



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



بررسی تغییرات پارامترهای فیزیکی آب فعال شده با پلاسما با استفاده از شبیه‌سازی تخلیه الکتریکی در مایعات

نیلوفر محمدی نهرانی^۱، مریم بحرینی^۱ و سعید حسن پور طادی^۲

^۱ دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی ایران

چکیده - در مقاله پیش رو، شبیه سازی فرآیند تخلیه الکتریکی درون حباب های کروی داخل آب با خروجی مو سوم به آب فعال شده با پلاسما (PAW) با به کارگیری ساختار تخلیه سد دی الکتریک (DBD)، با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار می گیرد. با تحلیل تغییرات چگالی، دما، میدان و پتانسیل الکتریکی نواحی مربوط به حباب و بررسی نمودار تغییرات آن با زمان و تغییرات موضعی چگالی بسته به مکان به این مهم دست می یابیم که مایعات حاصل از این اتفاق مو سوم به PAW هم خاصیت رسانایی الکتریکی دارند و هم خواص دی الکتریکی خود را حفظ می کنند.

کلید واژه - آب فعال شده با پلاسما، تخلیه سد دی الکتریک، حباب

Investigation of changes in physical parameters of plasma activated water using simulation of discharge in liquids

Mohammdi , Niloofar ¹; Bahreini , Maryam ² ; Hassanpour tadi , Saeed ³

¹Department of Physics , University of Science & Technology , Email: nmohammadi111175@gmail.com

²Department of Physics , University of Science & Technology , Email: m_bahreini@iust.ac.ir

³Laser and Plasma Research Institute , University of Shahid Beheshti , Email: s_hassanpour@sbu.ac.ir

Abstract- The simulation of discharge for spherical bubbles in water called plasma activated water (PAW) is investigated by using finite element method for a simulated 2D dielectric barrier discharge. By analyzing the changes of density, temperature, electric field, and the electric potential of the bubble regions with time, we find that PAW have electrical conductivity beside preserving its dielectric properties.

Keywords: plasma activated water, dielectric barrier discharge, bubble.

مقدمه

ساز و کار تخلیه الکتریکی در مایعات (به خصوص آب) را می توان به دو گروه تقسیم بندی کرد : اولین گروه تخلیه الکتریکی درون حباب و دومین گروه که شامل تخلیه های جزئی و تخلیه های کامل مانند قوس الکتریکی و اسپارک می شوند. با بالا رفتن دمای موضعی ناشی از میدان الکتریکی بسیار قوی و در نتیجه تبخیر آب، میکرو حباب هایی به وجود می آیند و همینطور بزرگتر می شوند و به دنبال آن تخلیه الکتریکی درون آن رخ می دهد. در تخلیه جزئی انتقال جریان بیشتر ناشی از یون هاست و در تخلیه کامل یا همان قوس و اسپارک الکترون ها مسئول انتقال جریان می باشند. [۱] شکل دیگری از این دسته بندی را می توان به این صورت بیان کرد : تخلیه مستقیم در مایع، پلاسمای گازی که منجر به ایجاد واکنش هایی درون مایعات می گردند (تخلیه غیرمستقیم) ، پلاسمای چند فاز (ترکیب دو حالت قبلی)، تخلیه مستقیم مانند جت پلاسمایی داخل آب، تخلیه غیر مستقیم مانند قوس الکتریکی که آب بعنوان یکی از الکترودها مشارکت می کند و حالت ترکیبی مثل تخلیه حباب های درون آب که در واقع در یک فاز گازی درون فاز مایع تخلیه الکتریکی رخ می دهد. [۲]

تمامی این اتفاقات و واکنش های شیمیایی و انرژی های منتقل شده ناشی از تخلیه الکتریکی و تشکیل پلازما در عدم حضور هیچ گونه ماده شیمیایی، منجر به تولید گونه هایی موثر در فرآیندهای مختلف می شود. آب حاصل از این اتفاق، آب فعال شده با پلازما است که آن را به اختصار *PAW* می نامند. از جمله کاربرد های *PAW* می توان به حوزه پزشکی و درمان مانند درمان زخم ها، درمان سلول های سرطانی و دندان پزشکی، کشاورزی هوشمند مانند تسهیل جوانه زنی بذر و رشد گیاهان، صنایع غذایی مانند

ضد عفونی میوه ها و سبزی ها ، تنظیم آنزیم ها و آفت کشی اشاره نمود. [۳]

هدف ما در این مقاله شبیه سازی تخلیه الکتریکی در مایعات با استفاده از نرم افزار کامسول می باشد. با به کار گیری ساختار تخلیه سد دی الکتریک موسوم به *DBD* طی یک فرآیند تخلیه چند فاز (با در نظر گرفتن آرگون بعنوان گاز ورودی، تخلیه الکتریکی و تشکیل پلازما را درون حباب هایی به قطر ۰.۲ میلی متر مورد ارزیابی قرار می دهیم.

تئوری *PAW* و معادلات شیمیایی

چگالی و انرژی میانگین الکترون ها با حل دو جفت معادله *drift – diffusion* محاسبه می گردد . با صرف نظر کردن از حرکت همرفتی ناشی از جریان سیالی الکترون ها معادلات زیر بررسی می شوند.

در نرم افزار کامسول، معادلات زیر به روش المان محدود^۱ حل می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla n_e] = R_e$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] + E \cdot \Gamma_e = R_e$$

در این معادله R_e منبع الکترون است.

برای گونه های غیرالکترونی، معادله *Heavy Species Transport* برای کسر جرمی هر کدام از گونه ها حل می شود:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(w_k) + \rho(u \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot j_k + R_k$$

میدان الکترواستاتیک نیز توسط رابطه ی زیر حل می شود:

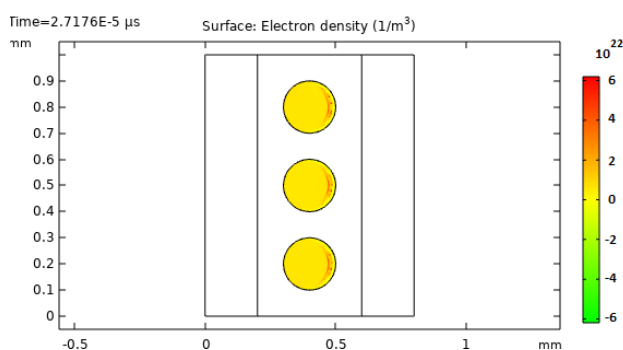
$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = \rho$$

در این معادله ρ چگالی بار فضایی است.

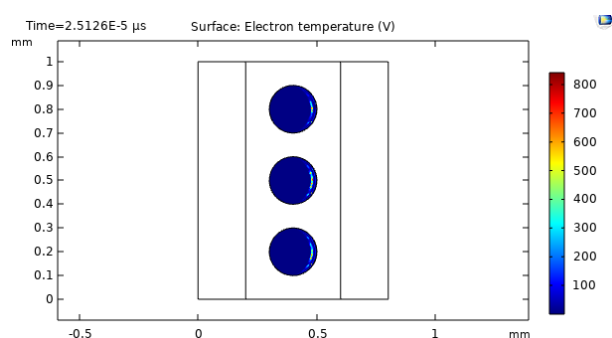
واکنش های شیمیایی که در این شبیه سازی انجام شده در جدول ۱ بیان شده است.

^۱Finite element

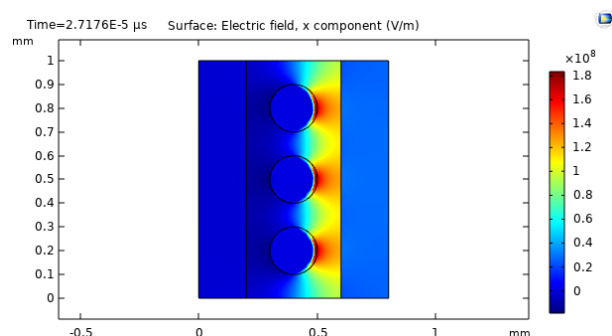
^۱Plasma Activated Water



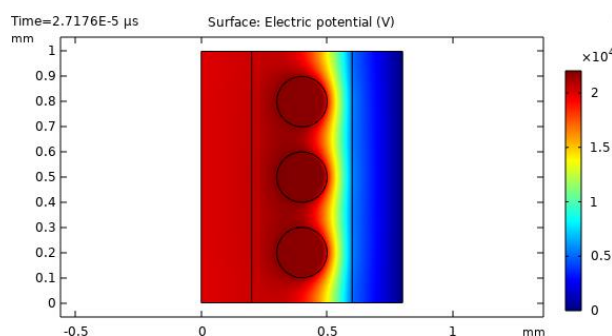
شکل ۲- نمودار دو بعدی چگالی الکترون در لحظه پایانی



شکل ۳- نمودار دو بعدی دمای الکترون در لحظه پایانی



شکل ۴- نمودار دو بعدی میدان الکتریکی در لحظه پایانی



شکل ۵- نمودار دو بعدی پتانسیل الکتریکی

REACTION	FORMULA	TYPE	$\Delta\epsilon(\text{eV})$
1	$e+\text{Ar} \Rightarrow e+\text{Ar}$	Elastic	0
2	$e+\text{Ar} \Rightarrow e+\text{Ar}^*$	Excitation	11.5
3	$e+\text{Ar}^* \Rightarrow e+\text{Ar}$	Superelastic	-11.5
4	$e+\text{Ar} \Rightarrow 2e+\text{Ar}^+$	Ionization	15.8
5	$e+\text{Ar}^* \Rightarrow 2e+\text{Ar}^+$	Ionization	4.24
6	$\text{Ar}^*+\text{Ar}^* \Rightarrow e+\text{Ar}+\text{Ar}^+$	Penning ionization	-
7	$\text{Ar}^*+\text{Ar} \Rightarrow \text{Ar}+\text{Ar}^*$	Metastable quenching	-

جدول ۱: جدول برخوردها و واکنش های شیمیایی مدل شبیه سازی شده

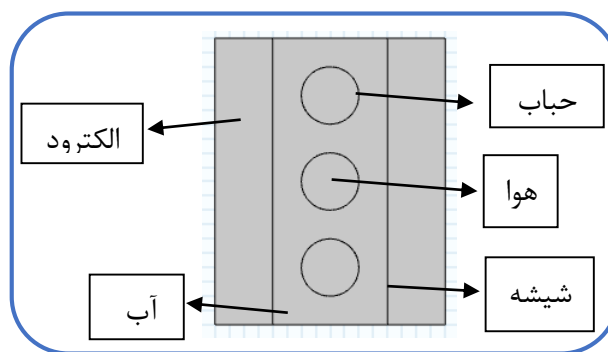
روش شبیه سازی

همان طور که گفتیم هدف ما شبیه سازی تخلیه سد دی الکتریک درون مایعی است که حباب هایی درون آن قرار گرفته اند. این شبیه سازی با نسخه ۵،۵ نرم افزار کامسول انجام پذیرفته است.

شکل ۱ هندسه شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول را نشان می دهد؛ برای الکترودها پایداری بار در نظر گرفته شد تا پلاسمای تشکیل شده تنها درون حباب ها باشد. به این منظور لازم بود تا مرز میان الکترود و آب نیز از یک دی الکتریک در نظر گرفته شود که آن را شیشه در نظر گرفتیم.

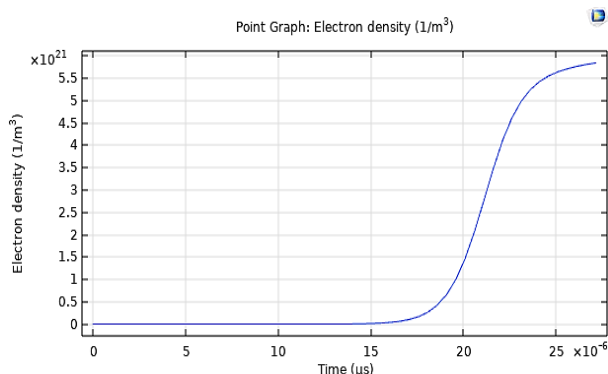
نتایج

شکل های ۲ تا ۵ با هدف بررسی خواص مایع پس از تخلیه



شکل ۱- هندسه آزمایش شبیه سازی شده

بردن راکتورهای پلاسمایی مشابه فرآیند شبیه‌سازی شده می‌توان در حوزه‌های مختلفی چون کاربردهای ذکر شده (پزشکی و درمان، کشاورزی، صنایع غذایی، تصفیه آب و ...) بهره‌مند شد.



شکل ۷ - نمودار یک بعدی چگالی الکترون

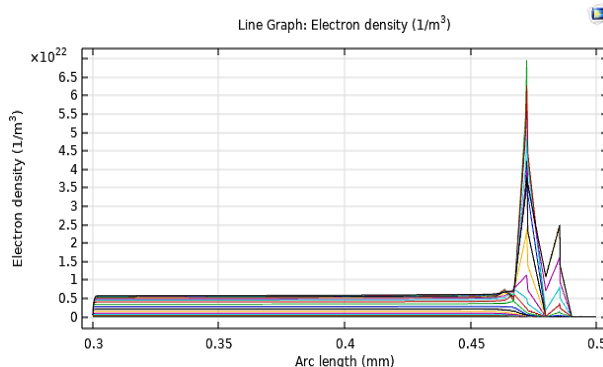
مرجع‌ها

- [1] Y.Yang , Y.I.Cho and A.Fridman , *Plasma Discharge in Liquid : Water Treatment and Applications* , p.1 and p.12 - 13 , CRC Press , 2012 .
- [2] P J Bruggeman et al *Plasma Sources Sci. Technol.* 25 053002 , 2016 .
- [3] Renwu Zhou et al *J. Phys. D: Appl. Phys.* in press <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf> , 2020.

الکتریکی با ارزیابی پارامترهای مهم در نرم‌افزار کامسول به دست آمده است.

شکل های ۲ تا ۵ به ترتیب چگالی و دمای الکترون، و میدان و پتانسیل الکتریکی را نشان می‌دهد. چگالی الکترونها با گذر زمان درون حباب بالاتر می‌رود و در ناحیه نزدیک به الکتروود زمین شده، اختلاف چگالی ایجاد شده باعث ایجاد دو قطبی الکتریکی می‌گردد. دمای ناحیه موردنظر نیز طبق شکل ۳ افزایش می‌یابد. دیده می‌شود که شدت میدان الکتریکی بین حباب و شیشه عایق میان الکتروود زمین شده در زمان نهایی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. از آخرین نمودار نیز می‌بینیم که در نهایت اختلاف پتانسیل ناحیه مورد نظر با الکتروود زمین شده به بیشترین مقدار خود رسیده و با الکتروود $H.V$ هم پتانسیل شده است.

شکل ۶ برش عرضی از حباب و نمودار یک بعدی آن در طول خط برش است و شکل ۷ نقطه مرکزی یکی از حباب- هاست که به خوبی نشان می‌دهد که چگالی الکترون در گذر زمان درون حباب چگونه بالا می‌رود.



شکل ۶- نمودار یک بعدی چگالی الکترون در همه زمان ها

نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم افزار کامسول اقدام به شبیه سازی تخلیه سد دی‌الکتریک نمودیم؛ مایعات حاصل از این اتفاق هم رسانای الکتریکی اند و هم نقش دی الکتریک را دارند. تاثیر حضور آب در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت؛ با به کار