بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ 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 به‌کارگیری ساختار تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)، با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. با تحلیل تغییرات چگالی، دما، میدان و پتانسیل الکتریکی نواحی مربوط به حباب و برر سی نمودار تغییرات آن با زمان و تغییرات مو ضعی چگالی بسته به مکان به این مهم د ست می یابیم که مایعات حا صل از این اتفاق مو سوم به PAW هم خا صیت ر سانایی الکتریکی دارند و هم خواص دی‌الکتریکی 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]

[1]Department of Physics , University of Science & Technology , Email: nmohammadi111175@gmail.com
[2]Department of Physics , University of Science & Technology , Email: m_bahreini@iust.ac.ir
[3]Laser 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

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 می‌شوند. با بالارفتن دمای موضعی ناشی از میدان الکتریکی بسیار قوی و در نتیجه تبخیر آب، میکروحباب‌هایی به وجود می آیند و همینطور بزرگتر می شوند و به دنبال آن تخلیه الکتریکی درون آن رخ می‌دهد. در تخلیه جزئی انتقال جریان بیشتر ناشی از یون‌هاست و در تخلیه کامل یا همان قوس و اسپارک الکترون ها مسئول انتقال جریان می باشند.[۱] شکل دیگری از این دسته بندی را می‌توان به این صورت بیان کرد : تخلیه مستقیم در مایع، پلاسمای گازی که منجر به ایجاد واکنشهایی درون مایعات می‌گردند (تخلیه غیرمستقیم) ، پلاسماهای چند فازی (ترکیب دو حالت قبلی). تخلیه مستقیم مانند جت پلاسمایی داخل آب، تخلیه غیر مستقیم مانند قوس الکتریکی که آب بعنوان یکی از الکترود ها مشارکت می‌کند و حالت ترکیبی مثل تخلیه حباب‌های درون آب که در واقع در یک فاز گازی درون فاز مایع تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد. [۲]

تمامی این اتفاقات و واکنش‌های شیمیایی و انرژی‌های منتقل شده ناشی از تخلیه الکتریکی و تشکیل پلاسما در عدم حضور هیچ‌گونه ماده شیمیایی، منجر به تولید گونه-هایی موثر در فرآیندهای مختلف می شود. آب حاصل از این اتفاق، آب فعال شده با پلاسما است که آن را به اختصار PAW [۱] می‌نامند. از جمله کاربرد های PAW می‌توان به حوزه پزشکی و درمان مانند درمان زخم‌ها، درمان سلول های سرطانی و دندان پزشکی، کشاورزی هوشمند مانند تسهیل جوانه زنی بذر و رشد گیاهان، صنایع غذایی مانند ضدعفونی میوه‌ها و سبزی‌ها ، تنظیم آنزیم‌ها و آفت‌کشی اشاره نمود. [۳]

هدف ما در این مقاله شبیه‌سازی تخلیه الکتریکی در مایعات با استفاده از نرم‌افزار کامسول می‌باشد. با به‌کارگیری ساختار تخلیه سد دی الکتریک موسوم به DBD طی یک فرآیند تخلیه چند فازی با در نظر گرفتن آرگون بعنوان گاز ورودی، تخلیه الکتریکی و تشکیل پلاسما را درون حباب‌هایی به قطر ۰,۲ میلیمتر مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

تئوری PAW و معادلات شیمیایی

چگالی و انرژی میانگین الکترون‌ها با حل دو جفت معادله $drift-diffusion$ محاسبه می‌گردد . با صرف‌نظر کردن از حرکت همرفتی ناشی از جریان سیالی الکترون‌ها معادلات زیر بررسی می شوند.

در نرم‌افزار کامسول، معادلات زیر به روش المان محدود[۲] حل می‌شود:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_\varepsilon) + \nabla \cdot [-n_\varepsilon (\mu_\varepsilon \cdot E) - D_\varepsilon \cdot \nabla n_\varepsilon] + E \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon$$

در این معادله R_ε منبع الکترون است.

برای گونه‌های غیرالکترونی، معادله Heavy Species Transport برای کسر جرمی هر کدام از گونه‌ها 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:

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho$$

در این معادله ρ چگالی بار فضایی است.

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

---

[۱] *Plasma Activated Water*

[۲] *Finite element*

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

REACTION	FORMULA	TYPE	Δε(eV)
1	e+Ar=>e+Ar	Elastic	0
2	e+Ar=>e+Ars	Excitation	11.5
3	e+Ars=>e+Ar	Superelastic	-11.5
4	e+Ar=>2e+Ar+	Ionization	15.8
5	e+Ars=>2e+Ar+	Ionization	4.24
6	Ars+Ars=>e+Ar+Ar+	Penning ionization	-
7	Ars+Ar=>Ar+Ar	Metastable quenching	-

جدول۱ : جدول برخوردها و واکنش های شیمیایی مدل شبیه سازی شده

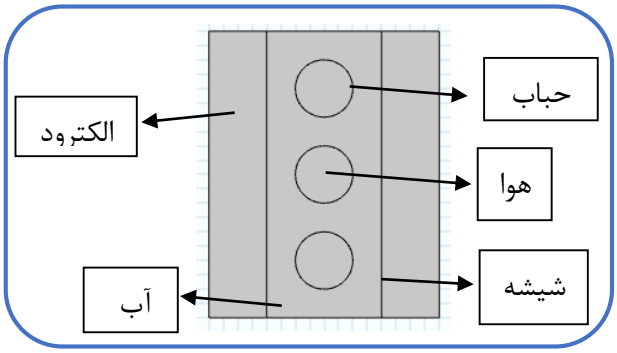
روش شبیه‌سازی

همان‌طور که گفتیم هدف ما شبیه‌سازی تخلیه سد دی الکتریک درون مایعی است که حباب‌هایی درون آن قرار گرفته‌اند. این شبیه‌سازی با نسخه ۵،۵ نرم‌افزار کامسول انجام پذیرفته است.

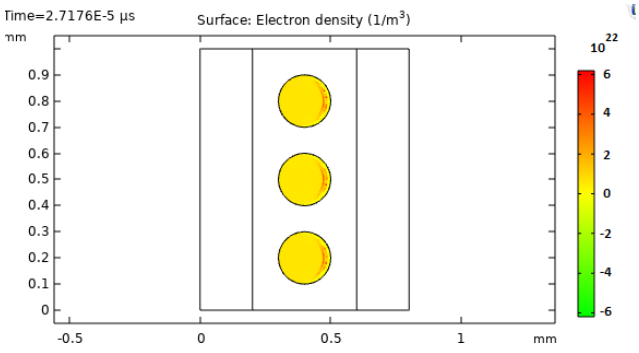
شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد؛ برای الکترودها پایستگی بار در نظر گرفته شد تا پلاسمای تشکیل شده تنها درون حباب‌ها باشد. به این منظور لازم بود تا مرز میان الکترود و آب نیز از یک دی الکتریک در نظر گرفته شود که آن را شیشه در نظر گرفتیم.

نتایج

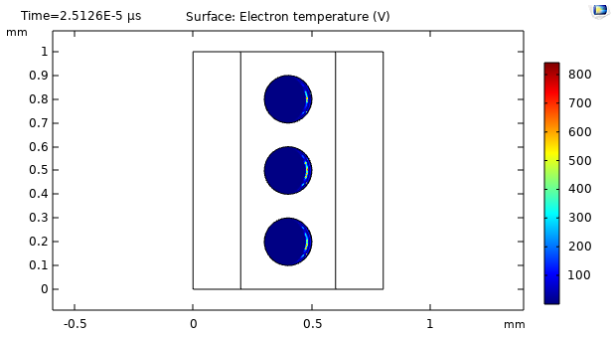
شکل‌های ۲ تا ۵ با هدف بررسی خواص مایع پس از تخلیه



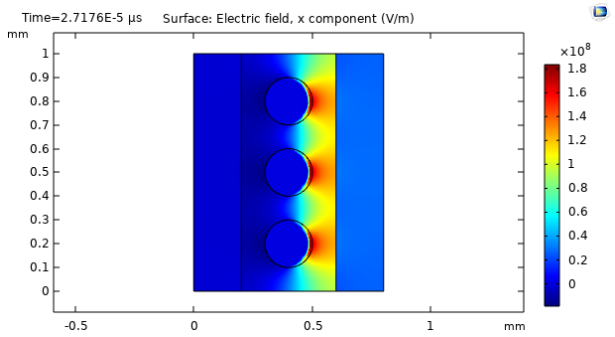
شکل۱ – هندسه آزمایش شبیه سازی شده



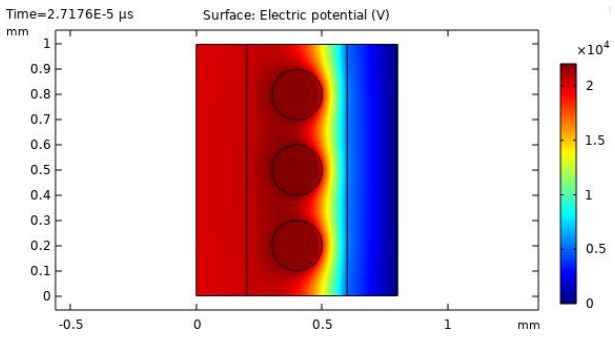
شکل ۲ – نمودار دو بعدی چگالی الکترون در لحظه پایانی



شکل ۳ – نمودار دو بعدی دمای الکترون در لحظه پایانی



شکل ۴ – نمودار دو بعدی میدان الکتریکی در لحظه پایانی



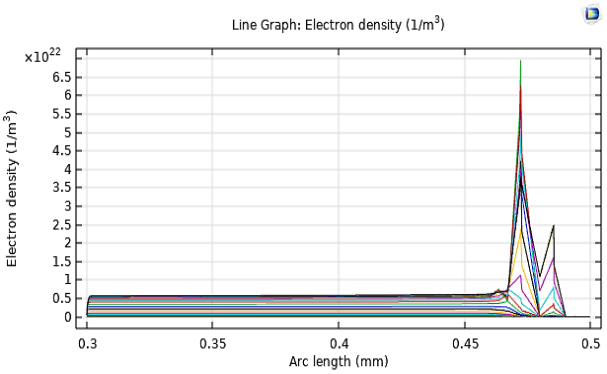
شکل ۵- نمودار دو بعدی پتانسیل الکتریکی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

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 الکترود 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 الکترود 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 الکترود زمین شده به بیشترین مقدار خود رسیده و با الکترود $H.V$ هم پتانسیل شده است.

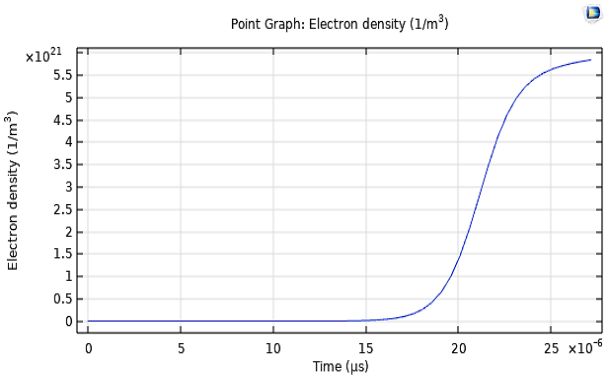
شکل ۶ برش عرضی از حباب و نمودار یک بعدی آن در طول خط برش است و شکل ۷ نقطه مرکزی یکی از حباب-هاست که به خوبی نشان می‌دهد که چگالی الکترون در گذر زمان درون حباب چگونه بالا می‌رود.



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 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]