

Technical Note

مقاله ترویجی (یادداشت فنی)

Controlling the Electrical Conductivity of Water by Changing the Design of the Plasma Reactor

کنترل هدایت الکتریکی آب با تغییر طراحی راکتور پلاسمایی

Fatemeh Baharlounezhad^{1*}, Mohammad Ali Mohammadi², Targol Naghibzadeh³, Mohammad Sadegh Zakerhamidi²

فاطمه بهارلونیژاد^{۱*}، محمدعلی محمدی^۲، ترگل نقیبزاده^۳
و محمدصادق ذاکر حمیدی^۲

1- Assistant Professor, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۱- استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

2- Professor, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۲- استاد دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

3- MSc, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* Corresponding Author, Email: f.baharlou@tabrizu.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: f.baharlou@tabrizu.ac.ir

Received: 12/12/2023

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

Revised: 14/05/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

Accepted: 25/05/2024

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Many methods and technologies including atmospheric cold plasma are being developed to control and modify water components such as electrical conductivity (EC) in order to manage and use water optimally. With this approach, plasma reactors were designed to control water electrical conductivity using oxygen atmospheric pressure discharge on the water surface. The results of measuring EC changes, after plasma exerting compared to before plasma by changing the reactor's design and the plasma interaction time with the water surface at 1-10 min during 1 min intervals showed that electrical conductivity decreased on the anode side of the anodic and cathodic plasmas in the two-vessel reactor in the short time of 1 min. In the following, the process changed and EC enhanced by increasing plasma exerting. In the single-vessel reactor, from 1-10 min, EC change was increasing, which was more in the cathodic plasma than the anodic plasma. In the two-vessel reactor of anodic plasma, the increase of changes was higher on the anode side than on the cathode side to 3 min and then reversed. In the two-vessel reactor of cathodic plasma, the increase of changes was higher on the cathode side than the anode side to 7 min and then reversed.

روش‌ها و فناوری‌های بسیاری برای کنترل و یا اصلاح مؤلفه‌های آب هم‌چون هدایت الکتریکی (EC) با هدف مدیریت و استفاده بهینه از آن از جمله پلاسمای سرد اتمسفری در حال توسعه هستند. با این رویکرد، راکتورهای پلاسمایی، برای کنترل هدایت الکتریکی آب با استفاده از تخلیه تابان فشار اتمسفری گاز اکسیژن بر روی سطح آب طراحی شدند. با تغییر طراحی راکتور پلاسمایی و برهمکنش پلاسمای با سطح آب در مدت‌زمان ۱ تا ۱۰ دقیقه در بازه‌های زمانی ۱ min، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات EC پس از اعمال پلاسمای در مقایسه با حالت قبل از اعمال نشان داد که هدایت الکتریکی در مدت‌زمان کوتاه ۱ min در سمت آند پلاسمای آندی و کاتدی در راکتور دو ظرف با افت مواجه شد. در ادامه با افزایش زمان اعمال پلاسمای، روند تغییر کرده و EC افزایش یافت. در راکتور تک‌ظرف از ۱ تا ۱۰ دقیقه، تغییر EC به‌صورت افزایشی مشاهده شد که برای پلاسمای کاتدی بیش از پلاسمای آندی بود. در راکتور دو ظرف پلاسمای آندی، افزایش تغییرات تا زمان ۳ min در سمت آند بیش از کاتد و در ادامه معکوس بود. در راکتور دو ظرف پلاسمای کاتدی، افزایش تغییرات تا زمان ۷ min در سمت کاتد بیش از آند و در ادامه معکوس بود.

Keywords: Water, Plasma, Reactor, Electrical conductivity.

کلمات کلیدی: آب، پلاسمای، راکتور، هدایت الکتریکی.

پلاسماهای فشار اتمسفری غیرحرارتی نیز برای انواع کاربردهای صنعتی و پزشکی هم‌چون ضدعفونی، درمان سلول‌های سرطانی، تولید ازن، تصفیه آب و فاضلاب، حذف ترکیبات آلی فرار و اصلاح سطح پلیمری به‌منظور بهبود خواصی همانند ترشوندگی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (D'Angola et al., 2022).

برهمکنش پلاسمای با مایعات، یک حوزه تمرکز با اهمیت در زمینه فناوری پلاسمای به‌شمار می‌آید. سطح مشترک برهمکنش پلاسمای با مایعات، یک محیط فوق‌العاده فعال و واکنش‌پذیر با مقیاس‌های متعددی از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی است که توسط الکترون‌ها، یون‌های اتمی و مولکولی، شبه پایدارها، فوتون‌ها، نور فرابنفش و رادیکال‌های تولیدی توسط پلاسمای ایجاد می‌شود. انتقال این گونه‌ها به محلول می‌تواند یون‌ها و مولکول‌های محلول جدیدی تولید کند و طیف وسیعی از فرآیندهای شیمیایی را در فاز مایع القا نماید (Kim and Kim, 2021). این سطح مشترک، قابل مقایسه با سیستم‌های الکتروشیمیایی معمول با الکتروود جامد در داخل مایع است (Rumbach and Go, 2017). با توجه به این قابلیت در برهمکنش پلاسمای با مایعات، با طراحی چهار نوع راکتور پلاسمای سرد اتمسفری گاز اکسیژن، چگونگی تغییرات هدایت الکتریکی آب در طی برهمکنش با پلاسمای اکسیژن برای مدت‌زمان ۱-۱۰ دقیقه در بازه‌های زمانی ۱ min مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

شکل ۱، راکتورهای آزمایشی مورد استفاده برای برهمکنش هر یک از پلاسماهای آندی و کاتدی با آب را با دو طراحی متفاوت نشان می‌دهد. پلاسماهای تولیدی مابین سطح آب و نوک الکتروودهای آند و کاتد به‌عنوان پلاسماهای به‌ترتیب آندی و کاتدی معرفی می‌شوند. طراحی راکتورها به دو صورت تک ظرف پیرکس در قسمت (الف) و دو ظرف مجزای پیرکس با یک لوله رابط در قسمت (ب) انجام شد. ظروف به حجم ۲۰۰ mL از آب مقطر پر شدند.

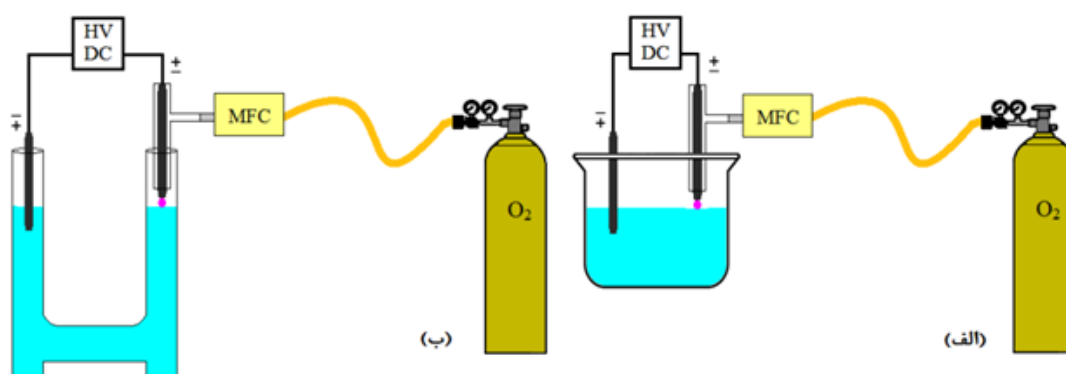
مشخصات آب مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است. از دو میله تنگستنی به قطر ۲ mm به‌عنوان الکتروود استفاده شد. در طول آزمایش یکی از الکتروودها در داخل آب قرار گرفت. الکتروود دیگر بیرون از مایع، به‌گونه‌ای داخل لوله‌ای از جنس پیرکس تعبیه شد که انتهای آن به اندازه ۰/۵ cm بیرون از لوله و به اندازه ۰/۵ cm بالاتر از سطح آب قرار گرفت. گاز اکسیژن با دبی sccm ۵۰ از قسمت بالایی لوله پیرکس جریان یافت و پلاسمای با اعمال

هدایت الکتریکی یک شاخص غلظت نمک و نشانگر غلظت الکتروولیت محلول است (Ding et al., 2018). مؤلفه هدایت الکتریکی که ارتباط نزدیکی با تعداد کل آنیون‌ها یا کاتیون‌های محلول دارد و به‌طور معمول متناسب با مقدار کل جامدات محلول است، به‌عنوان معیاری برای قابلیت گذردهی الکتروسیسته محلول آبی ارائه می‌شود. هدایت الکتریکی محلول آبی، به‌عنوان عاملی مهم شناخته شده است که می‌تواند در برهمکنش با پلاسمای، بر خصوصیات تخلیه الکتریکی و تشکیل گونه‌های فعال تأثیرگذار باشد، که بیشتر برای محاسبه غلظت کلی اجزای آب یونیزه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hamdan et al., 2020). هدایت الکتریکی آب، اغلب در طول زمان دچار تغییر نمی‌شود، در نتیجه، هرگونه تغییر در هدایت آب ممکن است نشانه‌ای از آلودگی بالقوه، ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی در آب باشد. هدایت الکتریکی آب می‌تواند تحت تأثیر دما (T) و جامدات محلول معدنی نیز قرار گیرد (Mandal et al., 2014).

پلاسمای به‌عنوان سیستم‌های گازی شبه خنثی چند ذره‌ای با بار کل صفر تعریف می‌شوند که شامل غلظت کافی از الکترون‌های آزاد، یون‌های مثبت و منفی، گونه‌ها و رادیکال‌های برانگیخته در مخلوط با سایر خنثی‌ها از جمله اتم‌ها و مولکول‌ها هستند که به‌دلیل وجود ذرات باردار آزاد، رسانای الکتریکی هستند. پلاسمای می‌توانند در محدوده بسیار وسیعی از دما و فشار وجود داشته باشند. پلاسمای را می‌توان در فشار اتمسفر یا پایین‌تر، با جفت‌کردن انرژی به یک محیط گازی به روش‌های مختلفی از جمله مکانیکی، حرارتی، شیمیایی، تشعشعی، هسته‌ای، اعمال ولتاژ، تزریق امواج الکترومغناطیسی و یا با ترکیبی از این روش‌ها برای تفکیک مولکول‌های جزء گازی به مجموعه‌ای از یون‌ها، الکترون‌ها، مولکول‌های گاز خنثی و سایر گونه‌ها تولید کرد (Vijay et al., 2008). یکی دیگر از طبقه‌بندی‌های معمول سیستم‌های پلاسمای، به‌صورت پلاسمای حرارتی و غیر حرارتی (سرد) است که در پلاسماهای سرد دمای گونه‌های مختلف پلاسمای یکسان نیستند (Meichsner et al., 2013). بر این اساس، امروزه راکتورهای پلاسمایی متنوعی متناسب با نیازهای موجود طراحی می‌شوند که هر یک در جایگاه خود می‌تواند نقش مؤثری را در صنایع مختلف ایفا نمایند. فناوری پلاسمای حرارتی در دهه‌های گذشته به‌دلیل توجه روزافزون در زمینه‌هایی از جمله هوافضا، میکروالکترونیک، سنتز، تصفیه مواد زائد، برشکاری، جوشکاری و پاشش تکامل یافته‌اند. اخیراً،

شرکت تکسان انجام شد. اندازه‌گیری کل جامدات محلول (TDS) و EC هر نمونه با TDS متر و EC متر رومیژی (cond7310) شرکت هانا و pH و WTW هر نمونه با pH متر (HI2002) شرکت هانا صورت گرفت. اندازه‌گیری سختی آب با کیت سختی‌سنج آب شرکت واهب انجام شد. کدورت آب با کدورت سنج (2020We) شرکت لاموت تعیین شد.

یک اختلاف پتانسیل بالا، 8 Kv، توسط یک منبع تغذیه DC مابین نوک الکتروود و سطح آب تولید شد. فرآیند تخلیه الکتریکی توسط گاز اکسیژن برای هر راکتور در دو حالت پلاسمای آندی و کاتدی برای زمان‌های 1-10 دقیقه در بازه‌های زمانی 1 min انجام شد. طیف‌سنجی گسیلی پلاسمای اکسیژن برای تعیین دما و چگالی پلازما توسط طیف سنج (TIDA (UCS-G400) ساخت



شکل ۱- چیدمان راکتورهای آزمایشی: الف) تک ظرف؛ و ب) دو ظرف مجزای مرتبط با یک لوله رابط

جدول ۱- مشخصات آب پرکننده راکتور

شاخص	pH	هدایت الکتریکی EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	کل جامدات محلول TDS (ppm)	کدورت Turb (NTU)	سختی TH (ppm/ CaCO_3)
مقدار	۶/۷۵	۳۱	۱۵	.	.

۳- نتایج و بحث

که I_{ij} و λ_{ij} : به ترتیب شدت و طول موج مربوط به انتقال از تراز i به j برحسب (nm)، g_j : وزن آماری حالت مربوطه، A_{ji} : احتمال انتقال برحسب (s^{-1})، E_j : انرژی تراز بالاتر برحسب (eV)، k_B : ثابت بولتزمن ($1 \text{ kB} = 0.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$)، $T(K)$: دما و C : مقدار ثابتی هستند. داده‌های اتمی خطوط طیفی (O I) در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

۳-۱- تعیین دما و چگالی پلازما

برای تعیین دمای پلازما، از روش استاندارد نمودار بولتزمن استفاده شد. رابطه (۱)، رابطه مورد نظر برای رسم نمودار بولتزمن است (Baharlounezhad et al., 2023).

$$\ln \frac{I_{ji} \lambda_{ji}}{A_{ji} g_j} = -\frac{E_j}{k_B T} + C \quad (1)$$

جدول ۲- داده‌های اتمی خطوط انتخابی (O I) (Wiese et al., 1996)

طول موج (nm)	احتمال انتقال $\times 10^8$ $A_{ji} (\text{s}^{-1})$	وزن آماری (g)	انرژی تراز بالاتر E_j (eV)	
۱۱۳۱/۶۵۱	۲/۳۸	۳	۱۱/۹۳۰۲۸۷	O I
۹۲۶/۰۹۴	۱/۵۶	۵	۱۲/۰۷۸۵۴۵	
۹۲۰/۴۹	۱/۶۶	۷	۱۲/۰۸۶۹۳۹	
۳۹۵/۳۴۸۶	۳/۰۹	۹	۱۴/۱۲۳۷۰۲	

FWHM در پهن‌شدگی استارک برای تعیین چگالی الکترون n_e است (Baharlounezhad et al., 2023).

پهن‌شدگی استارک خط طیفی بالمر هیدروژن $H\beta$ برای اندازه‌گیری چگالی الکترون با تجزیه و تحلیل عرض کامل در نیم‌بیشینه (FWHM) مورد استفاده قرار گرفت. رابطه (۲) مربوط به

که $T=300\text{ K}$ و $P=1\text{ atm}$ دمای گاز به تقریب هستند.

پهن‌شدگی لورنتس را می‌توان از طریق برازش طیف‌های آزمایشی با نمایه ویت یافت که از طریق برهم‌نهی پهن‌شدگی‌های لورنتزی و گاوسی حاصل می‌شود. شکل ۲-الف نمونه نمودار بولتزنم خطوط طیفی (O I) برای محاسبه دمای الکترون از طیف‌سنجی گسیلی پلاسمای اکسیژن در ولتاژ ۸ kV را نشان می‌دهد. دمای پلاسمای سرد فشاری اتمسفری اکسیژن در تخلیه تابان برابر با 0.98 eV محاسبه شد. شکل ۲-ب نیز برازش معمول تابع ویت نمایه تجربی $H\beta$ را در ولتاژ ۸ kV نمایش می‌دهد. چگالی پلاسمای سرد فشاری اتمسفری اکسیژن در تخلیه تابان برابر با $1.021 \times 10^{21}\text{ m}^{-3}$ به دست آمد.

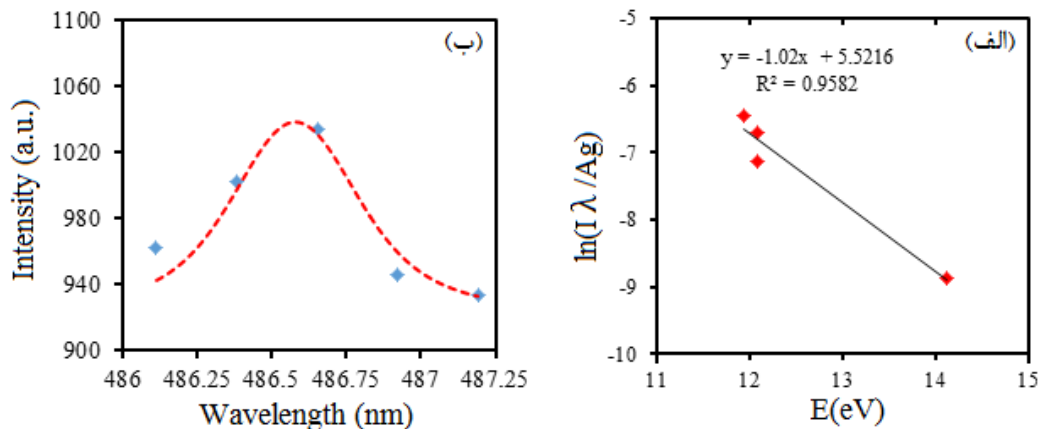
$$\Delta\lambda_{stark} = 4.8(\text{nm}) \times \left(\frac{n_e}{10^{23}(\text{m}^{-3})}\right)^{0.68116} \quad (2)$$

که n_e در واحد (m^{-3}) محاسبه شد. پهن‌شدگی استارک $\Delta\lambda_{stark}(\text{nm})$ از طریق رابطه (۳) به پهن‌شدگی لورنتس $\Delta\lambda_{Lorentz}(\text{nm})$ و وان‌در والس $\Delta\lambda_{Vander Waals}(\text{nm})$ مربوط می‌شود (Baharlounezhad et al., 2023).

$$\Delta\lambda_{Lorentz} = \Delta\lambda_{stark} + \Delta\lambda_{Vander Waals} \quad (3)$$

پهن‌شدگی وان‌در والس توسط رابطه (۴) تعیین می‌شود که $T=300\text{ K}$ و $P=1\text{ atm}$ دمای گاز به تقریب هستند.

$$\Delta\lambda_{Vander Waals} = (3.6) \left(\frac{P}{Tg^{0.7}}\right) \quad (4)$$

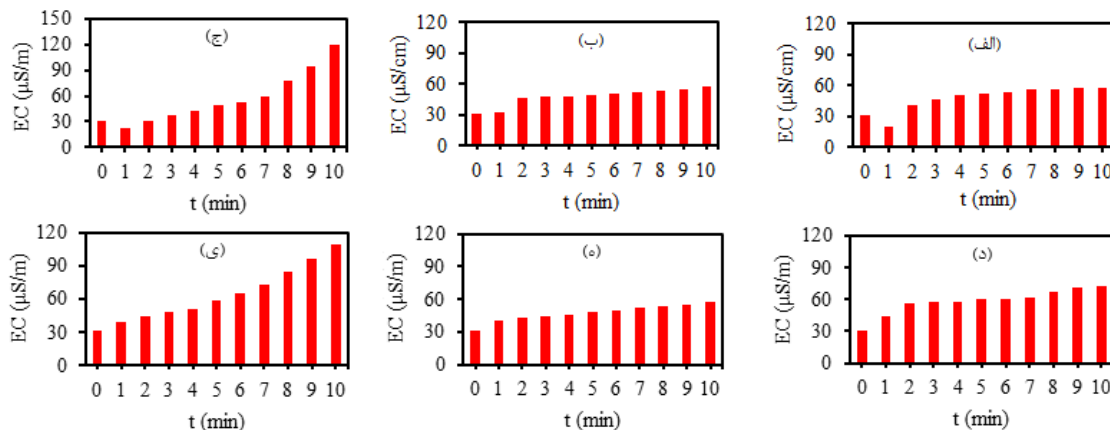


شکل ۲-الف نمودار بولتزنم حاصل از خطوط طیفی (O I) در ولتاژ ۸kV و (ب) برازش معمول تابع ویت نمایه تجربی $H\beta$ حاصل از خطوط طیفی (O I) در ولتاژ ۸ Kv

۳-۲- بررسی هدایت الکتریکی

شکل ۳ نمایش داده شده است. این تغییرات در طراحی تک‌طرف برای آب موجود در تک‌طرف و در طراحی دو طرف برای آب موجود در هریک از قسمت‌های آند و کاتد به‌طور مجزا اندازه‌گیری شدند.

تغییرات هدایت الکتریکی برای پلاسمای آندی و کاتدی در طراحی‌های تک طرف و دو طرف برای زمان‌های ۱-۱۰ دقیقه نسبت به زمان قبل از اعمال پلاسمای در بازه‌های زمانی ۱ min، در



شکل ۳- تغییرات هدایت الکتریکی آب پس از برهم‌کنش با پلاسمای اکسیژن برای راکتورهای دو طرف مجزا: (الف) آند پلاسمای آندی؛ (ب) کاتد پلاسمای آندی؛ (ج) آند پلاسمای کاتدی؛ (د) کاتد پلاسمای کاتدی و تک‌طرف؛ (ه) پلاسمای آندی؛ (ی) پلاسمای کاتدی برای زمان‌های ۱-۱۰ دقیقه.

یون‌های نیتريت (NO_2^-)، نیترات (NO_3^-)، آمونیوم (NH_4^+) و تجمع مقادیر بالاتر آن‌ها با تولید اعمال پلاسما بر سطح آب است که تاثیر به‌سزایی در افزایش رشد گیاهان دارند. Hou et al. (2021). آب آبیاری با EC نامناسب می‌تواند برای گیاهان نامطلوب باشد، زیرا امکان کوددهی و جذب مؤثر مواد مغذی توسط گیاه را مختل می‌سازد و می‌تواند به گیاهان آسیب رساند. با استفاده از راکتور پلاسمایی می‌توان علاوه بر کنترل هدایت آب، با غنی ساختن آب از گونه‌های مورد نیاز برای رشد گیاه، نیاز به کوددهی را نیز حذف نمود. از سوی دیگر افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی می‌تواند بر کیفیت آب (به‌طور خاص آب شرب) تأثیر منفی بگذارد و نشان‌دهنده ورود آلودگی به آب باشد. زیرا هرچه EC بیشتر باشد، به این معنا است که میزان ناخالصی‌ها از جمله مواد محلول، مواد شیمیایی و مواد معدنی در آب بیشتر است. هر فعالیت انسانی که مواد شیمیایی غیر آلی و باردار ناشی از پساب خانگی و یا صنعتی را به روان‌آب‌ها، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی اضافه سازد موجب تغییر و افزایش هدایت الکتریکی آب می‌شود. در نتیجه با کاهش هدایت الکتریکی بسیار بالای آب، میزان ناخالصی کمتر شده و کیفیت آب بالا می‌رود. Mendoza et al., (Ige et al., 2019; 2018).

برطبق موارد مذکور و پیشرفت‌های اخیر در کاربرد فرآیندهای پلاسما در سیستم‌های نمک‌زدایی و تصفیه آب می‌توان با طراحی مناسب راکتورهای پلاسمایی، امکان پاک‌سازی انواع آب‌های آلوده را نیز فراهم ساخت (Mihiri Ekanayake et al., 2021). از مزایای استفاده از راکتور پلاسمایی برای کنترل هدایت الکتریکی آب، می‌توان به عدم کاربرد هرگونه ماده شیمیایی و عدم و یا حداقل تولید مواد جانبی (در بسیاری از موارد دارای قابلیت کاربرد) در طول کارکرد راکتور و برهمکنش پلاسما با آب اشاره کرد که آن‌را از لحاظ معیارهای محیط‌زیستی به عنوان روشی سبز معرفی می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از فناوری برهمکنش پلاسمای سرد اکسیژن با سطح آب در فشار اتمسفر و تغییر در طراحی راکتور تولید پلاسما، امکان کنترل هدایت الکتریکی آب برای به‌کارگیری در زمینه‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان دادند که نوع طراحی راکتور پلاسمایی و زمان اعمال پلاسما می‌توانند موجب افزایش، کاهش و یا به‌طور هم‌زمان افزایش در یک سوی راکتور و کاهش در سوی دیگر هدایت الکتریکی آب با گونه‌های فعال تولید

همان‌گونه که از شکل‌های ۳-الف و ۳-ج مشخص است با تخلیه الکتریکی اکسیژن در راکتور به ترتیب پلاسمای آندی و کاتدی دو ظرف به مدت ۱ min، هدایت الکتریکی در سمت آند در مقایسه با زمان قبل از اعمال پلاسما با افت مواجه شد که این کاهش در پلاسمای آندی بیش از پلاسمای کاتدی بود. مطابق با شکل‌های ۳-ب و ۳-د این تغییرات در سمت کاتد هر دو حالت پلاسمای آندی و کاتدی به صورت افزایشی مشاهده شد. این افزایش برای پلاسمای آندی ناچیز و برای پلاسمای کاتدی چشمگیر بود. هدایت الکتریکی در راکتور پلاسمای آندی و کاتدی تک‌ظرف نیز پس از اعمال پلاسما افزایش یافت.

تغییرات هدایت الکتریکی برای زمان ۲ min اعمال پلاسما در هر دو سمت پلاسمای آندی در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب به صورت افزایشی مشاهده شد. تغییرات EC در آند پلاسمای کاتدی در شکل ۳-ج منفی و در کاتد آن در شکل ۳-د مثبت به دست آمد. هدایت الکتریکی در راکتور پلاسمای تک‌ظرف آندی و کاتدی به ترتیب در شکل ۳-ه و ۳-ی در زمان ۲ min در مقایسه با زمان ۱ min افزایش داشت. مطابق با شکل‌های ۳-الف-۳ می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات هدایت الکتریکی در زمان‌های بالاتر از ۲۲ min به تقریب افزایشی بود. در راکتور پلاسمای تک‌ظرف، افزایش تغییرات برای پلاسمای کاتدی شکل ۳-ی بالاتر از پلاسمای آندی شکل ۳-ه به دست آمد. در پلاسمای آندی دو ظرف در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب، افزایش تغییرات EC در زمان ۱ تا ۳ دقیقه در سمت آند بیش از کاتد و در ۴ تا ۱۰ دقیقه برعکس مشاهده شد. در پلاسمای کاتدی دو ظرف در شکل‌های ۳-ج و ۳-د، افزایش تغییرات EC تا زمان ۷ min در سمت کاتد بیش از آند و پس از آن در سمت آند بیش از کاتد بود.

با توجه به نتایج حاصل، این تحقیق امکان استفاده از قابلیت پلاسمای فشار اتمسفری در کنترل هدایت الکتریکی برای به‌کارگیری در زمینه‌های کاربردی متنوع را نشان می‌دهد. برای مثال می‌توان از تغییرات EC حاصل، در بحث کشاورزی و یا تصفیه آب استفاده کرد (صیادی شهرکی و صیادی شهرکی، ۱۳۹۸؛ چوپان و همکاران، ۱۳۹۷). آزمایش هدایت الکتریکی، برای موفقیت در سیستم‌های تولید کشاورزی ضروری است و EC بهینه، مخصوص هر محصول است که به شرایط محیطی بستگی دارد (Le Bot et al., 1998; Sonneveld and Voogt, 2009). در محلول آبی، EC با تعداد و ماهیت یون‌های فعال در محلول ارتباط مستقیمی دارد.

در تحقیق حاضر، افزایش مقادیر EC آب به دلیل تشکیل یون‌ها و گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (ROS, RNS) از جمله

- Le Bot, J., Adamowicz, S., and Robin, P., (1998), "Modelling plant nutrition of horticultural crops: A review", *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 47-82, [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00082-X).
- Meichsner, J., Schmidt, M., Schneider, R., and Wagner, H.E., (2013), *Nonthermal plasma chemistry and physics*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Mendoza, R.M.O., Dalida, M.L.P., Kan, Ch.Ch., Wan, M.W., (2018), "Groundwater treatment by electrodialysis: Gearing up toward green technology". *Desalination and Water Treatment*, 127, 178-183. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22929>.
- Mihiri Ekanayake, U.G., Barclay, M., Seo, D.H., Park, M.J., MacLeod, J., O'Mullane, A.P., Motta, N., Shon, H.K., and Ostrikov, K.K., (2021), "Utilization of plasma in water desalination and purification", *Desalination*, 500, 114903, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114903>.
- Rumbach P., and Go, D.B., (2017), "Perspectives on plasmas in contact with liquids for chemical processing and materials synthesis", *Topics in Catalysis*, 60, 799-811, <https://doi.org/10.1007/s11244-017-0745-9>.
- Sonneveld, C., and Voogt, W., (2009), "Crop response to an unequal distribution of ions in space and time plant nutrition of greenhouse crops", *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, 159-172, https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_8.
- Wiese, W.L., Fuhr, J.R., and Deters, T.M., (1996), *Atomic transition probabilities of carbon, nitrogen, and oxygen: A critical data compilation*, American Chemical Society, New York.
- Vijay Nehra, V., Kumar A., and Dwivedi, H.K., (2008), "Atmospheric non-thermal plasma sources", *International Journal of Engineering*, 2(1), 53-68.
- Yusupov, D. I., Kulikov, Y. M., Gadzhiev, M. Kh., Tyuftyayev A. S., and Son, E. E., (2016). "High-pressure ignition plasma torch for aerospace testing facilities". *Journal of Physics: Conference Series*, 774, 012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/774/1/012185>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

شده در پلاسما بدون استفاده از هیچ‌گونه ماده شیمیایی دیگر شوند.

۵- مراجع

- صیادی شهرکی، ف.، و صیادی شهرکی، ع.، (۱۳۹۸) "شبیه‌سازی هدایت الکتریکی دشت بهبهان با استفاده از مدل‌های ANN و ANN-PSO"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۱)، ۳۴-۴۱. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2019.160050.1126>
- چوپان، ی.، خاشعی سیوکی، ع.، شهیدی، ع.، (۱۳۹۷) "ارزیابی اثرات فاضلاب تصفیه‌شده شهری بر خصوصیات شیمیایی خاک تحت کشت پنبه" *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۲)، ۶۸-۶۱. <https://doi.org/10.22112/jwwse.2018.126795.1078>
- Baharlounezhad, F., Mohammadi, M.A., and Zakerhamidi, M.S., (2023), "Plasma synthesis of ammonia by asymmetric electrode arrangement", *Materials and Manufacturing Processes*, 38(2), 159-169, <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105875>.
- D'Angola, A., Colonna, C., and Kustova, E., (2022), "Editorial: Thermal and non-thermal plasmas at atmospheric pressure", *Frontiers in Physics*, 10, 852905, <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.852905>.
- Ding, X., Jiang, Y., Zhao, H., Guo, D., He, L., Liu, F., Zhou, Q., Nandwani, D., Hui, D. and Yu, J., (2018), "Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system", *PLOS ONE*, 13(8), e0202090, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202090>.
- Hamdan, A., Profili, J., and Cha, M.S., (2020), "Microwave plasma jet in water: Effect of water electrical conductivity on plasma characteristics", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 40, 169-185, <https://doi.org/10.1007/s11090-019-10034-5>.
- Hou, C.Y., Kong, T.K., Lin, C.M., and Chen, H.L., (2021), "The effects of plasma-activated water on heavy metals accumulation in water Spinach", *Applied Sciences*, 11(11), 5304, <https://doi.org/10.3390/app11115304>.
- Ige, E.O., Arun, R.K., Singh, P., Gope, M., Saha, R., Chanda, N., and Chakraborty, S., (2019), "Water desalination using graphene oxide-embedded paper microfluidics", *Microfluidics and Nanofluidics*, 23(6), 80, <https://doi.org/10.1007/s10404-019-2247-5>.
- Kim, S., and Kim, C-H., (2021), "Applications of Plasma-Activated Liquid in the Medical Field", *Biomedicines*, 9(11), 1700, <https://doi.org/10.3390/biomedicines9111700>.