

Numerical modeling negative corona under the influence of applied voltage variation

Hala Alnaemi^{1*}, Qais Algwari²

^{1*}Department of Physics, College of Education for Pure Science, Mosul University, Mosul, Iraq

²Electronic Department, College of Electronics Engineering, Nineveh University, Mosul, Iraq

E-mail: ^{1*}halalnaemi74@gmail.com, ²qais.thanon@gmail.com

(Received October 27, 2020; Accepted December 22, 2020; Available online June 01, 2021)

DOI: [10.33899/edusj.2020.128762.1120](https://doi.org/10.33899/edusj.2020.128762.1120), © 2021, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract

In high-voltage gaseous insulation systems, the corona discharge is important because it can lead to drop of the insulating qualities of the gas in addition to the production of harm by-products. The influence of the applied voltage variation on the negative corona characteristics in a coaxial electrode geometry has been investigated based on one-dimensional dynamic model of corona discharge includes one-dimensional continuity equations and Poisson equation. The one-dimensional fluid model of corona discharge is solved by finite difference flux correction method (FD-FCT). The calculations were performed on oxygen gas under the atmospheric pressure using COMSOL multiphysics software. The corona discharge parameters are simulated under different voltage values 4KV, 6KV, 7KV, 8KV and 10KV, respectively. The effect of the applied voltage on the spatial distribution of main charged species and electron as well as the ozone was considered. The results show that as the negative applied voltage on the cathode increased the total current density also increase while the electron density decrease. The ozone density do not much affected by the increasing the applied voltage.

Keywords: Negative Corona Discharge, Ozone Density, Negative applied Voltage

النمذجة العددية الهالة السالبة تحت تأثير تغير الجهد المسلط

هالة صلاح الدين^{1*}، قيس الجواري²

^{1*}قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الموصل، العراق
²قسم هندسة الإلكترونيك، كلية هندسة الإلكترونيات، جامعة نينوى، الموصل، العراق

الخلاصة

في أنظمة العزل الغازي عالي الجهد، يعتبر تفريغ الهالة أمراً مهماً لأنه يمكن أن يؤدي إلى انخفاض الصفات العازلة للغاز بالإضافة إلى إنتاج منتجات ثانوية ضارة. تم دراسة تأثير تباين الجهد المسلط على خصائص الهالة السالبة في الشكل الهندسي للقطب المحوري بناءً على نموذج ديناميكي أحادي البعد لتفريغ الهالة يتضمن معادلات الاستمرارية أحادية البعد ومعادلة بوسون. تم حل نموذج السائل أحادي البعد لتفريغ الهالة من خلال طريقة تصحيح تدفق الفروق المحدودة (FD-FCT). تم إجراء الحسابات على غاز الأكسجين تحت الضغط الجوي باستخدام برنامج COMSOL multiphysics. تم محاكاة عوامل تفريغ الهالة تحت جهد

مختلف عند (4 كيلو فولت , 6 كيلو فولت , 7 كيلو فولت , 8 كيلو فولت , 10 كيلو فولت) على التوالي. تم النظر في تأثير الجهد المسلط على التوزيع المكاني لأنواع الرئيسية المشحونة والإلكترونات وكذلك الأوزون. أظهرت النتائج أنه كلما زاد الجهد المسلط السالب على الكاثود ، زادت كثافة التيار الكلي أيضاً في حين تنخفض كثافة الإلكترونات. لا تتأثر كثافة الأوزون كثيراً بزيادة الجهد المسلط .

الكلمات المفتاحية: تفريغ الهالة السالبة, كثافة الأوزون, الجهد المسلط السالب .

المقدمة

تفريغ الهالة هو نوع من أنواع التفريغات الكهربائية المستدامة ذاتياً منخفضة الطاقة نسبياً تحدث عند أو بالقرب من الضغط الجوي والتي تؤين منطقة صغيرة حول القطب الكهربائي العالي الجهد وهي تحدث عندما يتجاوز مجال السطح قيمة المجال الابتدائي الحرج حيث تتولد الهالة دائماً عن طريق المجالات الكهربائية المرتبطة بأسلاك صغيرة أو إبر أو حواف حادة على قطب كهربائي. [1, 2] . تحدث الهالة عادةً في أنظمة الجهد العالي عندما تكون شدة المجال الكهربائي حول القطب عالية بما يكفي ولكنه ليس كافياً لحدوث الانهيار الكهربائي بين الموصلات القريبة [3]. إذا كان المجال الكهربائي مرتفعاً بدرجة كافية ، فإن الغاز المحيط به عند هذه النقطة يصبح موصلاً ، وتصبح شدة المجال الكهربائي عند هذه النقطة عالية جداً نتيجة لذلك ينجرف الإلكترونات ويؤين الغاز حول الكاثود وينتشر نحو الأنود [4, 5] .

تبدأ عملية الهالة بجهد يسمى الجهد الابتدائي والتي تعتمد على العديد من العوامل مثل القطبية وشكل القطب الكهربائي وضغط الغاز. يمكن أن يحدث الانهيار عند جهد أعلى من الجهد الابتدائي للهالة.

اعتماداً على قطبية الجهد الكهربائي المسلط على القطب الكهربائي المدبب ، يمكن تصنيف تفريغ الهالة على أنه موجياً أو سالباً . يعد اختلاف المجال الكهربائي بين الأقطاب الكهربائية وكذلك طاقة الإلكترونات الحرة عاملاً رئيسياً في بدء تفريغ الهالة. يؤدي تصادم الإلكترونات المعجلة مع ذرات أو جزيئات متعادلة في منطقة ذات مجال عالي إلى حدوث عملية التأين التي تنتج الكثير من أزواج إلكترون – ايون موجب. نظراً لأن جميع عمليات التأين تحدث بالقرب من القطب الكهربائي ، فإن هذه المنطقة تسمى منطقة التأين. ستتحكم قطبية القطب الكهربائي في اتجاه حركة الجسيمات المشحونة. على سبيل المثال ، في حالة القطب الكهربائي السالب ، تفقد الإلكترونات المنجرفة ، بعيداً عن منطقة التأين ، طاقتها بسبب الاصطدامات المرنة حتى تصبح غير قادرة على إجراء عمليات التأين. في حالة وجود غاز كهروسليبي ، ترتبط هذه الإلكترونات البطيئة بجزيئات متعادلة كهربائياً وتنتج شحنة سالبة عند حافة منطقة التأين. تنجرف الأيونات السالبة بعيداً عن القطب السالب من خلال الجمع بين تأثيري المجال الكهربائي المسلط ومجال الشحنة الفضائية (المجال الموضعي) وتنتقل على طول اتجاه القطب المؤرض. وفي الوقت نفسه ، تتحرك الأيونات الموجبة في الاتجاه المعاكس نحو الكاثود. رحلة الأيونات السالبة طويلة مقارنة بالمسافة التي تقطعها الأيونات الموجبة. ووفقاً لهذا ، يمكن تقسيم الفجوة بين الأقطاب الكهربائية إلى منطقتين أساسيتين تسمى التأين والانجراف [6]. يستخدم تفريغ الهالة لتنظيف الهواء عن طريق التأين ومعالجة غاز العادم وقتل الميكروبات وكذلك في العديد من التطبيقات الصناعية مثل المرشحات الكهروستاتيكية [7] وصناعة أشباه الموصلات والطابعات النفاثة وإنتاج الأوزون. بينما يتسبب في خطوط نقل الطاقة الكهربائية، في فقدان الطاقة وإتلاف الموصلات والعوازل والتسبب في ضوضاء التردد اللاسلكي التي تتداخل مع إشارات الاتصال [8]. لذلك فإن من أهم أسباب دراسة تفريغ الهالة هو دراسة الخسارة الحاصلة في الطاقة الكهربائية المنقولة من محطات الجهد العالي والتقليل من ضياع هذه الطاقة الكهربائية .

تم إجراء العديد من الدراسات العددية في الماضي لتحديد هذه المعلومات على سبيل المثال ، إذ درس Pontiga et al. [9] . توليد الأوزون عن طريق حساب التوزيع المكاني لأنواع الجسيمات المتولدة في تفريغ الهالة ذات الشكل الهندسي للقطب سلك- اسطوانة في الأوكسجين النقي باستخدام التفاعلات الكيميائية المختلفة لنماذج البلازما. كما تناول Chen et al. [10] . من خلال دراسته نموذجاً عددياً لتوليد الأوزون في تفريغ الهالة الموجب DC في الهواء الجاف جمعت بين العمليات الفيزيائية في تفريغ الهالة مع التفاعلات الكيميائية لتكوين الأوزون، ثم حل معادلة الاستمرارية لإيجاد كثافة الجسيمات المشحونة والمتعادلة بشكل منفصل . كما قدم كل من Adamiak and Atten. [11] . نموذجاً عددياً في تفريغ الهالة الموجبة ذات الشكل الهندسي نقطة – مستوي، إذ تم حساب المجال الكهربائي وكثافة الشحنة من خلال معادلة بوسون ومعادلات الاستمرارية.

أجريت هذه الدراسة على الهالة السالبة للتيار المستمر والتي تحتوي قطبان محوريان تحت الضغط الجوي لأنظمة الحالة المستقرة. هذا النوع من التفريغ سهل وله الكثير من التطبيقات البيئية [12]. تم اعتماد الشكل الهندسي للأقطاب بشكل سلك والذي يمثل القطب الداخلي وهو الكاثود أما القطب الخارجي ويكون على شكل أسطوانة ويمثل الأنود (المؤرض). نصف قطر الكاثود هو (0.2 mm) ويفصلها عن الأنود فجوة مقدارها (15mm). تم تأريض القطب الخارجي وتطبيق الجهد المستمر على الكاثود لاستمرار عملية التفريغ. يصف النموذج المستخدم سلوك الجسيمات المشحونة باستخدام معادلات الاستمرارية وبوسون ومن المفترض أن يكون التفريغ موحداً ومنتشراً في الاتجاه الشعاعي لجهد عالي. تم استخدام برنامج COMSOL Multiphysics المعروف باستخدام طريقة العناصر المحدودة والذي يستخدم لإجراء الحسابات للعديد من التطبيقات الهندسية والفيزيائية ، الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير تباين الجهد المسلط على خصائص الهالة السالبة في الشكل الهندسي للقطب المحوري بناءً على نموذج ديناميكي أحادي البعد لتفريغ الهالة.

معادلات الحاكمة والاستمرارية

نموذج النظام الفيزيائي لتفريغ الهالة هو النموذج الهيدروديناميكي يتكون من تدفقات الانجراف والانتشار يمكن تعريف هذا النموذج بشكل عام من خلال معادلة التوازن التالية.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = S \quad (1)$$

حيث N و Γ و S هي كثافة الأنواع المشحونة والتدفق و مصدر توليد الإلكترونات على التوالي. يمكن أن يشمل التدفق جزأين وهما الانجراف والانتشار [13].

$$\Gamma = \mu E N - D \nabla N \quad (2)$$

يمثل الحد الأول الانجراف ويتناسب مع المجال المسلط E وحركية الأنواع المشحونة μ بينما يمثل الحد الثاني الانتشار ويعتمد على تدرج كثافة الأنواع ومعامل الانتشار D . ويمكن التعبير عن معامل الانتشار للأيونات الموجبة والسالبة على النحو التالي.

$$D = \mu k_B T_i / q \quad (3)$$

حيث T_i هي درجة حرارة الأيون ، μ هي الحركية ، k_B هو ثابت بولتزمان و q هي الشحنة الأساسية. يمكن وصف مخرجات التفاعل بأكملها التي تحدث في هذا النموذج بمصطلح المصدر S والذي يمكن أن يؤدي إلى التأين والالتصاق وإعادة تكوين الأيونات.

يتم وصف معادلات استمرارية الجسيمات المشحونة (الأيونات السالبة والأيونات الموجبة والإلكترونات) في إحداثيات أسطوانية [14-17].

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r N_e V_e) - D_e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial N_e}{\partial r} \right) = (\alpha - \eta) N_e V_e - \beta_{ep} N_e N_p \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r N_p V_p) = \alpha N_e V_e - \beta_{ep} N_e N_p - \beta_{np} N_n N_p \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r N_n V_n) = \eta N_e V_e - \beta_{np} N_n N_p \quad (6)$$

يؤثر توزيع المجال الكهربائي اللابلاسي على تجمع الشحنات الفضائية بين الأقطاب الكهربائية ويمكن حسابه بحل معادلة بوسون

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E) = - \frac{e(N_p - N_e - N_n)}{\epsilon_0} \quad (7)$$

حيث N_n و N_p و N_e كثافة كل من الإلكترونات والأيونات الموجبة والسالبة على التوالي وأن كل من $(v_n$ و v_p و $v_e)$ هي سرعة انجراف الإلكترونات والأيونات الموجبة والأيونات السالبة على التوالي. في حين أن α و η و D_e و ϵ_0 تشير إلى معاملات التأين ، والتعلق ، وإعادة التركيب ، ومعاملات انتشار الإلكترون ، والسماحية الكهربائية على التوالي. لذلك ، يمكن حساب مصدر توليد الإلكترونات S_e والأيونات الموجبة S_p والأيونات السالبة S_n من معادلات الاستمرارية المذكورة أعلاه ويتم التعبير عنها على النحو التالي

β_{ep} معامل اعادة الاتحاد بين الإلكترونات - الأيون الموجب
 β_{np} معامل اعادة التركيب بين الأيون السالب- الأيون الموجب

$$S_e = N_e v_e - \beta_{ep} N_e N_p (\alpha - \eta) \quad (8)$$

$$S_p = \alpha N_e v_e - \beta_{ep} N_e N_p - \beta_{np} N_n N_p \quad (9)$$

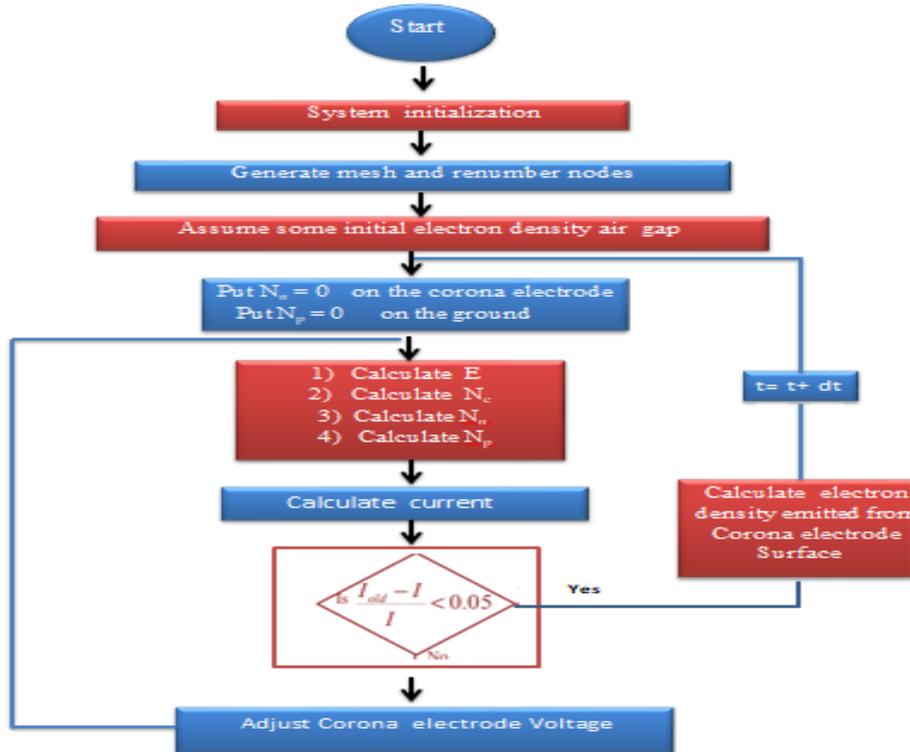
$$S_n = \eta N_e v_e - \beta_{np} N_n N_p \quad (10)$$

النمذجة العددية

يمكن تقسيم هذا النموذج أحادي البعد إلى عدد من النقاط مفصولة بمسافة (عناصر المجال) موزعة وفقاً للتسلسل الحسابي الخاص على طول الخط الذي يمثل الفجوة بين الأقطاب الكهربائية. يعتمد عدد هذه النقاط على الدقة المطلوبة لنتائج المحاكاة ، وبالتالي بلغ عددها 500 عنصر. هناك تحسين للشبكة المفضلة في المناطق التي قد تكون هناك حاجة إليها إلى شبكة أدق محلياً ، حيث تبلغ النسبة بين أطول وأقصر مسافة بين النقاط (نسبة العنصر) حوالي 400. يتم استخدام FEM لحل معادلة بوسون والتي تتمكن بواسطتها من حساب مقدار المجال الكهربائي ومن ثم وبواسطة معادلة الاستمرارية نحسب كثافة الجسيمات المشحونة وفقاً للمعادلات (8), (9), (10)

ثبت الجمع بين (Finite Element Method) FEM طريقة العناصر المحدودة و (Flux Corrected Transport) FCT أنها طريقة مجدية. في هذه التقنية ، حيث يتم افتراض كثافة شحنة فضائية أولية (الكترونات حرة) في الفجوة بين الأقطاب في O_2 والتي تعيد التأين النموذجي ومن ثم يتم حل المعادلات (7), (8), (9), (10) بشكل متكرر ولكل فترة زمنية معينة وان معيار انهاء هذه الحلقة التكرارية هو ان مقدار التغيير في تيار الانجراف يكون أقل من δ_1 كما هو موضح في معادلة (11).

$$\frac{I_{k+1} - 1}{I_{ik+1}} \leq \delta_1 \quad (11)$$



الشكل (1) المخطط الانسيابي لعملية المحاكاة

الشرط تم اعتماده للتأكد من تقارب حلول حسابات الفولتية على القطب المسلط عليه الجهد العالي او ما يسمى بقطب الهالة. وهذا الشرط يتغير نتيجة هبوط الجهد بسبب المقاومة الخارجية. وكذلك فان هذا الشرط يتأثر بتقارب الشحنة الفضائية لأنه إذا كانت شحنة الفضائية متقاربة ، فإن التيار الكهربائي المرتبط بها سيكون أيضاً مرتفع. وكما موضح في الشكل (1) المخطط الانسيابي لعملية المحاكاة . تم استخدام برنامج COMSOL Multiphysics التجاري إصدار (5.3).

تفاعلات نموذج تفرغ الهالة السالبة في O_2

تم تضمين تسع وعشرون تفاعلاً وأحد عشر نوعاً في النموذج الأولي لتفريغ الهالة السالبة DC في غاز O_2 . تمثل هذه التفاعلات والأنواع الأيونية البنوية الأساسية للنموذج نظراً لوجود عدد كبير من التفاعلات والجسيمات التي يمكن تضمينها في النموذج. وبسبب محدودية الذاكرة والمعالج والزمن الكبير الذي نحتاجه لذلك يتم تقييد عدد التفاعلات والأنواع التي يمكن استخدامها في هذا النموذج. ويمكن تصنيف التفاعلات في الهالة لسالبة في غاز O_2 إلى ست مجموعات أساسية ، 20 منها تفاعلات تأثير الإلكترون و 9 تفاعلات عادية. تعتمد تفاعلات تأثير الإلكترون على طاقة الإلكترون (درجة حرارة الإلكترون Te) المشاركة في التفاعلات وكما موضح في الجدول (1).

جدول (1) انواع الجسيمات

Neutral	Positive charged species	Negative charged species
O_2	O_2^+	O_2^-
O_2ald		O^-
O_2bls		
$O_2 45$		
O		
$O1d$		
$O1s$		
O_1		

تم تضمين أحد عشر نوعاً في جميع التفاعلات ، وثمانية أنواع متعادلة ، ونوعاً موجباً واحداً مشحوناً ونوعين سالبين مشحونين وكلها مدرجة في الجدول (2.2)

يشمل هذا النموذج على تصادم مرّن واحدٍ وثلاثة عشر تفاعل تهيج. يتم عرض تفاصيل هذه التفاعلات في الجدول (3.2) يتم استخدام التصادم المرّن وتفاعلات الإثارة فقط في معادلة توازن القوة ، ولا يتم أخذها في الاعتبار في معادلات توازن الكتلة [Pateau et al , 2014].

التصادم المرّن الذي يتم فيه إعادة توزيع الزخم بين الجسيمات المتصادمة وإجمالي الطاقة الحركية يبقى دون تغيير. ينتج عن مثل هذا التصادم فقط تغيير مسار الجسيمات الساقطة ولكن هذا يؤدي إلى زيادة ازمان الانتشار عبر البلازما. لدينا أيضاً في هذا النموذج تفاعل ارتباط واحد ارتباط الإلكترون هو العملية الرئيسية لفقدان الإلكترون هنا يتم إنتاج الأيونات السالبة (O^-) بشكل فعال أثناء الانهيار في منطقة E/N العالية كما يشمل هذا النموذج أيضاً على تفاعل واحد للتأين حيث يمتلك طاقة عتبة وكما موضح في الجدول (2) .يشمل النموذج على خمس تفاعلات إعادة تركيب تعادلي بين الذرات والجزيئات المتعادلة وأيون الأوكسجين السالب حيث تعمل هذه التفاعلات على التقليل من عدد هذه الأيونات السالبة. ويضم النموذج أيضاً تفاعلاً واحداً لإعادة الاتحاد

جدول (2) تفاعلات نموذج الهالة السالبة

No.	Reactions	Type	E(ev)	Rate (m ³ /s) orm ⁶ /s .mol	Ref
R ₁	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Elastic scattering	0.00017	f (E)	[18]
R ₂	$e + O_2 \Rightarrow O + O^-$	Attachment	3.6	f (E)	[18]
R ₃	$e + O_2 \Rightarrow O_2^-$	Attachment		$2 \times 10^{-41} (300/T_c)$	[19]
R ₄	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.02	f (E)	[18]
R ₅	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.193	f (E)	[18]
R ₆	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.193	f (E)	[18]
R ₇	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.38	f (E)	[18]
R ₈	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.38	f (E)	[18]
R ₉	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.579	f (E)	[18]
R ₁₀	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2$	Excitation	0.772	f (E)	[18]
R ₁₁	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2 a_1d$	Excitation	0.977	f (E)	[18]
R ₁₂	$e + O_2 a_1d \Rightarrow e + O_2$	Disexcitation	0.977	f (E)	[18]
R ₁₃	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2 b_1s$	Excitation	1.627	f (E)	[18]
R ₁₄	$e + O_2 b_1s \Rightarrow e + O_2$	Excitation	1.627	f (E)	[18]
R ₁₅	$e + O_2 \Rightarrow e + O_2 45$	Excitation	4.5	f (E)	[18]
R ₁₆	$e + O_2 45 \Rightarrow e + O_2$	Disexcitation	4.5	f (E)	[18]
R ₁₇	$e + O_2 \Rightarrow e + O + O$	Excitation	6.1	f (E)	[18]
R ₁₈	$e + O_2 \Rightarrow e + O + O_1S$	Excitation	8.4	f (E)	[18]
R ₁₉	$e + O_2 \Rightarrow e + O + O_1S$	Excitation	9.97	f (E)	[18]
R ₂₀	$e + O_2 \Rightarrow 2e + O_2^+$	Ionization		f (E)	[18]
R ₂₁	$O^- + O_2 \Rightarrow O_3 + e$	Recombination		3×10^{-16}	[20]
R ₂₂	$O^- + O_2 \Rightarrow O + O_2 + e$	Recombination		6.9×10^{-16}	[20]
R ₂₃	$O^- + O_3 + e \Rightarrow O_2 + O_2$	Recombination		1.02×10^{-16}	[20]
R ₂₄	$+ O \Rightarrow O_3 + eO_2^-$	Recombination		1.5×10^{-16}	[20]
R ₂₅	$O_2 + O_2 + O \Rightarrow O_3 + O_2$	Association		6×10^{-46}	[20]
R ₂₆	$+ O \Rightarrow O_2 + eO_2^-$	Recombination		f (E)	[20]
R ₂₇	$O_2 + O_2 \Rightarrow O_3 + O$	Association		2.95×10^{-27}	[20]
R ₂₈	$O_2 + O \Rightarrow O_2 + O^-$	Ionic exchange		1.5×10^{-16}	[20]
R ₂₉	$O^- + O_3 \Rightarrow O_2^- + O_2$	Ionic exchange		3.01×10^{-16}	[20]

النتائج والمناقشة

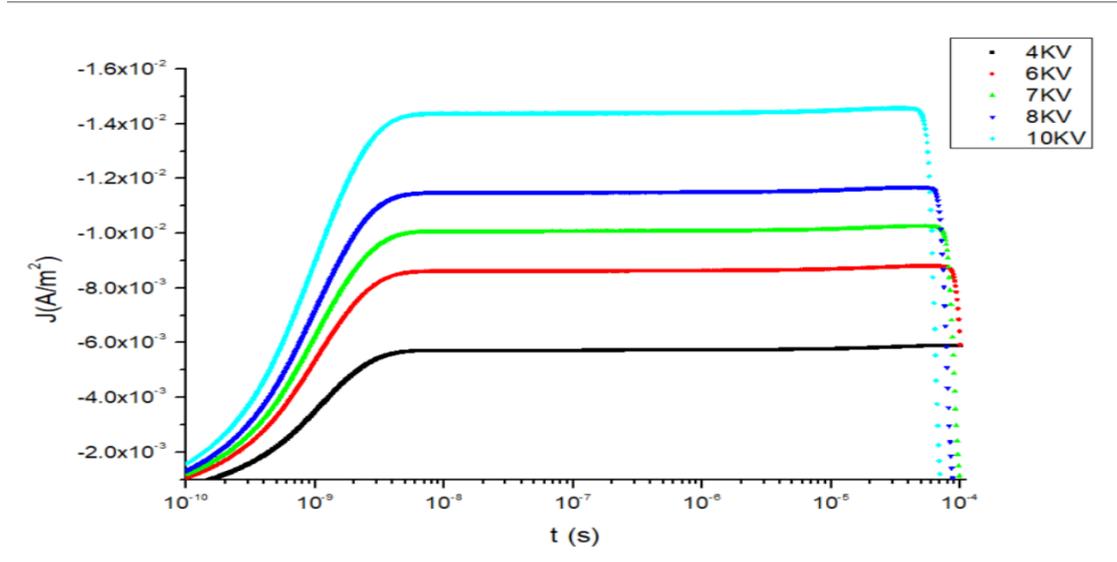
يتم محاكاة نموذج تفريغ الهالة لتشمل ثلاثة أنواع مشحونة (الإلكترونات، الأيونات الموجبة، الأيونات السالبة) حيث يتم من خلال دراسة تأثير تغير فرق الجهد على كثافة تلك الأنواع في هذا النموذج وعند درجة حرارة 300 K

التوزيع الزمني لكثافة التيار الأيوني لقيم مختلفة من فرق الجهد

يبين الشكل (2) العلاقة بين كثافة التيار الأيوني مع تغير زمن الفولتية المسلطة عند خمسة قيم لفروق جهد وهي (7,8,10)KV، بصورة عامة نلاحظ زيادة في التيار بشكل سريع خلال فترة زمنية قصيرة ومن ثم تثبت قيمة التيار عندما تصل الفولتية المسلطة قيمتها العظمى.

حيث يكون نمو التيار من $7.93 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ إلى أن يصل إلى القيمة العظمى عند $5.9213 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ في زمن يتراوح ما بين $1 \times 10^{-10} \mu\text{s}$ إلى $8.02 \times 10^{-5} \mu\text{s}$ عند فرق 4 K V مع زيادة مقدار فرق الجهد إلى 6KV نلاحظ أن التيار

يبقى محافظاً على سلوكه مع تغير ملحوظ في قيمته. حيث أن التيار ينمو من $1.05 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ إلى $8.81 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ خلال الزمن يتراوح بين $1 \times 10^{-10} \text{ s}$ وحتى 4.6110^{-5} s .



الشكل (2) تغير كثافة التيار الايوني مع الزمن عند تغير فرق الجهد

عندما يصل فرق الجهد إلى 7KV نجد أن التيار يبقى محافظاً على سلوكه مع تغير واضح في قيمته، إذ يبدأ التيار بالنمو من $1.18 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ إلى أعلى مقدار له عند $10.25 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ خلال زمن يتراوح بين $1 \times 10^{-10} \text{ s}$ وحتى 10^{-5} s . في حين نلاحظ انه عند فرق جهد 8 KV نجد ان التيار يبقى محافظاً على سلوكه مع تغير واضح في قيمته حيث ينمو من $3.85 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ وحتى أعظم مقدار عند $11.69 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ خلال زمن يتراوح ما بين $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ الى 10^{-5} s . بينما عندما يصل فرق جهد 10 KV نجد ان التيار يبقى بنفس السلوك مع تغير واضح في قيمته حيث ينمو من $3.31 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ وحتى أعلى مقدار عند $14.58 \times 10^{-3} \text{ A/m}^2$ خلال زمن يتراوح ما بين $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ الى 10^{-5} s .

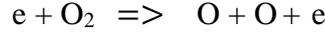
نلاحظ مما سبق ان القيمة العظمى لكثافة التيار ترتفع نحو الاعلى مع زيادة فرق الجهد المسلط ويعزى سبب ذلك انه عند زيادة مقدار فرق الجهد سوف يزيد من سرعة الإلكترونات ويعجلها مما يزيد من طاقتها الحركية وبالتالي يزيد من فرص تصادمها مع الذرات المتعادلة فتؤينها مما يزيد من عدد الأيونات الموجبة والسالبة والإلكترونات وهذا يبين سبب حصولنا على القيمة العظمى لكثافة التيار في فترة زمنية أقل مع زيادة فرق الجهد. إن زيادة مقدار فرق الجهد يزيد من عدد الأيونات الموجبة التي سوف تتجه نحو قطب الهالة السالب مما يقلل من كثافتها ويزيد ايضا من حشد الأيونات الموجبة والإلكترونات من المنطقة ما بين الأقطاب وتوجهها نحو القطب المؤرض وبذلك تقل كثافتها وهذا يوضح سبب التناقص الحاصل في كثافة التيار خلال مدة زمنية أقل مع زيادة فرق الجهد.

التوزيع المكاني لكثافة الإلكترونات عند قيم مختلفة من فرق الجهد

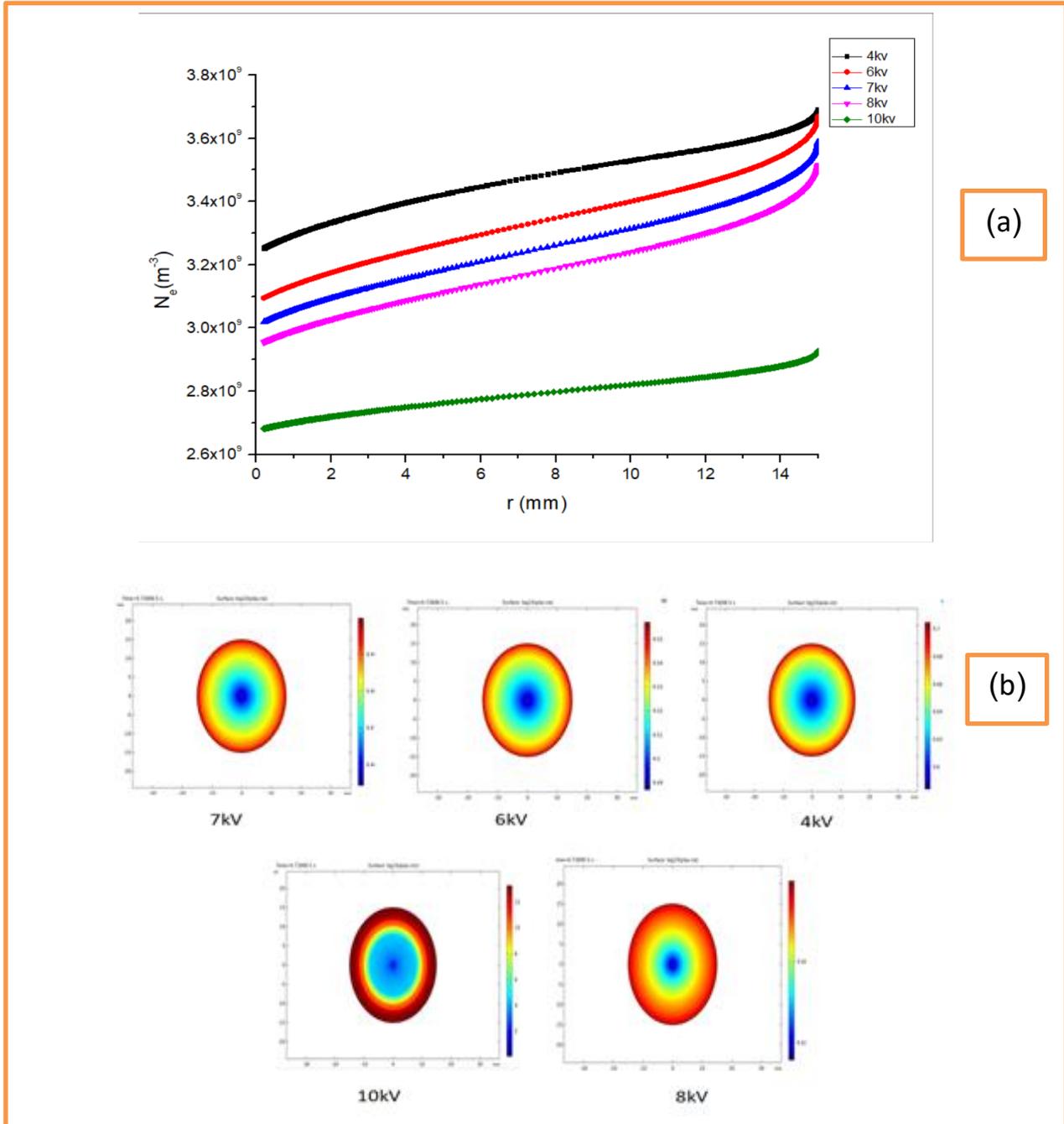
يبين الشكل 3a توزيع كثافة الإلكترونات مكانياً لقيم مختلفة من فرق الجهد عند زمن أعلى قيمة للتيار، إذ نلاحظ من خلال الشكل أن كثافة الإلكترونات تتناقص عند زيادة فرق الجهد، في حين تبلغ كثافة الإلكترونات حوالي $3.25 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ عند فرق جهد 4 KV بينما تصبح كثافة الإلكترونات عند جهد 6 KV تقريباً $3.09 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$.

وعند جهد 7 KV تصبح كثافة الإلكترونات $3.02 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ أما عند جهد (8KV و 10 KV) فيكون مقدار الكثافة $95 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ و $2.10 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ على التوالي وعلى بعد 0.2 mm من القطب السالب للهالة ثم تستقر لمسافة معينة ومن ثم تزداد بالقرب من القطب المؤرض حيث تبلغ كثافتها عند 4KV تقريباً $3.69 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ عند 6 KV تبلغ كثافتها $3.67 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ اما عند 7 و 8 KV و 10 KV فتصبح كثافتها $3.8 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, $3.52 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$, $2.93 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$ على التوالي.

السبب في ذلك يعود لتفاعلات الارتباط حيث أنه بزيادة فرق الجهد تتعجل الإلكترونات وتزداد طاقتها الحركية بحيث أنها تمتلك طاقة كافية لتفكيك جزيئة الاوكسجين عند تصادم معها وينتج عن ذلك إلكترون مع ذرتي اوكسجين وحسب التفاعل الآتي :



الإلكترونات الناتجة التي تمتلك طاقة قليلة يمكنها الارتباط بإحدى ذرتي الاوكسجين الناتجة ولهذا تقل كثافة الالكترونات بزيادة فرق الجهد . أما الإلكترونات التي تمتلك طاقة أكبر فهي تتجه باتجاه القطب المؤرض وتكتسب طاقة إضافية ثم تتصادم مع الذرات المتعادلة لتكوين أيونات موجبة إضافة إلى إلكترونات اضافية نتيجة للتأين وهذا يوضح سبب الزيادة الحاصلة عند نهاية المنحني وكما موضح في الشكل (3b).

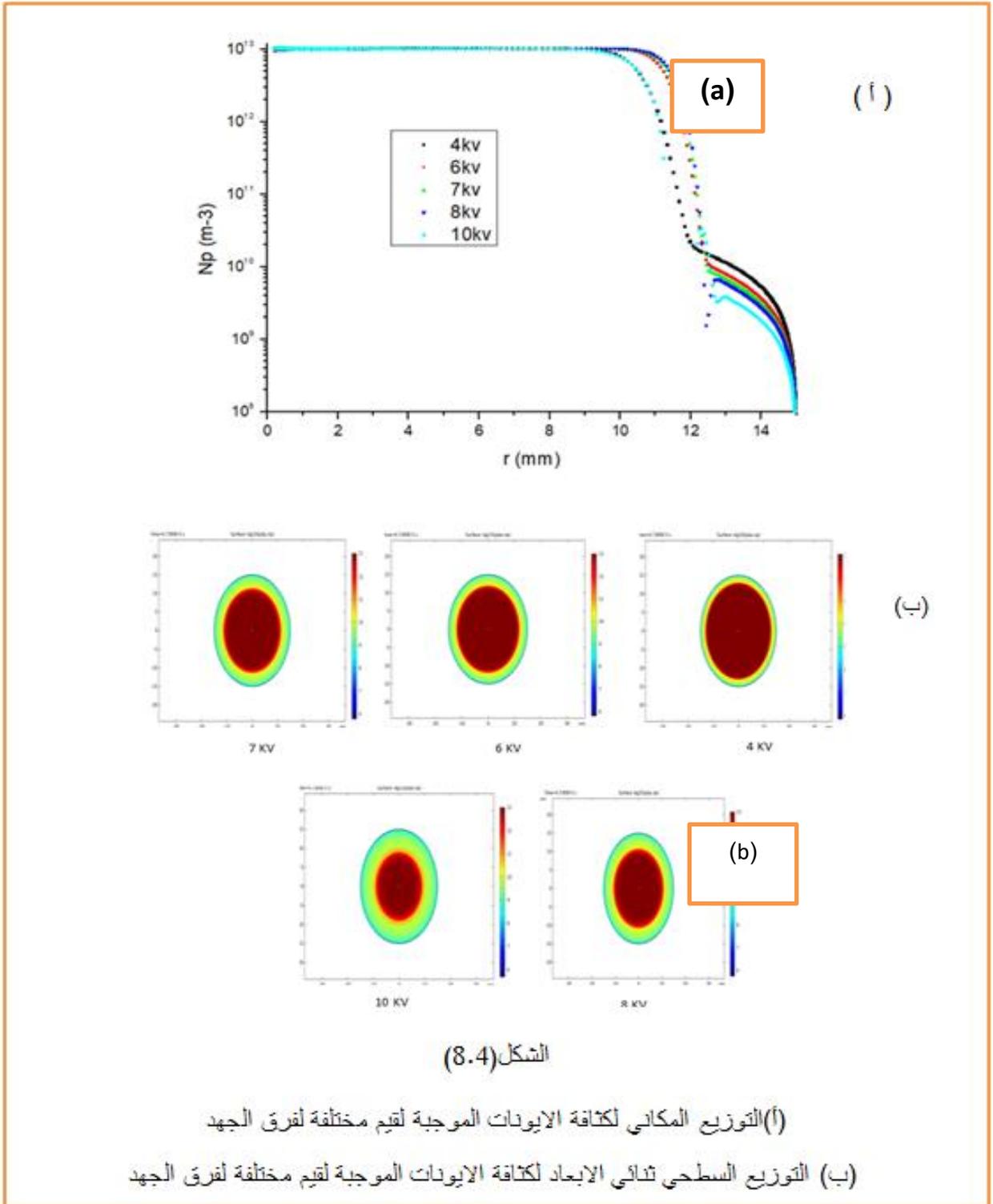


الشكل (3) a. التوزيع المكاني لكثافة الإلكترونات لقيم مختلفة من فرق الجهد عند زمن أعلى قيمة للتيار
الشكل (3) b. التوزيع السطحي ثنائي الأبعاد لكثافة الإلكترون لتفريغ الهالة السالب لقيم مختلفة لفرق الجهد

التوزيع المكاني لكثافة الأيونات الموجبة لقيم مختلفة من فرق الجهد

يبين الشكل (4a) توزيع كثافة الأيونات الموجبة مكانياً مع قيم مختلفة لفرق الجهد المسلط عند زمن أعلى قيمة للتيار. نلاحظ انه مع زيادة فرق الجهد تزداد كثافة الأيونات الموجبة حيث نجد ان تفاعلات توليد الأيونات الموجبة تظهر بشكل مبكر عند قيم الجهد العالي. حيث نجد أنه عند جهد 10 KV تظهر الأيونات الموجبة على بعد (11.5 mm) من القطب السالب للهالة بينما نجد كثافة الأيونات الموجبة عند الجهد الأقل مثلاً 7KV فان كثافة الأيونات تظهر على بعد 12.2 mm من القطب السالب للهالة. أما عند نقصان فرق الجهد فان تفاعلات توليد الأيونات الموجبة تظهر عند مسافة أبعد عن القطب السالب للهالة .

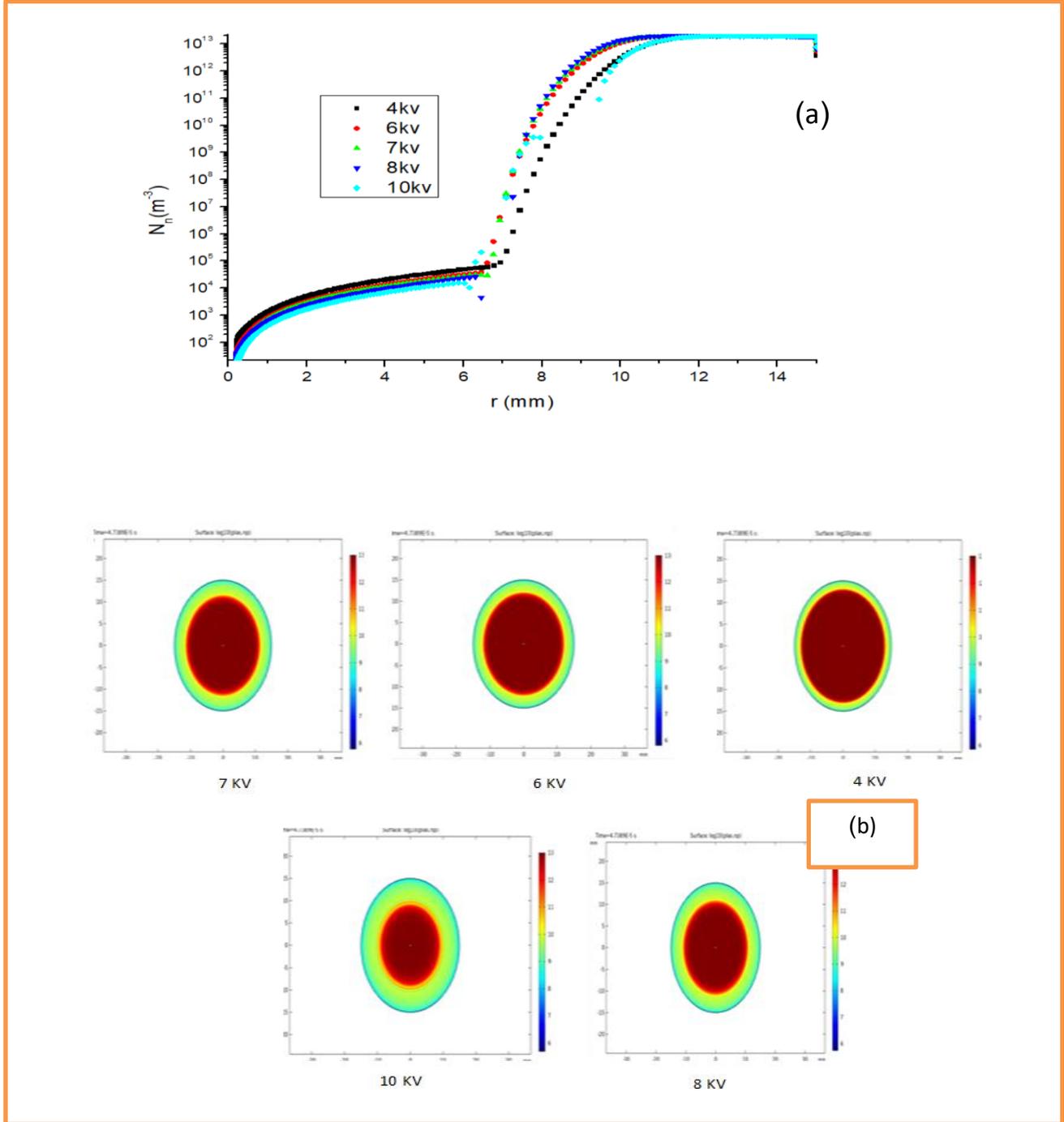
لتفسير ذلك أنه عند الجهد العالي فإن الإلكترونات تكتسب طاقة كافية من فرق الجهد لمثل هكذا تفاعلات فتتصادم مع الذرات المتعادلة فتؤينها وينتج عن هذا التفاعل أيونات موجبة إضافة إلى إلكترونات ثانوية مما يزيد من كثافة هذا النوع من الأيونات . أي أنه كلما كان فرق الجهد أكبر فإن تفاعلات التأين تحدث عند مسافة أقرب إلى قطب الكاثود وكما موضح في الشكل (4b).



الشكل (4) a. التوزيع المكاني لكثافة الايونات الموجبة لقيم مختلفة لفرق الجهد
الشكل (4) b. التوزيع السطحي ثنائي الابعاد لكثافة الايونات الموجبة لقيم مختلفة لفرق الجهد

التوزيع المكاني لكثافة الأيونات السالبة لقيم مختلفة لفرق الجهد

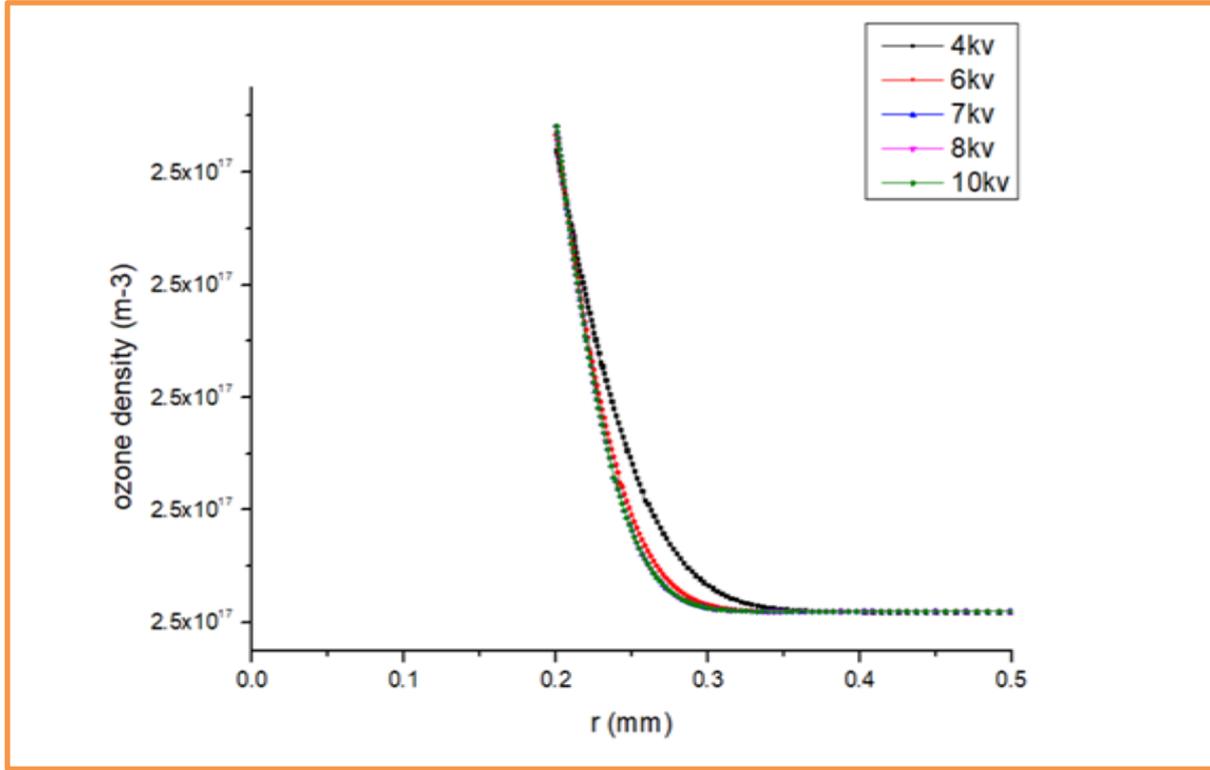
يبين الشكل (5a) التوزيع المكاني للأيونات السالبة مكانياً ولقيم مختلفة من فرق الجهد وعند أعلى زمن للتيار، إذ نلاحظ انه مع زيادة فرق الجهد فان الأيونات السالبة تبتعد عن القطب السالب للهالة، إذ نجد أنه عند جهد 10 KV فان الأيونات السالبة تظهر على بعد 10 mm من القطب السالب للهالة في حين أنه عند قيم الجهد الأقل تظهر عند موقع أقرب من القطب السالب للهالة ، إذ نجدها عند 4 KV تقع على بعد 7 mm بسبب قوة التنافر مع الجهد السالب . والسبب في ذلك أن الجهد السالب يعمل على دفع الأيونات السالبة نتيجة التنافر للانجراف مبتعدة عن الكاثود ولهذا تكون كثافتها قليلة نسبياً في منطقة غلاف الكاثود. بعد ذلك نلاحظ ارتفاع كبير في كثافة الأيونات السالبة حيث أنها تدخل في منطقة الانتشار ولكون أن الأيونات السالبة تكون ثقيلة لذلك تكون حركتها بطيئة و كثافتها عند منطقة الانتشار كبيرة تزامناً مع التزايد الحاصل في فرق الجهد وكما موضح في الشكل (5b).



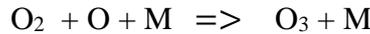
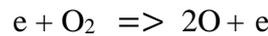
الشكل (5) a. التوزيع المكاني لكثافة الأيونات السالبة عند زمن أعلى قيمة للتيار ولقيم مختلفة مع فرق الجهد
 الشكل (5) b. التوزيع السطحي ثنائي الأبعاد للأيونات السالبة عند زمن أعلى قيمة للتيار ولقيم مختلفة من فرق الجهد

تغير كثافة الاوزون مع فرق الجهد

يبين الشكل (6) التوزيع المكاني لكثافة الأوزون في التيار الأيوني لقيم مختلفة من فرق الجهد . إن كثافة الاوزون تظهر عند القيم العالية لفرق الجهد على مسافة أقرب من القطب حيث نجد أنه عند فرق جهد 10 KV فان الاوزون يظهر على بعد اقل من القطب السالب للهالة مقارنة مع كثافة الاوزون عند 4 KV .



وسبب ذلك يعود إلى أنه عند زيادة فرق الجهد سوف يمتلك الإلكترون طاقة كافية لعملية تفكك الاوكسجين ومن ثم تتفاعل هذه الذرة مع جزيئة اوكسجين لتكوين الاوزون وحسب التفاعل الآتي



يحدث التفكك عند الجهد العالي في نقطة أقرب الى القطب منه عند الجهد الأقل وذلك بسبب أن تأثير الجهد الخارجي على توليد الاوزون لا يكون كبيراً لأن الاوزون يتولد قريباً من القطب السالب للهالة والتي يكون فيها المجال الموضعي الداخلي عالي جداً ومقارب للمجال الخارجي .

الاستنتاجات

القيمة العظمى لكثافة التيار ترتفع نحو الأعلى مع زيادة فرق الجهد المسلط. في حين تنخفض كثافة التيار الأيوني في فترة زمنية أقل عند زيادة فرق الجهد. تنخفض كثافة الاوزون عند زيادة فرق الجهد . أظهرت نتائج التوزيع المكاني لكثافة الالكترونات والأيونات الموجبة والسالبة عند زمن أعلى قيمة للتيار انخفاض في كثافة الالكترونات مع ارتفاع فرق الجهد بالقرب من الكاثود ثم ترتفع قليلاً بالقرب من القطب المؤرض . كذلك هناك زيادة في كثافة الأيونات الموجبة عند ارتفاع فرق الجهد حيث تظهر الأيونات الموجبة في موقع أقرب الى الكاثود عند زيادة فرق الجهد. في حين نلاحظ انخفاض في كثافة الأيونات السالبة عند ارتفاع فرق الجهد في منطقة الانجراف مع ازدياد كثافتها في منطقة الانتشار حيث تظهر الايونات السالبة في موقع ابعد عن الكاثود عند زيادة فرق الجهد.

Acknowledgments

Special thankfulness and gratefulness go to the University of Mosul and the College of Education for Pure Science for their cooperation to carry out this research and also to give me great support and opportunity to study Master in Physics.

المصادر

1. Li, Z.X.; Li, G.F.; Fan, J.B. and Yin, Y., European Transactions on Electrical, 21:11-17 (2011).
2. Oglesby, S. and Nichols, G.B. "Electrostatic precipitation." Marcel Dekker, New York (1978).
3. Holboell, J. and Sverrisson, S., 24th Nordic Insulation Symposium, 24:134-137 (2015).
4. Arora, R. and Mosch, W., 'High Voltage and Electrical Insulation Engineering'. Wiley, Hoboken, NJ, USA. (2011).
5. Jassim, M.K.; Jawad, E.A. and Alsaide, J.K. "Effect of temperature on the working parameters of negative corona discharge with coaxial electrodes configuration." **Iraqi Journal of Science** .:
6. Basirabad, P.D., Electronic Thesis and Dissertation Repository, P 4167 (2016).
7. Tran, T. N.; Golosnoy, I. O.; Lewin P. L. and Georghiou\, G. E." Numerical modelling of negative discharges in air with experimental validation" **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP, 44 (1): 15203 (2011).
8. Panicker, P. K. M.Sc. Thesis, Faculty of the Graduate School, University of Texas (2003).
9. Pontiga, F.; Soria, C.; Castellanos, A; Skanly, J.D. An study of ozone generation by negative corona discharge through different plasma chemistry models, *Ozone Science and Engineering* 24: 447-462. (2002).
10. Chen, J.H; Davidson, J.H. Electron density and energy distributions in the positive DC corona: interpretation for corona-enhanced chemical reactions, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 22: 199-224 (2002) .
11. Adamiak, K. ; Atten, P. Simulation of corona discharge in pointeplane configuration, **Journal of Electrostatics** 61: 85-98 (2004)
12. Veldhuizen, E . M. 'Electrical Discharges for Environmental Purposes: Fundamentals and Applications', Nova Science Publishers, New York (2000).
13. Karman, G., M.Sc. Thesis, Division of High Voltage Engineering, Chalmers University of Technology (2013).
14. Chen, J. and Davidson, J.H., *Plasma Chem. Plasma Process*, 23(1): 83-102 (2003).
15. Kim, N.; Lee, S.; Georghiou, G.E. and Kim, D., *J. Electr. Eng. Tech.*, 7(1):97-102 (2012).
16. Yanallah, K.; Pontiga, F. and Castellanos, A., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 44(5):55201 (2011).
17. Saleh, Dawood N.; Algwari, Qais Th. And Amouri, Farook Kh. Modeling the dependence of the negative corona current density on applied voltage rise time : **Phys. Plasmas** 27, 073501 (2020).
18. BOLSIG+, Electron Boltzmann equation solver. <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr>.
19. Liu, K.L.; Liao, R.J. and Zhao, X.T., *J. Electr. Eng. Technol.*, 10(4):1804-1814 (2015).
20. LXCAT, "Electron scattering database." University of Toulouse, France. www.lxcat.net. (2017).