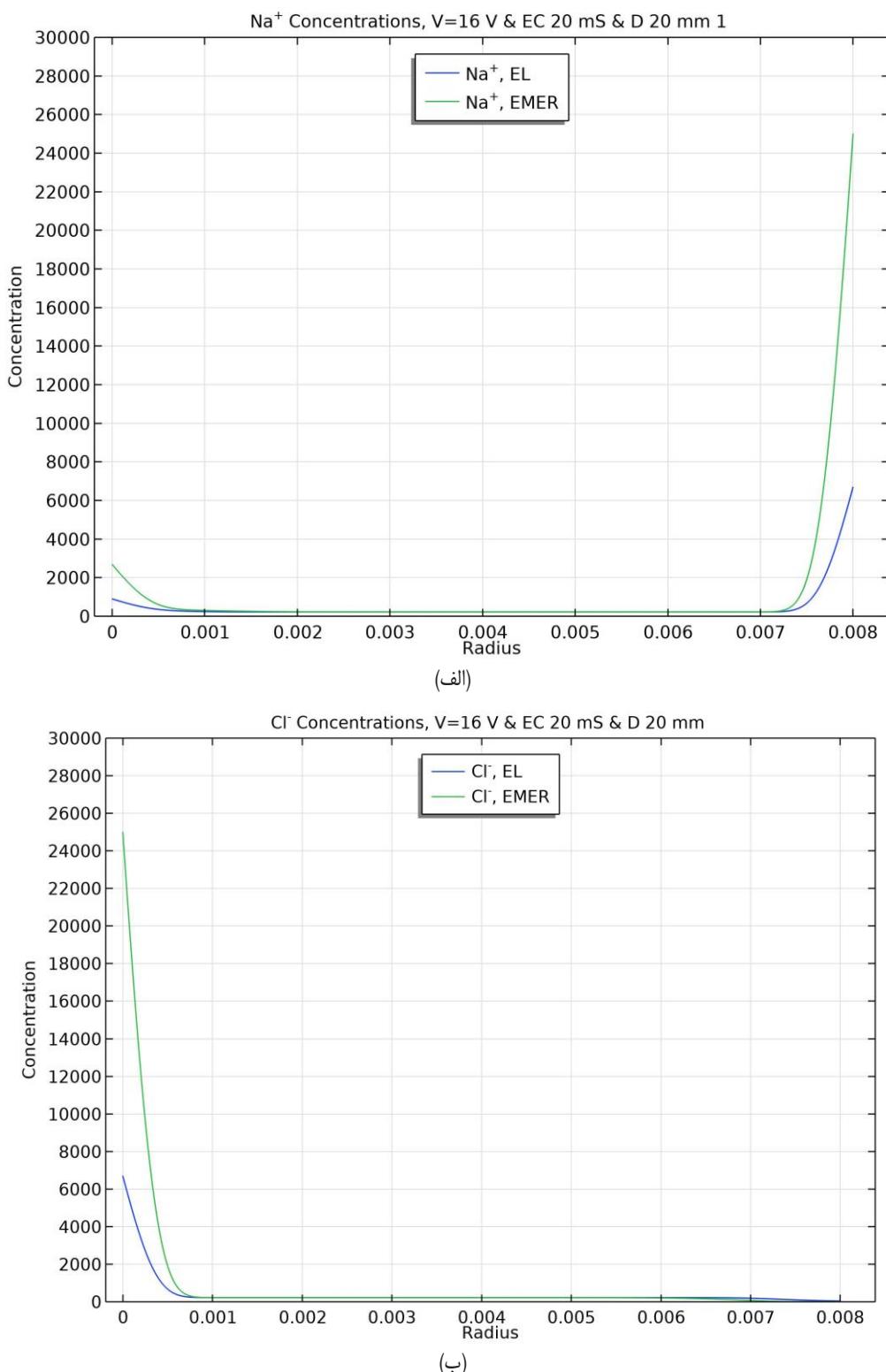
شکل ۲. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی میدان سرعت در کanal راکتور الکترولیز آب نمک

Fig. 2. Comparison between the numerical and analytical results of the axial velocity in the channel



شکل ۳. کانتورهای دو بعدی و سه بعدی میدان سرعت در کanal راکتور الکترولیز آب نمک

Fig. 3. 2D and 3D velocity contour of the saline water electrolysis reactor



شکل ۴. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در خط خروجی راکتورهای الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی

Fig. 4. Comparison of (a) Cl^- and (b) Na^+ concentrations at outlet between EL and EMER

۲۰ میلیمتر ادامه نمی‌یابد. کمترین میزان غلظت یون در نزدیکی الکتروودها و در شبیه‌سازی الکتروولیز الکترومغناطیسی برای قطر آند ۱۶ میلیمتر رخ می‌دهد. کاهش غلظت یون بر اثر افزایش قطر آند از ۸ تا ۱۶ میلیمتر به دلیل کاهش فاصله میان الکتروودها رخ می‌دهد و افزایش غلظت یون بر اثر افزایش قطر آند از ۱۶ تا ۲۰ میلیمتر به دلیل افزایش سطح موثر آند رخ می‌دهد. طبق نتایج، بیشترین و کمترین جداسازی یون‌ها در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی به ترتیب $43/1$ درصد برای قطر ۸ میلیمتر و $37/4$ درصد برای قطر ۱۶ میلیمتر بدست آمده است.

کانتور دو بعدی غلظت یونهای کلر در نزدیکی الکتروودها و برای شبیه‌سازی فرآیندهای الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی در شکل ۸ نشان داده شده است. اختلاف غلظت یون میان فرآیندهای الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی نیز در این کانتورها مشخص است که نشان دهنده تاثیر امواج الکترومغناطیس در بهبود فرآیند الکتروولیز می‌باشد. ملاحظه می‌شود که حداکثر یون جدا شده در فرآیند الکتروولیز مطابق با شکل ۶ و برابر با 7480 مول بر متر مکعب و حداکثر یون جدا شده در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی مطابق با شکل ۷ و برابر با 33800 مول بر متر مکعب می‌باشد. این نتایج حاکی از بهبود فرآیند جداسازی در حضور امواج الکترومغناطیس است.

۳-۳- تاثیر پتانسیل (ولتاژ) الکتروود

مقایسه‌ی توزیع غلظت یونهای کلر و سدیم فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی برای پتانسیل‌های آند مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش پتانسیل الکتروود آند، عملکرد فرآیند بهبود می‌یابد. با افزایش پتانسیل الکتروود، مهاجرت یونها به سمت الکتروودها افزایش یافته و غلظت یونها در نزدیکی الکتروود افزایش خواهد داشت. با افزایش پتانسیل الکتروودها از ۱۰ تا ۱۶ ولت، جداسازی یون‌ها بطور تقریباً خطی از $25/3$ تا $43/5$ درصد افزایش می‌یابد.

برای صحبت‌سنگی نتایج شبیه‌سازی، میزان جداسازی یون کلر در شبیه‌سازی با نتایج کار آزمایشگاهی [۲۸] در جدول ۲ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

۳-۴- تاثیر شوری محلول (غلظت الکتروولیت)

مقایسه‌ی توزیع غلظت یونهای کلر و سدیم فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی برای غلظت‌های مختلف الکتروولیت در شکل ۱۰ ارائه شده

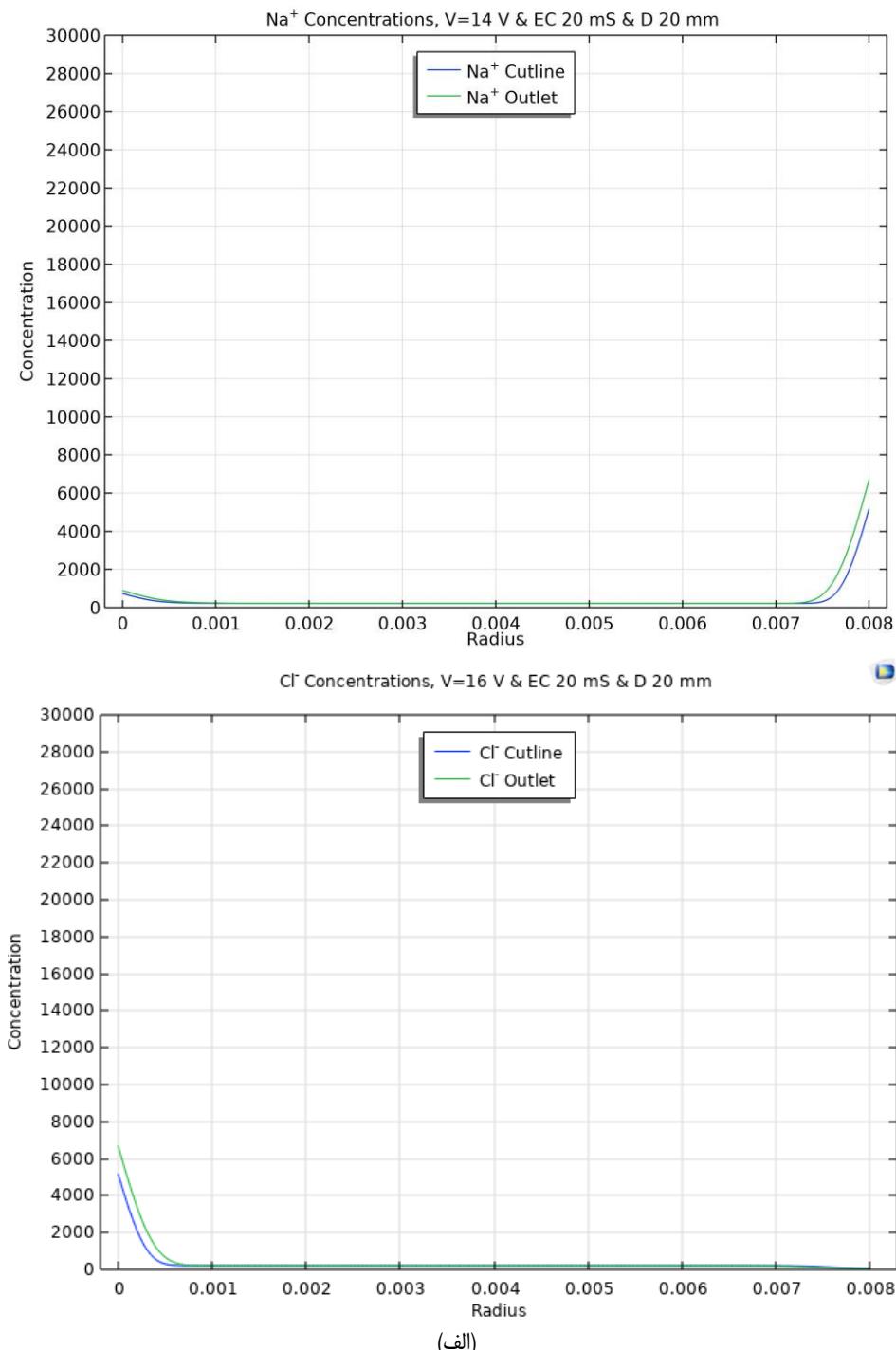
الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی، یون کلر بیشتر در سمت الکتروود آند و یون سدیم بیشتر در سمت الکتروود کاتد جمع شده‌اند. نتیجه مهم و قابل توجه دیگر اینکه میزان تجمع یون‌های کلر و سدیم (به ترتیب در الکتروودهای آند و کاتد) در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی بیشتر از فرآیند الکتروولیز است. لذا نتایج نشان می‌دهد که امواج الکترومغناطیسی فرآیند الکتروولیز را $12/4$ درصد تا $43/1$ درصد بهبود بخشیده است. اختلاف میان دو نمودار می‌تواند ناشی از کاهش انرژی مورد نیاز برای جداسازی یون‌ها و افزایش نرخ واکنش در حضور امواج الکترومغناطیس باشد. در حقیقت اثرات غیر حرارتی امواج الکترومغناطیس منجر به برهم‌کنش میان میدان‌های الکتریکی و مولکولهای قطبی الکتروولیت شده و از این طریق حرکت یون‌ها و مولکول‌ها در میدان الکتریکی ساده‌تر خواهد شد. این پدیده در نهایت منجر به جداسازی بهتر و بیشتر یون‌ها در حضور امواج الکترومغناطیسی خواهد شد.

همچنین پروفیل مقایسه‌ی توزیع غلظت یونهای کلر و سدیم برای خطوط میانه و خروجی راکتورهای الکتروولیز و الکتروولیز الکترومغناطیسی در شکل ۵ ارائه شده است. موقعیت خطوط میانه و خروجی در شکل ۱-ب قابل مشاهده می‌باشد. همچنان ملاحظه می‌شود که فرآیند الکتروولیز در حضور امواج الکترومغناطیس بهبود چشمگیری داشته است. نکته قابل تأمل دیگری که از مقایسه نتایج خط میانی و خروجی حاصل می‌شود این است که طول راکتور به مقدار مناسبی در نظر گرفته شده است و عمدۀ فرآیند در هر دو راکتور تا خط میانی شکل گرفته است.

۳-۲- تاثیر قطر الکتروود آند

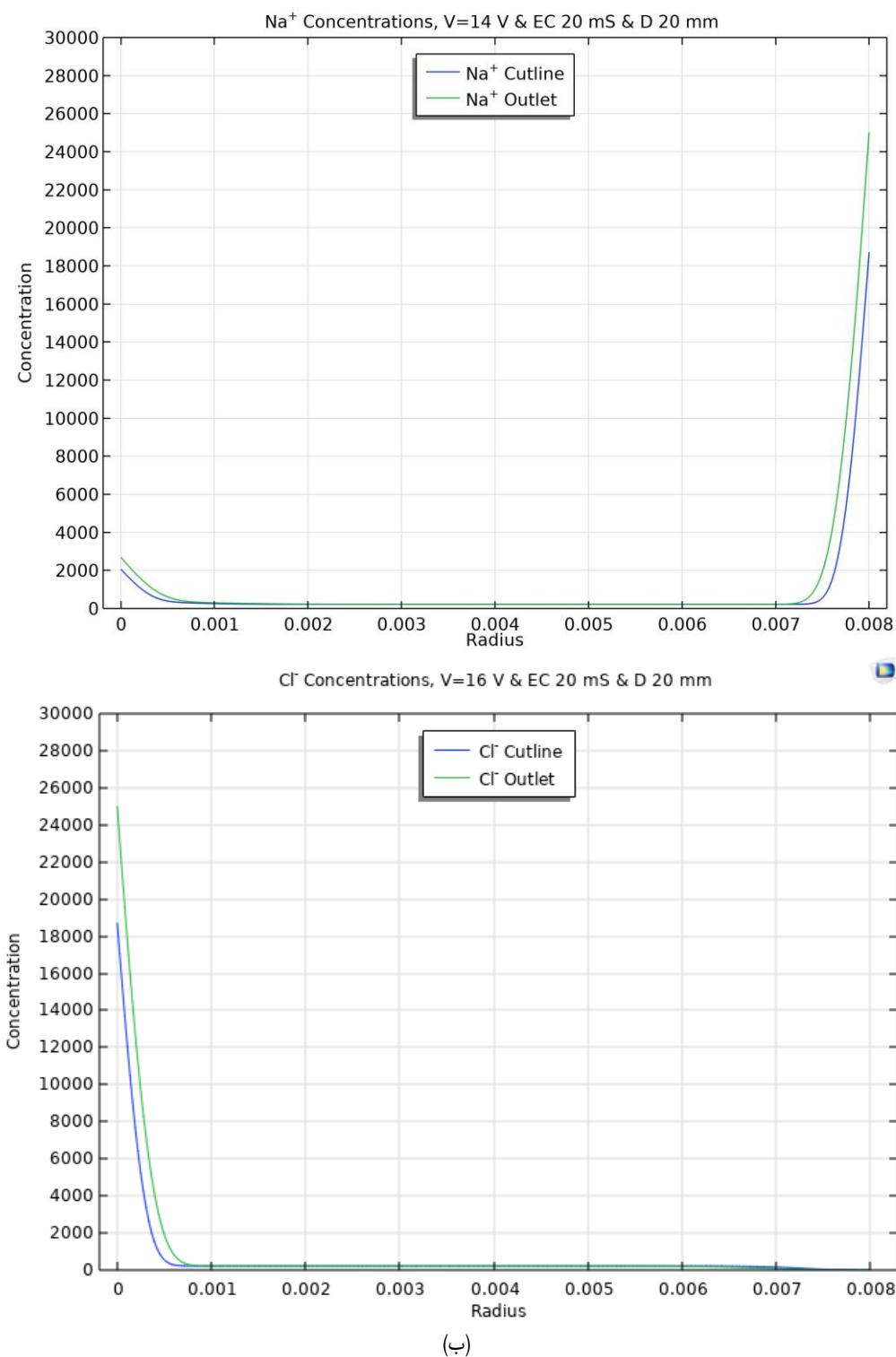
شکل ۶ غلظت یونهای سدیم و کلر برای چهار قطر مختلف آند و در فرآیند الکتروولیز را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش قطر آند از ۸ به 20 میلیمتر، فاصله میان الکتروودها از 14 به 8 میلیمتر کاهش یافته و میزان غلظت یون در نزدیکی الکتروود نیز کاهش می‌یابد و بهترین نتیجه برای قطر آند 8 میلیمتر (معادل فاصله 14 میلیمتری الکتروودها) حاصل می‌شود. با افزایش قطر الکتروود در فرآیند الکتروولیز، جداسازی یون‌ها از $12/4$ درصد برای قطر 8 میلیمتر تا $10/7$ درصد برای قطر 20 میلیمتر کاهش می‌یابد.

همچنین غلظت یونهای سدیم و کلر برای چهار قطر مختلف آند و در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی در شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش قطر آند از 8 تا 16 میلیمتر، غلظت یون در نزدیکی الکتروود کاهش می‌یابد ولی این روند کاهشی با افزایش قطر آند از 16 به



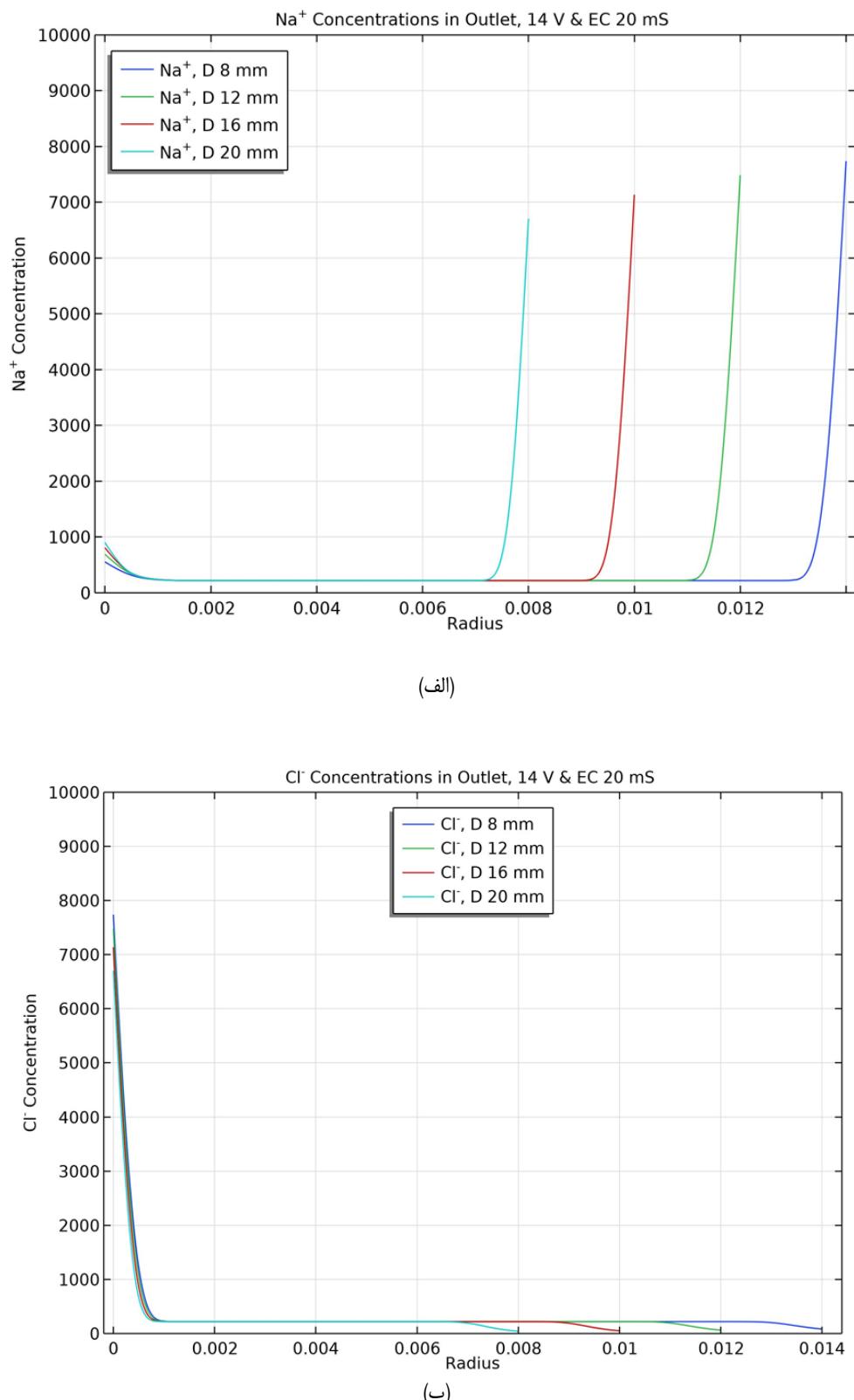
شکل ۵. مقایسه توزیع غلظت یونهای کلر و سدیم در خطوط میانه و خروجی (الف) الکتروولیز و (ب) الکترومغناطیسی (ادامه دارد)

Fig. 5. Comparison of Cl- and Na+ concentrations between cutline and outlet for (a) EL and (b) EMER(Continued)



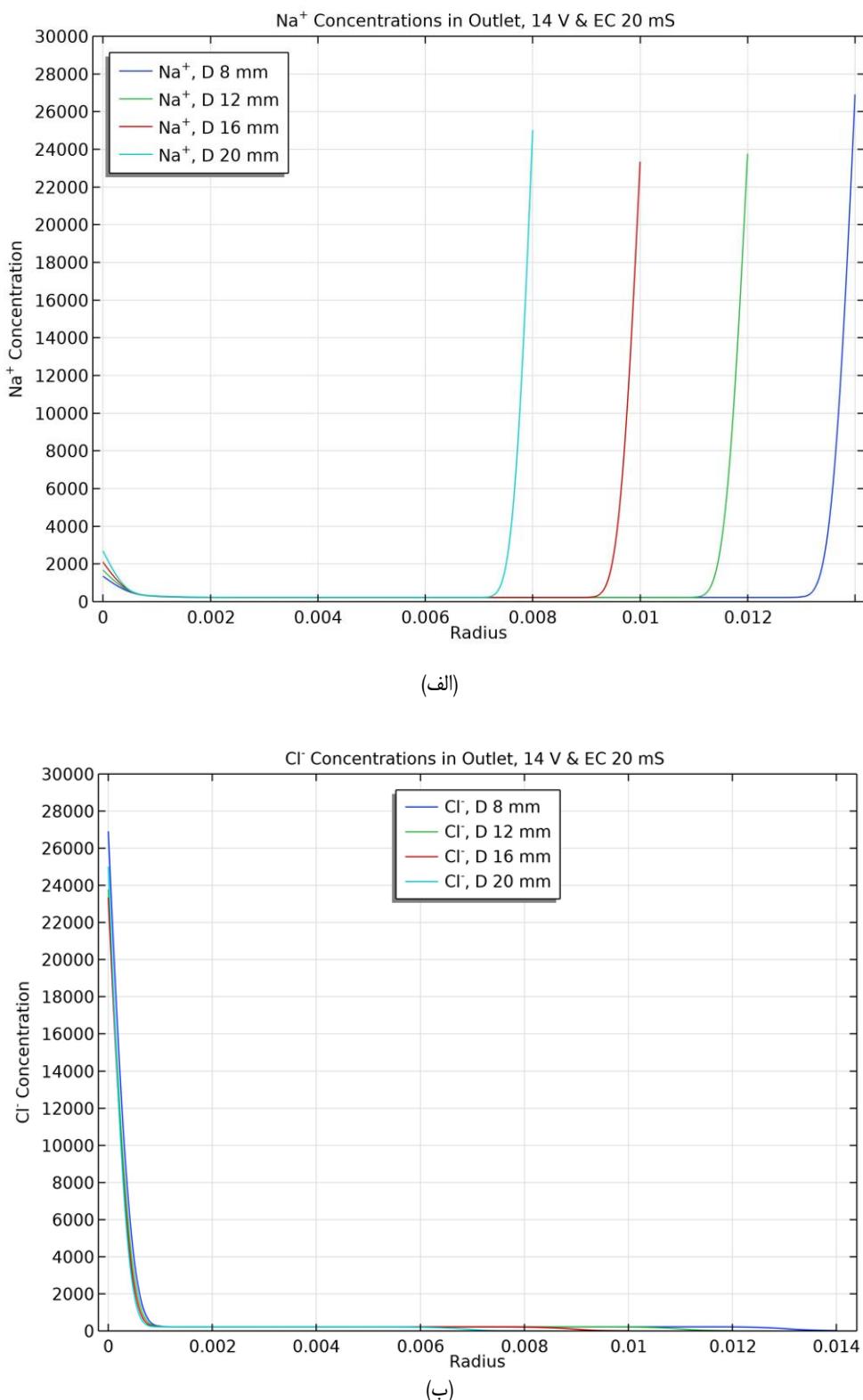
شکل ۵. مقایسه توزیع غلظت یونهای کلر و سدیم در خطوط میانه و خروجی (الف) الکتروولیز و (ب) الکتروولیز الکترومغناطیسی

Fig. 5. Comparison of Cl^- - and Na^+ concentrations between cutline and outlet for (a) EL and (b) EMER



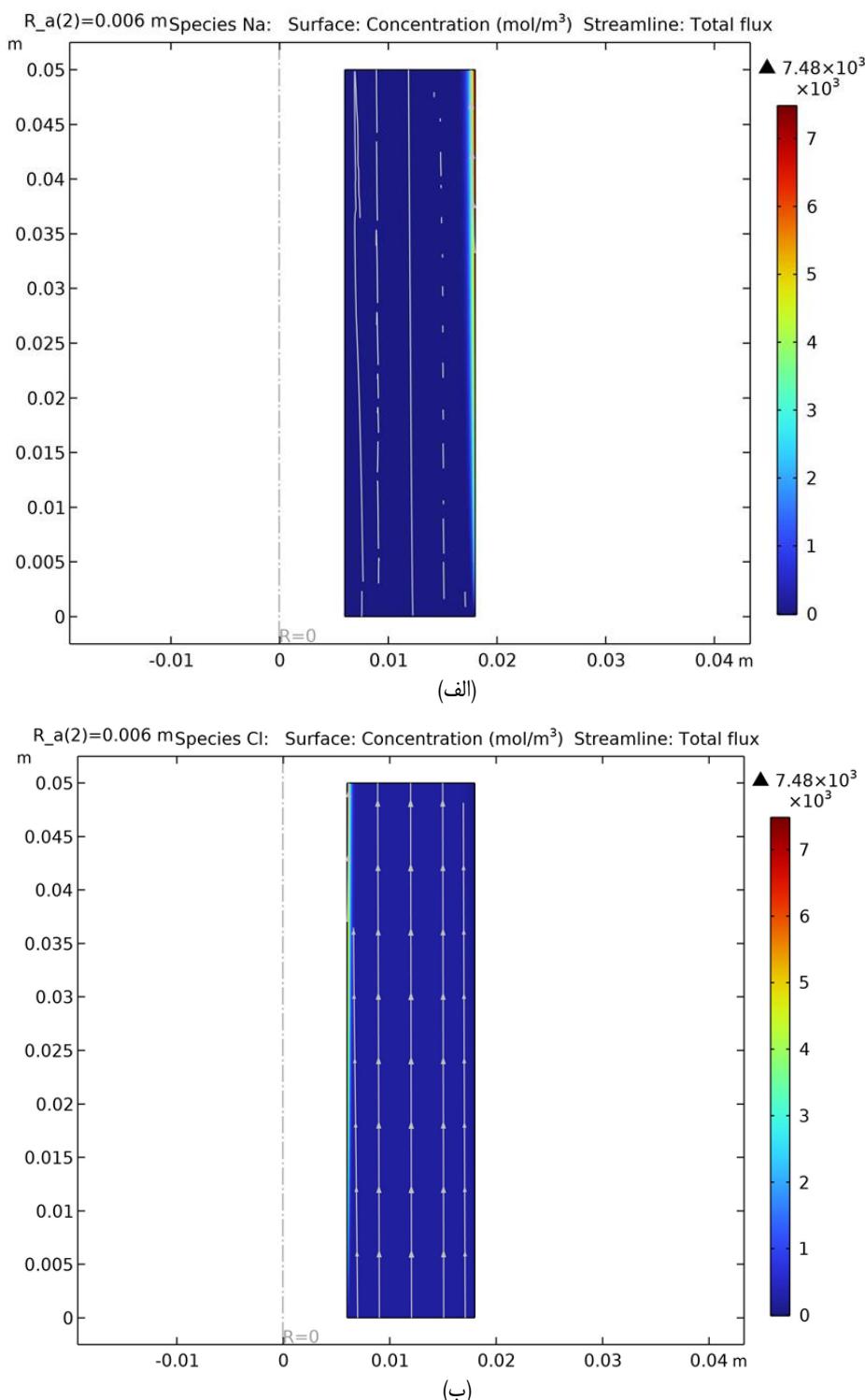
شکل ۶. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در فرآیند الکتروولیز برای قطرهای مختلف

Fig. 6. The (a) Cl^- and (b) Na^+ concentrations at the EL outlet and several electrode diameters



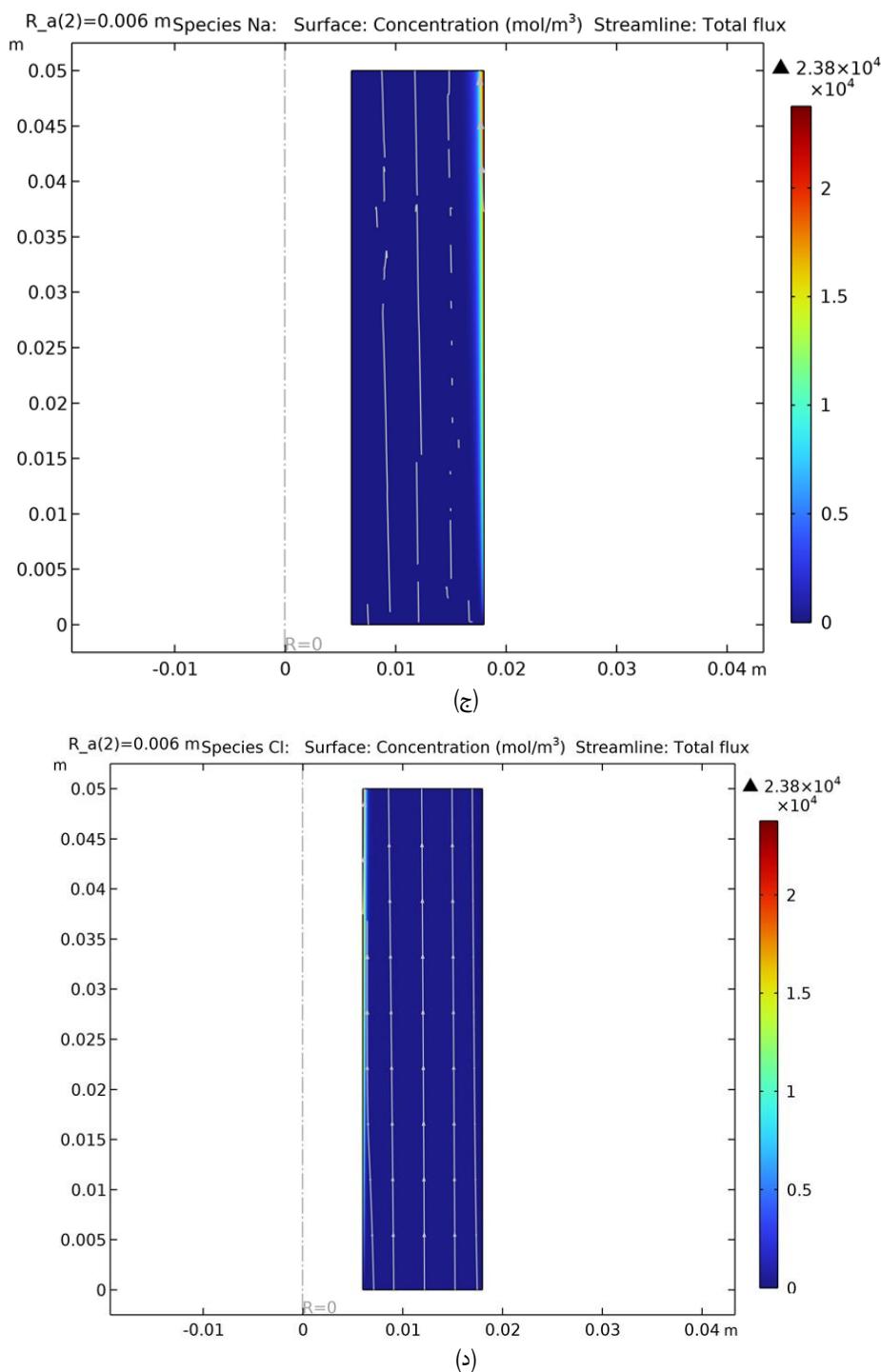
شکل ۷. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی برای قطرهای مختلف

Fig. 7. The (a) Cl^- - and (b) Na^+ concentrations at the EMER outlet and several electrode diameters



شکل ۸. مقایسه کانتورهای دوبعدی غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در الکتروولیز (ج) سدیم و (د) کلر در الکتروولیز الکترومغناطیسی و قطر ۱۲ میلیمتر (ادامه دارد)

Fig. 8. 2D ion concentration contours along the reactor for (a) Na⁺ in EL, (b) Cl⁻ in EL, (c) Na⁺ in EMER, and (d) Cl⁻ in EMER(Continued)



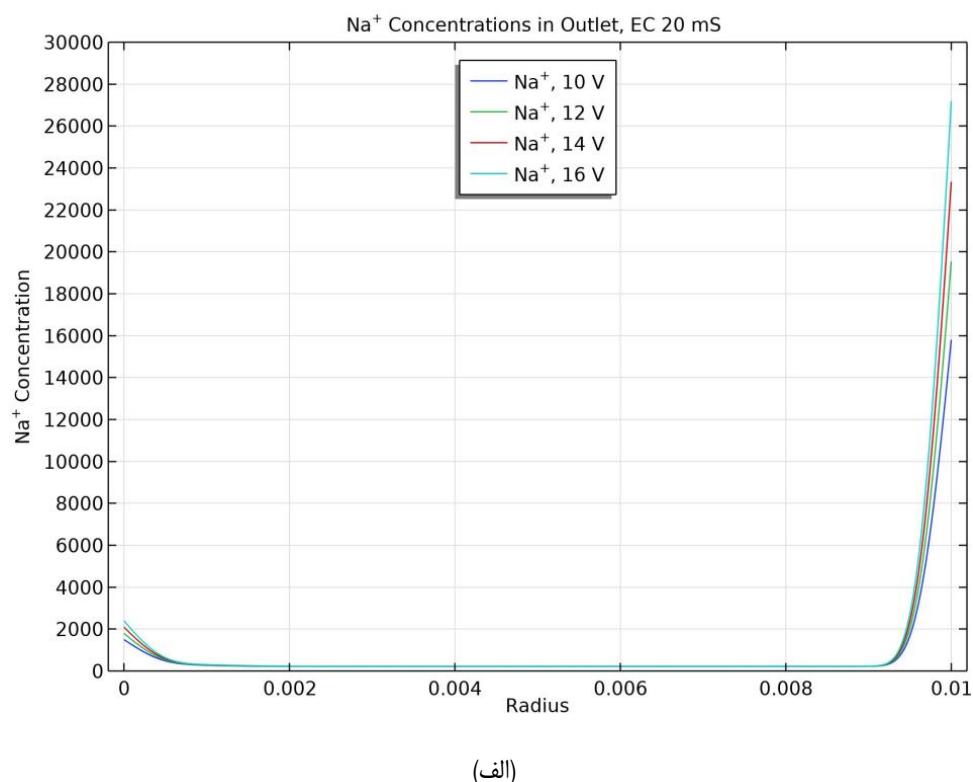
شکل ۸. مقایسه کانتورهای دوبعدی غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در الکتروولیز الکترومغناطیسی و قطر ۱۲ میلیمتر

Fig. 8. 2D ion concentration contours along the reactor for (a) Na^+ in EL, (b) Cl^- in EL, (c) Na^+ in EMER, and (d) Cl^- in EMER

جدول ۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج کار آزمایشگاهی [۲۸]

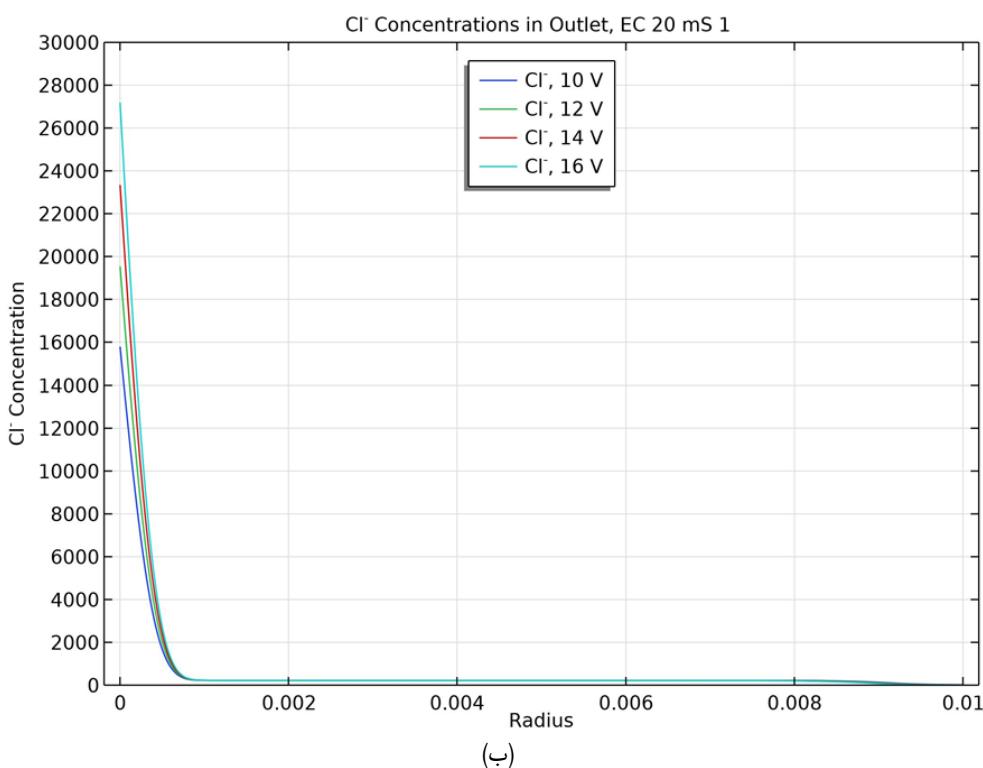
Table 2. The Cl- concentration comparison between simulations and experiments

ولتاژ اکترود [V]	جداسازی یون در کار آزمایشگاهی [%]	جداسازی یون در شبیه‌سازی [%]	میزان انحراف [%]
۱۰	۱۹/۵	۲۱/۵	۱۰/۲۶
۱۲	۲۹/۵	۳۱/۳	۶/۱۰
۱۴	۳۵/۵	۳۷/۴	۵/۳۵



شکل ۹. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در فرآیند الکتروولیز الکتروومغناطیسی برای پتانسیل‌های آند مختلف(ادامه دارد)

Fig. 9. The (a) Na⁺ and (b) Cl⁻ concentrations at the EMER outlet and several cell potentials(Continued)



شکل ۹. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در فرآیند الکتروولیز الکتروومغناطیسی برای پتانسیل‌های آند مختلف

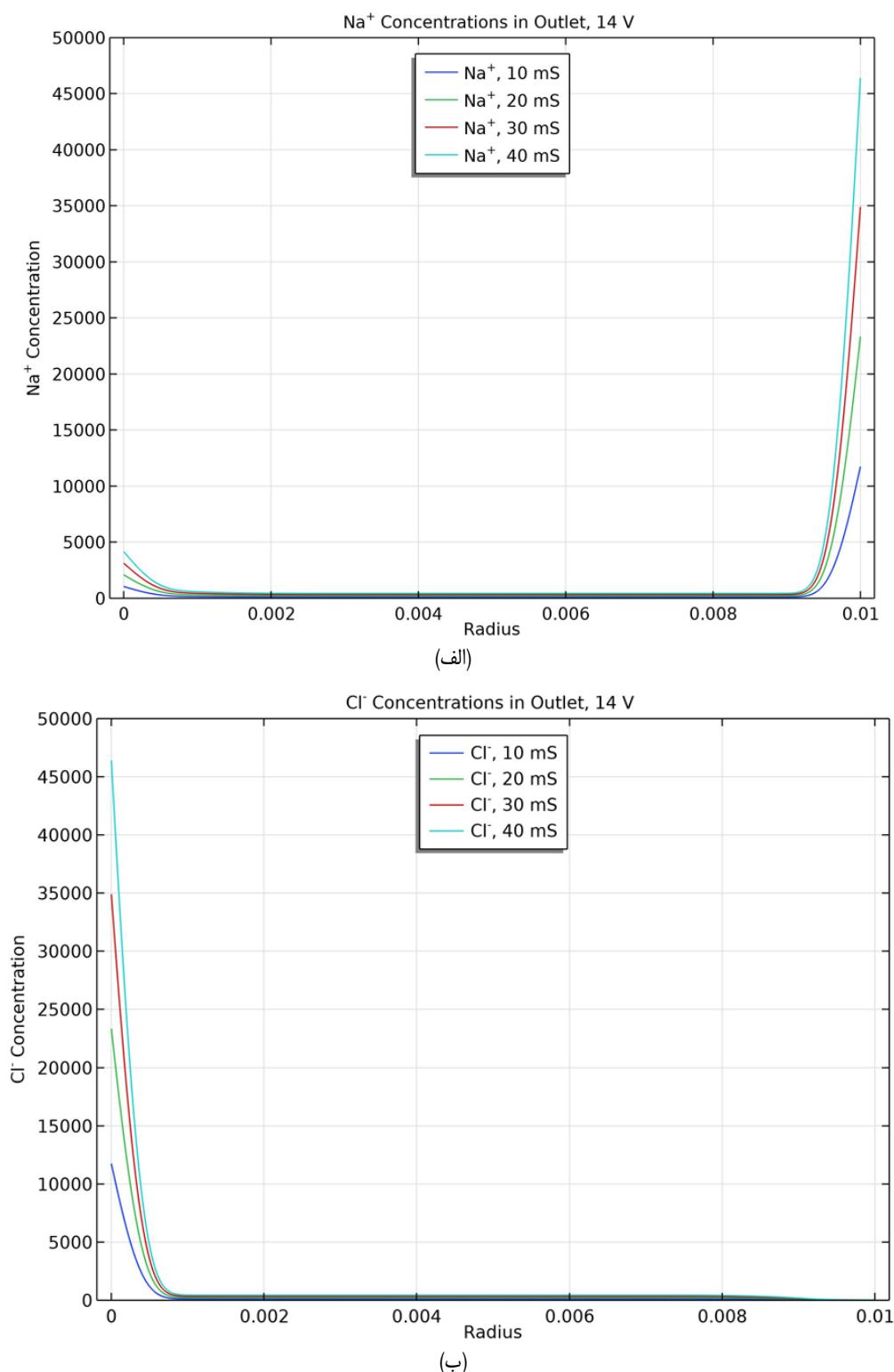
Fig. 9. The (a) Na⁺ and (b) Cl⁻ concentrations at the EMER outlet and several cell potentials

بررسی شده است. میزان جدایی یونها در فرآیند الکتروولیز الکتروومغناطیسی در مقایسه با الکتروولیز افزایش چشمگیری داشته است که ناشی از تاثیر امواج الکتروومغناطیسی در فرآیند الکتروولیز است. در شبیه‌سازی فرآیند الکتروولیز، افزایش قطر آند منجر به کاهش جدایی یونها و کاهش غلظت یونها در نزدیکی الکتروودها می‌شود. در حالی که برای الکتروولیز الکتروومغناطیسی با افزایش قطر آند از ۸ تا ۱۶ میلیمتر، جدایی یونها کاهش یافته و با افزایش قطر آند از ۱۶ تا ۲۰ میلیمتر، جدایی یونها افزایش می‌یابد. در نتیجه بیشترین جدایی یونها برای هر دو فرآیند در قطر ۸ میلیمتر رخ داده و کمترین جدایی یونها برای فرآیندهای الکتروولیز و الکتروومغناطیسی به ترتیب در قطرهای ۲۰ و ۱۶ میلیمتر رخ می‌دهد. میزان شوری المان محدود به صورت عددی شبیه‌سازی و نتایج آنها مقایسه شد. همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی چون قطر آند، پتانسیل الکتریکی محلول الکتروولیت نیز به صورت عددی

است. مشاهده می‌شود که افزایش غلظت الکتروولیت منجر به بهبود عملکرد فرآیند می‌شود. این امر به دلیل تأثیر افزایش هدایت الکتریکی محلول منجر به بهبود فرآیند شده و لذا غلظت یونها در نزدیکی الکتروودها افزایش خواهد یافت. با افزایش شوری محلول از ۱۰ تا ۴۰ میلیزیمنس، میزان جداسازی یون‌ها بطور خطی افزایش یافته و درصد جداسازی یون‌ها در محدوده ۳۷ درصد پایدار باقی می‌ماند.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله الکتروولیز و الکتروومغناطیسی آبنمک در یک هندسه متقاضی محوری بر مبنای روش المان محدود به صورت عددی شبیه‌سازی و نتایج آنها مقایسه شد. همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی چون قطر آند، پتانسیل الکتریکی محلول الکتروولیت نیز به صورت عددی



شکل ۱۰. مقایسه توزیع غلظت یونهای (الف) سدیم و (ب) کلر در فرآیند الکتروولیز الکترومغناطیسی برای غلظت‌های مختلف الکتروولیت

Fig. 10. The (a) Na^+ and (b) Cl^- concentrations at the EMER outlet and several salinities

۵- فهرست علائم

- [6] O. Ulleberg, Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, International Journal of Hydrogen Energy, 28(1) (2003) 21-33.
- [7] M. Kiaee, P. Chladek, D. Ineld, and A. Cruden, Utilisation of alkaline electrolyzers to improve power system frequency stability with a high penetration of wind power, IET Renewable Power Generation, 8(5) (2014) 529-536.
- [8] W. Jiang, Identification and Power Electronic Module Design of a Solar Powered Hydrogen Electrolyzer, IEEE Asia-Pacifc Power and Energy Engineering Conference, (2012) 1-4.
- [9] M. Kiaee, A. Cruden, D. Ineld, Y. Ma, T. G.Douglas, The impact on the electrical grid of hydrogen production from alkaline electrolyzers, IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC), 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, (2010) 1-6.
- [10] N. Gyawali and Y. Ohsawa, Integrating fuel cell/Electrolyzer/Ultracapacitor system into a stand-alone Microhydro plant, IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(4) (2010) 1092-1101.
- [11] W. Xu, J. Zhou, Y. Ou, Y. Luo, Z. You, Microwave selective effect: a new approach towards oxygen inhibition removal for highly-effective NO decomposition by microwave catalysis over BaMnxMg1xO3 mixed oxides at low temperature under excess oxygen, Chemical Communications, 51(19) (2015) 4073-4076.
- [12] W. Xu, J. Zhou, Z. You, Y. Luo, Y. Ou, Microwave irradiation coupled with physically mixed MeOx (Me=Mn, Ni) and Cu-ZSM-5 catalysts for the direct decomposition of nitric oxide under excess oxygen, ChemCatChem, 7(3) (2015) 450-458.
- [13] W. Xu, J. Zhou, Z. Su, Y. Ou, and Z. You, Microwave catalytic effect: a new exact reason for microwave-driven heterogeneous gas-phase catalytic reactions, Catalysis Science & Technology, 6(3) (2016) 698-702.
- [14] J. Zhou, W. Xu, Z. You, Z. Wang, Y. Luo, L. Gao, C. Yin, R. Peng, L. Lan, A new type of power energy for accelerating chemical reactions: the nature of a

T	چگالی شار مغناطیسی	B
mol/m ³	غلظت ذره i	c _i
C/m ²	چگالی شار الکتریکی	D
m ² /s	ضریب نفوذ ذره i	D _i
V/m	شدت میدان الکتریکی	E
A/m	شدت میدان مغناطیسی	H
A/m ²	چگالی جریان الکتریکی	J
Pa	فشار	p
C/m ²	چگالی بار الکتریکی	r
m/s	سرعت سیال	u
-	عدد بار ذره i	Z _i
Kg/m ³	چگالی سیال	ρ
Pa.s	ویسکوزیته دینامیکی	μ
m ² /v.s	نرخ مهاجرت یونی ذره i	μ _i
V	پتانسیل الکتریکی	Φ

منابع

- [1] United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). The United Nations World Water Development Report, (2014) (Water and Energy. Paris, UNESCO, 2014).
- [2] A. N. Mabrouk, H. E. S. Fath, Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF– MED desalination technology, desalination, 371 (2015) 115-125.
- [3] C.L. Yang, J. McGarrahan, Electrochemical coagulation for textile effluent decolorization, Journal of Hazardous Materials., 127 (1-3) (2005) 40-47.
- [4] E. Lacasa, E. Tsolaki, Z. Sbokou, M. A. Rodrigo, D. Mantzavinos, and E. Diamadopoulos, Electrochemical disinfection of simulated ballast water on conductive diamond electrodes, Chemical Engineering Journal, 223 (2013) 516-523.
- [5] P. Oliviera, C. Bourasseua, and B. Bouamamab, Low-temperature electrolysis system modelling: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, (2017) 280-300.

- Society, Dalton Transactions, 7 (1992) 1151-1155.
- [23] C. O. Kappe, D. Dallinger, and S. S. Murphree, Practical microwave synthesis for organic chemists, Wiley Online Library, (2009).
- [24] A. De la Hoz, A. Diaz-Ortiz, and A. Moreno, Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects, Chemical Society Reviews, 34(2) (2005) 164-178.
- [25] N. Ipek, N. Lior, and A. Eklund, "Improvement of the electrolytic metal pickling process by inter-electrode insulation," Ironmaking & steelmaking, 32(1) (2005) 87-96.
- [26] J. Lu, D. J. Li, L. L. Zhang, and Y.-X. Wang, Numerical simulation of salt water electrolysis in parallel-plate electrode channel under forced convection, Electrochimica Acta, 53(2) (2007) 768-776.
- [27] M. Qin and H. H. Bau, When MHD-based microfluidics is equivalent to pressure-driven flow, Microfluidics and nanofluidics, 10 (2011) 287-300.
- [28] A. Eghbali, M. R. Karafi, and M. H. Sadeghi, The Effects of Current Density, Cell Potential, Time, Salinity, Electrode Diameter, and Material on Microwave-Assisted Saline Water Electrolysis: An Experimental Study, Water Conservation Science and Engineering, 8(1) (2023) 13.
- [29] S. Jiang, Y. Liu, H. Qiu, C. Su, and Z. Shao, High selectivity electrocatalysts for oxygen evolution reaction and anti-chlorine corrosion strategies in seawater splitting, Catalysts, 12(3) (2022) 261.
- [30] G. Amikam, P. Nmingativ, and Y. Gendel, Chlorine-free alkaline seawater electrolysis for hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy, 43(13) (2018) 6504-6514.
- [31] P. Shukla, K. K. Singh, P. Tewari, and P. Gupta, Numerical simulation of flow electrolyzers: Effect of obstacles, Electrochimica Acta, 79 (2012) 57-66.
- [32] D. K. Cheng, Field and wave electromagnetics, Pearson Education India, (1989).
- [33] T. Abbasov, H. Bilgili, and A. Sarımeşeli Paçacı, Quasi-Newtonian Approach determination of velocity profile microwavedriving force for accelerating chemical reactions, Scientific reports 6(1), (2016) 25149.
- [15] W. Xu, J. Cai, J. Zhou, Y. Ou, W. Long, Z. You, Y. Luo, Highly-effective direct decomposition of NO through microwave catalysis over BaMeO₃ (Me=Mn, Co, Fe) mixed oxides at low temperature under excess oxygen, ChemCatChem, 8(2) (2016) 417-425.
- [16] W. Xu, X. Hu, M. Xiang, M. Luo, R. Peng, L. Lan, and J. Zhou, Highly effective direct decomposition of H₂S into H₂ and S by microwave catalysis over CoS-MoS₂/γ-Al₂O₃ microwave catalysts, Chemical Engineering Journal, 326 (2017) 1020-1029.
- [17] W. Xu, M. Luo, R. Peng, M. Xiang, X. Hu, L. Lan, J. Zhou, Highly effective microwave catalytic direct decomposition of H₂S into H₂ and S over MeS-based (Me = Ni, Co) microwave catalysts, Energy Conversion and Management, 149 (2017) 219-227.
- [18] N. Wang, P. Wang, Study and application status of microwave in organic wastewater treatment – a review, Chemical Engineering Journal, 283 (2016) 193-214.
- [19] Z. Liu, H. Meng, H. Zhang, J. Cao, K. Zhou, J. Lian, Highly efficient degradation of phenol wastewater by microwave induced H₂O₂-CuOx/GAC catalytic oxidation process, Separation and Purification Technology, 193 (2018) 49-57.
- [20] Y. Lei, X. Lin, H. Liao, New insights on microwave induced rapid degradation of methyl orange based on the joint reaction with acceleration effect between electron hopping and Fe²⁺ -H₂O₂ reaction of NiFeMnO₄ nanocomposites, Separation and Purification Technology, 192 (2018) 220-229.
- [21] G. Lv, X. Xing, L. Liao, P. An, H. Yin, L. Mei, Z. Li, Synthesis of birnessite with adjustable electron spin magnetic moments for the degradation of tetracycline under microwave induction, Chemical Engineering Journal, 326 (2017) 329-338.
- [22] D.R. Baghurst, and D.M.P.Mingos, A new reaction vessel for accelerated syntheses using microwave dielectric super-heating effects, Journal of the Chemical

for the fully developed axial power law fluid flow in concentric annuli, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 16(6) (2021) 2710.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Eghbali, M. R. Karafi, M. H. Sadeghi, Numerical Simulation of the saline water electrolysis process using electromagnetic waves , Amirkabir J. Mech Eng., 55(11) (2024) 1333-1352.

DOI: [10.22060/mej.2024.22277.7592](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22277.7592)

