

**ORIGINAL ARTICLE****Investigating the effect of physical and electrical parameters of a cold plasma device on the pest of storage beans****Mohammad Zabihinpour\***

1 Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran.

**Correspondence**

Name

Email: [m\\_zabihin@pnu.ac.ir](mailto:m_zabihin@pnu.ac.ir)**ABSTRACT**

in recent years, using cold plasma as non - thermal and non - thermal environments has attracted a wide attention in the field of sterilization and control of stored food pests. in this research, the performance of cold plasma system of dielectric barrier (DBD) in biological inactivation of important stored pests, with concentration on physical - mathematical analysis of process and investigating the effect of electrical and geometrical parameters and for storage pest, four point cowpea weevil, was studied. the governing equations of the reduced field, electron density and the rate of production of active oxygen and nitrogen species are analytically studied and their direct relation with the efficiency of the pest is explained. the results show that increasing the applied voltage and reducing the distance of the electrodes will result in an exponential growth in the density of electrons and the increase in ros production rate; species that play a major role in the destruction of cell walls, proteins and dna of pests. the kinetic analysis of pest population decreased that the percentage of pest was limited to time of treatment and electrical parameters of the system so that about 100 % of adult insect pests were available, even for a short period of about s4. comparison of different plasma structures showed that the DBD system has a higher efficiency than the local plasma, due to the uniformity of field and appropriate volume covering.

**KEYWORDS**

Cold plasma, DBD, storage beans, food safety

**How to cite**

©, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.

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

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir/>

نشریه علمی

## اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

## بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی یک دستگاه پلاسمای سرد DBD بر آفت کشی حبوبات انباری

سید محمد ذبیحین پور

## چکیده

در سال های اخیر، استفاده از پلاسمای سرد به عنوان یک فناوری غیرحرارتی و دوستدار محیط زیست، توجه گسترده ای را در حوزه ضد عفونی و کنترل آفات انباری مواد غذایی به خود جلب کرده است. در این پژوهش، عملکرد سامانه پلاسمای سرد نوع شکست سد دی الکتریک (DBD) در غیرفعال سازی زیستی آفات انباری مهم، با تمرکز بر تحلیل فیزیکی ریاضی فرایند و بررسی تاثیر پارامترهای الکتریکی و هندسی و برای نمونه آفت انباری، سوسک چهار نقطه ای حبوبات، مورد مطالعه قرار گرفته است. روابط حاکم بر میدان کاهش یافته، چگالی الکترونی و نرخ تولید گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن به صورت تحلیلی بررسی شده و ارتباط مستقیم آن ها با راندمان آفت کشی تبیین گردیده است. همانگونه که روابط مربوطه نشان می دهد افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش فاصله الکترودها، از طریق افزایش میدان الکتریکی مؤثر، منجر به رشد نمایی چگالی الکترون ها و افزایش نرخ تولید ROS می شود؛ گونه هایی که نقش اصلی در تخریب دیواره سلولی، پروتئین ها و DNA آفات ایفا می کنند. تحلیل سینتیکی کاهش جمعیت آفات نشان داد که می توان درصد آفت کشی را به طور کمی به زمان تیمار و پارامترهای الکتریکی سامانه مرتبط ساخت به گونه ای که حدود بازده ۱۰۰٪ آفت کشی حشرات بالغ نمونه، حتی برای زمانهای کوتاهی در حدود 4s هم کاملاً در دسترس است. همچنین مقایسه ساختارهای مختلف پلاسما نشان داد که سامانه DBD به دلیل یکنواختی میدان و پوشش حجمی مناسب، کارایی بالاتری نسبت به پلاسماهای موضعی نظیر پلاسما سوزنی دارد.

## واژه های کلیدی

پلاسمای سرد، شکست سد دی الکتریک، آفت کشی حبوبات انباری، سوسک چهار نقطه ای حبوبات، ایمنی غذایی

۱ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول:

رایانامه: m\_zabihin@pnu.ac.ir

استناد به این مقاله:

تشریح نمود. در این مطالعات، تأکید شد که گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن تولیدشده در پلاسما نقش اصلی را در تخریب دیواره سلولی، پروتئین‌ها و DNA میکروارگانیسم‌ها ایفا می‌کنند [۱].

در اواسط دهه ۲۰۱۰، با افزایش نگرانی‌ها درباره اثرات منفی روش‌های سنتی ضدعفونی نظیر تیمار حرارتی، مواد شیمیایی و پرتودهی، توجه به فناوری‌های غیرحرارتی افزایش یافت. پلاسما سرد به دلیل عدم افزایش محسوس دما و عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی، به سرعت به عنوان گزینه‌ای جایگزین مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات متعدد نشان دادند که پلاسما سرد قادر است طیف وسیعی از پاتوژن‌های غذایی نظیر اشرشیاکلی<sup>۴</sup>، سالمونلا<sup>۵</sup> و لیستریا<sup>۶</sup> را با راندمان بالا غیرفعال کند، در حالی که کیفیت حسی و تغذیه‌ای محصول تقریباً حفظ می‌شود. این نتایج باعث شد که پژوهش‌های کاربردی در زمینه میوه‌ها، سبزیجات، گوشت، غلات و محصولات آردی به طور قابل توجهی افزایش یابد [۲].

برنج و آرد گندم و غلاتی مانند عدس به دلیل ساختار فیزیکی خاص و سطح تماس بالا، از جمله مواد غذایی مستعد آلودگی و آفات مختلف محسوب می‌شوند. در اواخر دهه ۲۰۱۰، پژوهش‌هایی به طور خاص بر کاربرد پلاسما سرد در ضدعفونی غلات تمرکز کردند. این مطالعات نشان دادند که تیمار پلاسما سرد DBD می‌تواند کاهش ۱ تا ۳ لگاریتمی بار میکروبی را بدون ایجاد تغییر معنی‌دار در خواص پروتئینی و عملکردی آرد ایجاد کند [۳].

علاوه بر این، بررسی‌های سینتیکی نشان دادند که غیرفعال‌سازی میکروبی در این سامانه‌ها غالباً از مدل مرتبه اول پیروی می‌کند و شدت فرآیند به پارامترهای الکتریکی نظیر ولتاژ، فرکانس و فاصله الکترودها وابسته است [۴].

افزایش جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی و حساسیت روزافزون مردم به ایمنی غذایی، ضرورت توسعه روش‌های نوین و پایدار برای فرآوری و نگهداری مواد غذایی را برجسته کرده است. روش‌های سنتی آفت‌کشی و ضدعفونی مواد غذایی شامل استفاده از حرارت‌دهی، بخار، مواد شیمیایی و تابش اگرچه مؤثرند، اما می‌توانند موجب تغییر خواص و یا کاهش فعالیت آنزیمی مطلوب و افت کیفیت و یا باقی‌مانده‌های نامطلوب در مواد غذایی شوند.

پلاسما سرد<sup>۱</sup> به عنوان یکی از فناوری‌های نوین غیرحرارتی، در دو دهه اخیر به طور گسترده‌ای برای کاربردهای زیستی و صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه علم پلاسما از اوایل قرن بیستم به عنوان شاخه‌ای از فیزیک مطرح بوده است، اما استفاده از پلاسما سرد در ضدعفونی مواد غذایی سابقه‌ای نسبتاً جدید دارد و عمدتاً به پیشرفت‌های فناوری تخلیه‌های الکتریکی در فشار اتمسفری بازمی‌گردد.

مطالعات اولیه پیرامون پلاسما، عمدتاً بر پلاسما داغ و کاربردهای آن در فیزیک پایه و صنایع سنگین متمرکز بودند. با توسعه منابع تخلیه الکتریکی فشار اتمسفری، به‌ویژه تخلیه‌های نوع شکست سد دی‌الکتریک<sup>۲</sup> (DBD) و پلاسماهای جت، امکان تولید پلاسما غیرتعادلی با دمای گاز نزدیک به دمای محیط فراهم شد. این پیشرفت، نقطه عطفی برای ورود پلاسما به حوزه‌های زیستی و غذایی بود. نخستین بررسی‌های منسجم در مورد استفاده از پلاسما سرد برای ضدعفونی مواد غذایی در اوایل دهه ۲۰۱۰ منتشر شدند. در این میان، مقاله مرووری نیمیرا<sup>۳</sup> یکی از اولین منابعی است که پلاسما سرد را به عنوان یک فناوری نوظهور برای ضدعفونی مواد غذایی معرفی کرد و مکانیسم‌های احتمالی غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها را

<sup>4</sup> Escherichia coli

<sup>5</sup> Salmonella

<sup>6</sup> Listeria

<sup>1</sup> Cold Plasma

<sup>2</sup> Dielectric Barrier Discharge

<sup>3</sup> Niemira

در دهه ۲۰۲۰، پژوهش‌ها از مرحله اثبات مفهوم فراتر رفته و به سمت بهینه‌سازی فرآیند، طراحی راکتور و توسعه کاربردهای صنعتی حرکت کردند. یکی از مهم‌ترین دستاوردها در این دوره، معرفی مفهوم پلاسمای سرد درون‌بسته‌بندی بود که امکان ضدعفونی محصول نهایی در بسته‌بندی را فراهم می‌کند. این رویکرد خطر آلودگی ثانویه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و گامی مهم در جهت کاربرد صنعتی پلاسمای سرد محسوب می‌شود [۵].

مرور پژوهش‌های جامع منتشرشده در سال‌های اخیر نشان می‌دهند که پلاسمای سرد نه تنها به‌عنوان یک ابزار ضدعفونی، بلکه به‌عنوان یک فناوری چندمنظوره برای افزایش ماندگاری، اصلاح سطحی و بهبود ایمنی مواد غذایی مطرح است. این روند نشان می‌دهد که پلاسمای سرد طی مدت کوتاهی از یک موضوع پژوهشی نوظهور به یک فناوری امیدوارکننده و قابل استفاده در صنایع غذایی تبدیل شده است [۶].

لذا دهه گذشته شاهد افزایش پژوهش‌های مختلف در بررسی کاربردهای بالقوه پلاسمای غیرحرارتی در زمینه مواد غذایی به عنوان راهکاری مطلوب بوده است و یک تلاش علمی چندرشته‌ای برای اثبات کارایی این فرایند در طیف وسیعی از کاربردهای پلاسمای سرد، از جمله خواص ضد میکروبی، آفت‌کشی، عملکردسازی (غنی‌سازی) مواد غذایی و تصفیه پسماندها آغاز شده است. همچنین ایده‌های جدیدی در مورد تعامل گونه‌های پلاسمای سرد با مواد غذایی و مکانیسم‌های عمل آن‌ها نیز در حال ظهور است. یکی از مزایای کلیدی به‌کارگیری فناوری پلاسمای سرد در صنعت مواد غذایی، ترکیب منحصر به فردی از گونه‌های متعدد واکنش‌پذیری است که این روش فراهم می‌کند و اغلب پلاسمای سرد به دلیل مکانیسم‌های چندوجهی و عملکرد ضد میکروبی‌اش مورد استناد قرار می‌گیرد. که در نتیجه آن، مقاومت ذاتی اندکی در برابر کارایی آن وجود دارد. همچنین،

این عملکرد چندوجهی برای کاربردهای متعدد اصلاح مواد غذایی کارایی خود را نشان داده است. گونه‌های واکنش‌پذیر ایجاد شده توسط پلاسمای سرد دارای طیف گسترده‌ای از طول عمر (از نانوثانیه تا ساعت‌ها) هستند که هم به شرایط پلاسمای و هم به مواد واکنش‌پذیر موجود (مانند مواد آلی) وابسته است.

همچنین در این پژوهش‌ها، ابعاد مختلف استفاده از این فناوری مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه در ۲۰۱۸، بورک<sup>۱</sup> و همکاران پتانسیل پلاسمای سرد برای تولید غذای ایمن و پایدار و در ۲۰۲۱ زیزوینا<sup>۲</sup>، کنترل آفات حشرات توسط پلاسمای سرد را مورد بررسی قرار دادند و یا در ۲۰۲۲ جیانگ و همکاران با پژوهش در زمینه نگهداری غذا با پلاسمای سرد ناشی از تخلیه سد دی الکتریک در صنایع کشاورزی-غذایی و ذبیحین پور با طراحی و ساخت دستگاه پلاسمای سرد اتمسفریک مناسب صنایع غذایی این مسیر را ادامه دادند. در سال جاری نیز لیو<sup>۳</sup> و همکاران، پیشرفت‌های حاصل شده در فناوری پلاسمای سرد اتمسفریک برای ایمنی، عملکرد و پیامدهای کیفیت مواد غذایی گیاهی را بررسی کردند و یا در ۲۰۲۴ تاثیر پلاسمای سرد در کنترل آفت انباری سوسک دندانه دار غلات بررسی گردید. [۷-۱۱].

در این پژوهش نیز تاثیر تغییر مشخصه‌های هندسی و الکتریکی یک دستگاه پلاسمای سرد تخلیه سد دی الکتریک بر سوسک دندانه دار غلات (عدس) که از لحاظ اقتصادی یکی از مهمترین آفات انباری در جهان و ایران به شمار می‌آید، بررسی شده است.

### دستگاه پلاسمای سرد شکست دی الکتریک

فناوری پلاسمای سرد به‌عنوان یک فناوری سبز و غیرحرارتی، توجه گسترده‌ای را در صنایع غذایی به خود جلب کرده است. به‌ویژه پلاسمای سرد نوع شکست سد دی الکتریک (DBD)

<sup>3</sup> Liu

<sup>1</sup> Bourke

<sup>2</sup> Ziuzina

به دلیل سادگی طراحی، امکان کار در فشار اتمسفری و کنترل پذیری بالا، گزینه ای مناسب برای ضد عفونی بسیاری از غلات یا مواد غذایی حساس محسوب می شود.

در سامانه های DBD، اختلاف پتانسیل متناوب یا پالسی بالایی (چند کیلوولت) بین دو الکترود اعمال می شود که حداقل یکی از آن ها با لایه ای دی الکتریک پوشیده شده است. این دی الکتریک مانع عبور جریان پیوسته شده و تخلیه را به صورت ریزتخلیه های کوتاه عمر<sup>۱</sup> در می آورد. ویژگی کلیدی این فناوری، عدم تعادل حرارتی است. زیرا در این محیط، الکترون ها دارای انرژی بالا، در حالیکه انرژی و دمای گونه های سنگین (یون ها و مولکول ها) در دمای نزدیک به محیط باقی می ماند. این ویژگی امکان انجام واکنش های شیمیایی فعال بدون آسیب حرارتی به مواد غذایی را فراهم می کند.

از طرفی دیگر در فناوری DBD، مشخصات فیزیکی دستگاه و نحوه چیدمان آن تأثیر مستقیمی بر ویژگی های پلاسمای تولید شده و در نتیجه کارایی آن در مواد غذایی دارد. در این روش، یک دی الکتریک (که معمولاً از جنس شیشه، کوارتز یا سرامیک است) بین دو الکترود قرار می گیرد که وظیفه اصلی آن محدود کردن جریان و جلوگیری از تبدیل تخلیه به "آرک" یا قوس الکتریکی گرم است. این امر باعث می شود پلاسمای در دمای اتاق باقی بماند که برای مواد غذایی حساس به حرارت، حیاتی است. همچنین دی الکتریک باعث می شود که تخلیه به صورت میکروتخلیه های متعدد و پراکنده در کل سطح پخش شود که منجر به تولید یکنواخت گونه های واکنش پذیر می شود. همچنین فاصله بین الکترودها، یکی از حیاتی ترین مشخصات فیزیکی است و هرچه فاصله بیشتر باشد، ولتاژ بالاتری برای یونیزه کردن گاز و ایجاد شکست الکتریکی نیاز است. فاصله کمتر، معمولاً منجر به شدت میدان الکتریکی بالاتر و تولید بیشتر اوزون ( $O_3$ ) و اکسیدهای نیتروژن می شود، اما اگر

فاصله خیلی کم باشد، فضای کافی برای عبور محصول یا جریان گاز وجود نخواهد داشت. همچنین هندسه الکترودها می تواند مستقیماً روی محصول یا غلاف بسته بندی آنها اثرات متفاوتی داشته باشد. مثلاً الکترودهای تخت، برای تیمار سطوح صاف و یکنواخت مناسب هستند و الکترودهای سوزنی یا سیمی، باعث تمرکز میدان الکتریکی در نقاط تیز شده و چگالی پلاسمای بالاتری ایجاد می کنند که برای نفوذ در بافت های پیچیده مواد غذایی موثرتر است. همچنین فرکانس و شکل موج ولتاژ اگرچه یک پارامتر الکتریکی است، اما با فیزیک دستگاه گره خورده است و فرکانس بالا، باعث افزایش برخورد الکترون ها و در نتیجه افزایش دمای گاز می شود (که باید کنترل شود تا به ماده غذایی آسیب نرسد) و استفاده از ولتاژ پالسی اجازه می دهد تا بدون گرم شدن گاز، گونه های بسیار واکنش پذیر و پرانرژی تولید شوند.

می دانیم که رابطه میان میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل با رابطه

$$E = V / d \quad (1)$$

مشخص می گردد و افزایش ولتاژ  $V$  یا کاهش فاصله  $d$  باعث افزایش میدان الکتریکی و انرژی الکترون ها و در نتیجه افزایش برخوردهای مؤثرتر الکترون ها با مولکول های هوا و نهایتاً تولید بیشتر گونه های فعال خواهد شد. البته این افزایش میدان در فشار و محیط جو محدود به میدان شکست الکتریکی هوا یعنی ۳ مگا ولت بر متر می باشد تا از تشکیل قوس الکتریکی و تخلیه الکتریکی در دستگاه DBD جلوگیری گردد. بنابراین مقدار پتانسیل الکتریکی و فاصله میان الکترودهای لازم برای دستیابی به محیط پلاسمای غیرحرارتی بهینه، سوالی مهمی است. یک پاسخ تجربی توسط پاشن<sup>۲</sup> در قرن نوزدهم برای این سوال مطرح شد. او مشخص کرد که وقتی دو الکترود با فاصله  $d$  از هم جدا

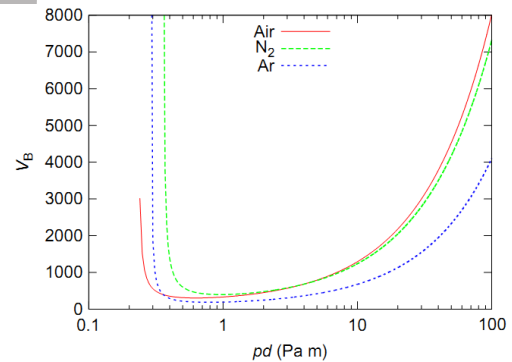
<sup>2</sup> Paschen

<sup>1</sup> microdischarges

می شوند، حداقل ولتاژی که باید برای شروع یک شکست اعمال شود، توسط معادله زیر داده می شود [12]:

$$V_B = \frac{Apd}{\ln(Bpd)+C} \quad (2)$$

که در آن  $V_B$  ولتاژ شکست،  $p$  فشار بر حسب پاسکال و  $d$  بر حسب متر است، همچنین  $A$ ،  $B$  و  $C$  ضرایبی هستند که هم به نوع گاز و هم به جنس الکترود بستگی دارند. نمونه‌هایی از منحنی‌های پاشن در شکل ۱ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱- منحنی پاشن برای آرگون، نیتروژن و هوای خشک [۲].

یکی از ویژگی‌های همه این منحنی‌ها، وجود حداقل ولتاژ شکست است، که توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$V_{B,min} = \exp(l) \frac{AC}{B} \quad (3)$$

که خود شبیه معادله:

$$(pd)_{min} = \exp(l) \frac{C}{A} \quad (4)$$

می‌باشد. برای  $pd$  حدود یک پاسکال متر، حداقل ولتاژ شکست معمولاً در محدوده ۵۰۰-۱۰۰ ولت رخ می‌دهد. این بدان معنی است که در فشار اتمسفر، شکاف الکترود که در آن حداقل ولتاژ شکست رخ می‌دهد، حدود ۱۰ میکرومتر است. اما اکثر دستگاه‌هایی که برای تولید پلاسما در فشار اتمسفر استفاده می‌شوند، دارای ویژگی‌هایی با ابعاد بزرگتر هستند و بنابراین طبق قسمت سمت راست منحنی پاشن عمل می‌کنند [۱۳].

در حالت کلی دو مکانیسم فیزیکی اساسی شکل منحنی پاشن را تعیین می‌کنند. اولی یونیزاسیون موثر الکترود در فاز گازی بوده و دومی به انتشار ثانویه از الکترودها معروف است. در فرآیند دوم، یونی که به کاتد برخورد می‌کند، با احتمال مشخصی، باعث گسیل یک الکترون دیگر می‌شود. این احتمال که به طور معمول با  $\gamma$  نشان داده می‌شود، به مواد

الکترود بستگی دارد، اما اغلب مقداری کوچک دارد ( $\gamma \leq 0.01$ ). هر یک از الکترونهای ثانویه در سراسر شکاف الکترود حرکت کرده و در نهایت در آن جذب می‌شود. فرآیند شکست تنها در صورتی می‌تواند آغاز شود که این فرآیندها، باعث افزایش خالصی در تعداد ذرات باردار گردد. این شرایط شکست مستلزم آن است که برای هر الکترون ساطع شده از کاتد، حداقل  $1/\gamma$  یون جدید در برخورد الکترود و یونیزاسیون در فضای بین الکترودها تولید شود [۲].

شکل کلی منحنی پاشن به رابطه بین مسیر آزاد میانگین الکترود و شکاف الکترود بستگی دارد. در سمت چپ مینیمم پاشن، میانگین مسیر آزاد ممکن است بزرگتر از فاصله باشد. در این حالت، فرکانس برخورد الکترود کم است و میدان الکتریکی بزرگی برای اطمینان از اینکه هر الکترون برخوردی دارای انرژی کافی برای تولید یونیزاسیون است، مورد نیاز است. در سمت راست مینیمم پاشن، تعداد زیادی مسیر آزاد برای حرکت الکترود بین الکترودها وجود دارد. در این حالت، سیستم به یک تفاوت پتانسیل معین به ازای مسیر آزاد میانگین برای حفظ فرکانس یونیزاسیون قابل ملاحظه نیاز دارد. به طوری که ولتاژ شکست یک تابع تقریباً خطی از حاصل  $pd$  است. این ترکیب از یونیزاسیون فاز گازی و انتشار ثانویه از کاتد به نام فرآیند شکست تاونسند نامیده می‌شود. یک فرض مکانیسم شکست تاونسند این است که توده بارهای مرتبط با شروع فرآیند یونیزاسیون، بر میدان الکتریکی تاثیری ندارند. اما اگر میدان ناشی از بارهای فضایی با میدان اعمال شده قابل مقایسه باشد، موضوع متفاوت بوده و مکانیسمهای مهمی ایجاد می‌شوند. هنگامی که شکست از یک جفت یون الکترود منفرد آغاز شود، الکترود از سمت کاتد حرکت کرده و در حین حرکت باعث یونیزاسیون می‌شوند. یونیزاسیون پیاپی صورت گرفته و الکترود اولیه به ابری از الکترود تبدیل می‌شود. حرکت این الکترودها ترکیبی از انتشار به دلیل حرکت تصادفی تک‌تک الکترودها و رانش به دلیل میدان الکتریکی که برای هر یک از الکترودها یکسان است، خواهد بود. در

$$C_{total} = \frac{C_g \times C_d}{C_g + C_d} \quad (6)$$

که در آن  $C_{total}$  ظرفیت خازنی کل سامانه (DBD) (که پاسخ الکتریکی کل را تعیین می کند.) و  $C_g$ ، ظرفیت خازنی ناحیه گازی بین الکترودها که پلاسما در آن تشکیل می شود (که این پارامتر بیانگر توانایی ناحیه تخلیه در ذخیره انرژی الکتریکی است.) و نهایتاً  $C_d$ ، ظرفیت خازنی لایه دی الکتریک (که نقش کلیدی در محدودسازی جریان و جلوگیری از تشکیل قوس الکتریکی ایفا می کند.)، می باشد. این مدل توضیح می دهد چگونه دی الکتریک با ذخیره بار، جریان را محدود و پایداری پلاسما را تضمین می کند. در واقع این مدل نشان می دهد که وجود دی الکتریک باعث کاهش ظرفیت کل سامانه شده و در نتیجه جریان تخلیه به صورت خود محدودشونده باقی می ماند، که ویژگی اساسی پلاسمای سرد DBD است [۱۶].

همچنین باید توجه داشت که ظرفیت خازنی ناحیه گازی بصورت:

$$C_g = \frac{\epsilon_0 \times A}{d_g} \quad (7)$$

تعریف می شود که در آن  $\epsilon_0$ ، ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و  $A$ ، سطح مؤثر الکترودها ( $m^2$ ) که در تخلیه شرکت می کنند و  $d_g$ ، فاصله مؤثر بین الکترودها یا ضخامت ناحیه گازی ( $m$ ) می باشد.

لذا کاهش فاصله بین الکترودها یا افزایش سطح آن ها باعث افزایش ظرفیت خازنی ناحیه گاز و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی می شود و این پارامتر مستقیماً بر چگالی الکترون ها و نرخ تولید گونه های فعال شیمیایی اثر می گذارد [۱۷-۱۸].

همچنین در DBD توجه به ظرفیت خازنی لایه دی الکتریک که به صورت:

$$C_d = \epsilon_0 \frac{A \cdot \epsilon_r}{d_d} \quad (8)$$

بیان می شود، بسیار مهم است، که در آن  $\epsilon_r$  ثابت دی الکتریک نسبی ماده دی الکتریک (بدون بعد) می باشد و

نتیجه، ابر الکترونی یک کره در حال انبساط را تشکیل می - دهد که به سمت آند رانش می شود و البته یونها بسیار کندتر به سمت کاتد حرکت می کنند. این فرآیند، جداسازی بار فضایی را ایجاد می کند، یعنی بار منفی در ابر الکترونی در حال حرکت و بار مثبت در ناحیه ای که در آن الکترون ها پس زده شده اند. این توزیع بار فضایی، یک میدان الکتریکی ایجاد می کند، و اگر این میدان الکتریکی با میدان الکتریکی اعمال شده، قابل مقایسه باشد، مکانیسم تاونسند دیگر اعمال نمی شود. در این شرایط ممکن است که الکترون ها به نواحی دارای بار فضایی مثبت مانند آند رانش شوند و شکست های ثانویه رخ دهد. اولین بار این مکانیسم با معیار رادر-میک<sup>۱</sup> بصورت زیر تعریف شد:

$$\alpha \left( \frac{E}{N} \right) d \approx 20 \quad (5)$$

که در آن،  $\alpha$  اولین ضریب یونیزاسیون تاونسند است. در این رابطه، میدان الکتریکی نه تنها تابعی از ولتاژ اعمال شده، بلکه همچنین تابعی از توزیع بار در شکاف است. این موضوع تاثیر زیادی روی ولتاژ شکست نداشته اما ساختار فضایی پلاسمای در حال ایجاد را به شدت تغییر می دهد. شکست تاونسند، پلاسمایی تولید می کند که فضای بین الکترودها را به طور یکنواخت پر می کند، در حالی که مکانیسم رادر-میک منجر به شکست استریمیر و تولید پلاسما با ساختار فضایی پیچیده که معمولاً مطلوب نیست، می گردد. زیرا پلاسمایی تولید خواهد کرد که فقط بخش کوچکی از حجم موجود را پر کرده و اغلب منجر به تولید حرارت می شود [۱۴-۱۵].

همچنین می توان برای سامانه پلاسمای سرد DBD، یک مدل خازنی تعریف کرد. در تخلیه های نوع شکست سد دی الکتریک (DBD)، رفتار الکتریکی سامانه را می توان به طور مؤثر با یک مدل خازنی سری شده شامل ناحیه گاز و لایه دی الکتریک توصیف کرد. این مدل به طور گسترده در تحلیل فیزیکی و مهندسی پلاسماهای فشار اتمسفری به کار می رود [۱، ۲]. رابطه خازن معادل به صورت زیر بیان می شود:

به عنوان مثال برای شیشه‌های مختلف در بازه ۴ تا ۷ و برای کوارتز برابر ۳/۸ می‌باشد. همچنین  $d_d$  به عنوان ضخامت لایه دی‌الکتریک بر حسب متر در نظر گرفته می‌شود. باید در نظر داشت که افزایش ضخامت دی‌الکتریک یا کاهش ثابت دی‌الکتریک باعث کاهش ظرفیت خازنی شده و در نتیجه جریان تخلیه محدودتر می‌شود. این ویژگی از تشکیل قوس جلوگیری کرده و تخلیه را در قالب ریزتخلیه‌های گذرا نگه می‌دارد [۱۹].

نکته مهم دیگر، تجمع بار سطحی روی دی‌الکتریک است زیرا در حین تخلیه، بارهای الکتریکی روی سطح دی‌الکتریک تجمع می‌یابند که چگالی بار سطحی تجمع‌یافته روی دی‌الکتریک  $(C/m^2)$   $\sigma$  به صورت:

$$\sigma(t) = \int J(t)dt \quad (9)$$

بیان می‌شود، که در آن  $J(t)$ ، چگالی جریان عبوری از پلاسما بر حسب  $(A/m^2)$  می‌باشد. این رابطه مشخص می‌سازد که تجمع بار سطحی باعث ایجاد میدان الکتریکی مخالف میدان اعمالی می‌شود که در نهایت ریزتخلیه را خاموش می‌کند. این مکانیسم، عامل اصلی پایداری پلاسمای سرد و جلوگیری از افزایش دما است. از طرف دیگر میدان الکتریکی القاشده توسط بارهای سطحی را می‌توان با رابطه  $E_{induced} = \sigma / \epsilon_0$  نشان داد. این میدان در جهت مخالف میدان اعمالی عمل کرده و باعث کاهش مؤثر میدان در ناحیه گازی می‌شود و زمانی که میدان کل به زیر آستانه شکست برسد، تخلیه متوقف می‌شود [۲۰]. همچنین توان متوسط مصرفی پلاسمای DBD را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P = \frac{1}{T \int_0^T V(t)I(t)dt} \quad (10)$$

که در آن  $P$ ، توان متوسط پلاسما بر حسب وات و  $V(t)$  ولتاژ لحظه‌ای اعمالی بر حسب ولت و  $I(t)$  جریان لحظه‌ای تخلیه بر حسب آمپر و  $T$  دوره زمانی سیگنال ولتاژ بر حسب ثانیه

می‌باشد. باید توجه داشت که توان مصرفی شاخصی از دوز پلاسمایی است که مستقیماً با راندمان آفت کشی و یا غیرفعال‌سازی میکروبی مرتبط است زیرا افزایش توان معمولاً باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن می‌شود، اما افزایش بیش از حد آنها، می‌تواند باعث آسیب به کیفیت ماده غذایی گردد [۱۸].

مدل خازنی DBD، امکان برقراری ارتباط مستقیم بین پارامترهای الکتریکی (ولتاژ، فاصله، دی‌الکتریک) و اثرات زیستی (کاهش بار میکروبی) را فراهم می‌کند؛ لذا این مدل، پایه بسیاری از تحلیل‌های سینتیکی و طراحی راکتورهای پلاسما برای کاربردهای غذایی است [۲].

### کنترل آفات با DBD

چگالی الکترونی ( $n_e$ ) ایجاد شده در محیط پلاسما که تعیین کننده شدت واکنش‌های الکترونی در پلاسما است را می‌توان با رابطه:

$$n_e \propto \exp\left(\alpha \cdot \frac{E}{N}\right) \quad (11)$$

توصیف کرد که در آن  $E$ ، میدان الکتریکی مؤثر در ناحیه گازی بر حسب  $(V/m)$  می‌باشد و همانگونه که شرح داده شد توسط ولتاژ اعمالی و فاصله الکترونها تعیین می‌شود [20].  
همچنین:

$$N \approx 2.5 \times 10^{25} m^{-3} \quad (12)$$

برابر چگالی عددی مولکول‌های گاز در هر متر مکعب و  $E/N$  (میدان کاهش‌یافته) به عنوان پارامتر کلیدی فیزیک پلاسما می‌باشد و انرژی متوسط الکترون‌ها را کنترل می‌کند و معمولاً با واحد تاونسند ( $Td$ ) بیان می‌شود:

$$1 Td = 10^{-21} V \cdot m^2$$

همچنین در این رابطه  $\alpha$ ، ضریب مؤثر وابسته به نوع گاز و مقطع برخوردی الکترون-مولکول است و بیانگر حساسیت چگالی الکترون به تغییرات  $E/N$  است [۱۸].

شیمیایی و تیمارهای فیزیکی مواد غذایی است و نشان می‌دهد چه کسری از جمعیت اولیه نابود یا غیرفعال شده است [۲۲].

لذا مدل کاهش جمعیت آفات با فرض سینتیک اول از رابطه:

$$N_t = N_0 \times \exp(-k t) \quad (۱۶)$$

بدست می‌آید که با جایگذاری آن در تعریف درصد آفت کشی داریم:

$$Pest Control (\%) = [1 - \exp(-k t)] \times 100 \quad (۱۷)$$

بنابراین با افزایش زمان تیمار، درصد آفت کشی به صورت غیرخطی به ۱۰۰٪ نزدیک می‌شود و لذا این رابطه مبنای طراحی زمان بهینه تیمار در سامانه‌های پلاسما سرد است [23].

البته در علوم غذایی و کشاورزی، کاهش زیستی اغلب به صورت لگاریتمی گزارش می‌شود:

$$Log Reduction = \log_{10} \left( \frac{N_0}{N_t} \right) \quad (۱۸)$$

و ارتباط با درصد آفت کشی در اکثر پژوهشها معمولاً به صورت استاندارد از رابطه:

$$Pest Control (\%) = (1 - 10^{-Log Reduction}) \times 100 \quad (۱۹)$$

بدست می‌آید. این رابطه به عنوان مثال ۹۰ درصد آفت کشی را با (۱-)، ۹۹ درصد را با (۲-)، ۹۹/۹ درصد را با (۳-) و ۹۹/۹۹ درصد را با (۴-) لگاریتم کاهش یافته نشان می‌دهد [۲۴].

همچنین رابطه نیمه تجربی ارتباط درصد آفت کشی با پارامترهای الکتریکی پلاسما سرد به صورت:

$$Pest Control (\%) = \left[ 1 - \exp \left( -C \times \left( \frac{V}{d} \right)^m \times t \right) \right] \times 100 \quad (۲۰)$$

تعریف شده است که در آن C، ضریبی وابسته به نوع محصول، آفت و گاز زمینه بوده و این رابطه مستقیماً طراحی الکتریکی

بنابراین می‌توان گفت که افزایش E/N باعث افزایش انرژی متوسط الکترون‌ها می‌شود و الکترون‌های پرانرژی‌تر، احتمال یونش و برانگیزش را افزایش داده و نرخ تولید رادیکال‌ها و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را بالا می‌برند و وابستگی نمایی  $n_e$  به E/N، نشان می‌دهد که کنترل میدان الکتریکی مؤثرترین ابزار تنظیم شیمی پلاسما در سامانه‌های DBD فشار اتمسفری است [۱۷].

از طرفی دیگر نرخ تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، شامل  $O_2$ ،  $O_3$ ،  $OH$ ،  $H_2O$  با روابط زیر مشخص می‌شود:

$$R_{ROS} = n_e \cdot k \left( \frac{E}{N} \right) \cdot [O_2] \quad (۱۳)$$

$$R_{ROS} \propto \left( \frac{V}{d} \right)^m, \quad m \approx 1.5 - 2 \quad (۱۴)$$

که در آن k نرخ برخورد الکترون-مولکول ( $m^3/s$ ) بوده که تابع مستقیم میدان کاهش یافته می‌باشد و با افزایش E/N، این ثابت به طور غیرخطی افزایش می‌یابد.  $[O_2]$  غلظت اکسیژن در گاز زمینه (مولکول بر متر مکعب) است و باید در نظر داشت که حضور اکسیژن شرط اساسی تولید ROS است و V ولتاژ اعمالی به DBD و m توان تجربی وابستگی نرخ تولید ROS به میدان الکتریکی است. همچنین باید توجه داشت که از آنجا که ROS عامل اصلی تخریب دیواره سلولی پروتئین‌ها و DNA میکروارگانیسم‌ها می‌باشد، این روابط پل مستقیمی بین طراحی الکتریکی سامانه و راندمان ضدعفونی ایجاد می‌کنند [۲۱].

همچنین می‌توان درصد آفت کشی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$Pest Control (\%) = \left( \frac{N_0 - N_t}{N_0} \right) \times 100 \quad (۱۵)$$

که در آن  $N_0$  تعداد اولیه آفات زنده (یا میکروارگانیسم‌ها) پیش از تیمار با واحد متداول CFU/g یعنی تعداد حشرات زنده در هر گرم و  $N_t$  تعداد آنها پس از سپری شدن زمان t می‌باشد. در واقع این رابطه ساده‌ترین و رایج‌ترین تعریف برای درصد آفت کشی در فناوری پلاسما سرد، پرتودهی، ضدعفونی

سامانه DBD را به راندمان آفت کشی وصل می کند و برای بهینه سازی مهندسی بسیار ارزشمند است [۲۵-۲۶].

## مواد و روشها

در این پژوهش از یک دستگاه پلاسمای سرد DBD با حداکثر ولتاژ اسمی ۲۰kV و فرکانس کار ۱۰kHz به منظور از بین بردن گونه های مهم از آفات غلات، بنام سوسک چهار نقطه ای استفاده گردید و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی و الکتریکی آن مانند ولتاژ اعمالی، فاصله میان الکترودها و جنس و ضخامت دی الکتریک بکار رفته در آن بر بهره آفت کشی آن بررسی گردید.

سوسک چهار نقطه ای حبوبات<sup>۱</sup> یکی از مهم ترین آفات حبوبات مخصوصاً لوبیا چشم بلبلی و عدس در مزرعه و انبار می باشد و به خاطر حساس بودن این محصول همه ساله خسارت زیادی به آن وارد می شود. آلودگی از مزرعه آغاز شده و آفت همراه با محصول در به انبار منتقل می شود و در شرایط مناسب از نظر حرارت و رطوبت، نشو و نما و خسارت حشره در انبار ادامه می یابد. پلاسمای سرد DBD یک فناوری امیدبخش برای از بین بردن این آفت بدون آسیب رساندن به مواد غذایی محصول است و می تواند جایگزین یا مکمل روش های سنتی شود [۲۷].



شکل ۲- تصویری از سوسک چهار نقطه ای حبوبات در محصول عدس که قبل از تیمار با پلاسما ثبت شده است.

بدین منظور در هر مرتبه از این پژوهش ولتاژ اعمالی در چهار مقدار ۴، ۶ و ۱۰ کیلوولت و فاصله میان دی الکتریک با الکترود

(عمق پلاسما) را با توجه به ابعاد محصول در دو بازه ۴ و ۶ میلیمتر و ضخامت دی الکتریک ها را ۱، ۶ و ۱۰ میلیمتر و با ضرایب شکست متفاوت انتخاب گردید. همچنین تاثیر پلاسمای ایجاد شده تنها بر حشرات بالغ بررسی گردید. لذا در هر آزمون تعدادی حشره بالغ همراه با محصول آلوده (عدس) در محیط پلاسما قرار داده شد و درصد آفت کشی آن با دقتی حدود ۵ درصد در مدت زمان تیمار مختلف بررسی گردید. نتایج حاصل در جدول ۱ و تصویری از نتایج یک آزمون نمونه در تصویر ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- داده های تجربی میان درصد آفت کشی با ولتاژ و عمق پلاسما

| V(KV) | D(M) | T(S) | آفت کشی (%) |
|-------|------|------|-------------|
| ۴     | ۴    | ۲    | ۷۰          |
| ۴     | ۴    | ۴    | ۸۰          |
| ۴     | ۴    | ۸    | ۹۵          |
| ۴     | ۶    | ۲    | ۷۵          |
| ۴     | ۶    | ۴    | ۸۰          |
| ۴     | ۶    | ۸    | ۹۰          |
| ۴     | ۱۰   | ۲    | ۳۵          |
| ۴     | ۱۰   | ۴    | ۵۰          |
| ۴     | ۱۰   | ۸    | ۸۰          |
| ۶     | ۴    | ۲    | ۸۵          |
| ۶     | ۴    | ۴    | ۹۵          |
| ۶     | ۴    | ۸    | ۱۰۰         |
| ۶     | ۶    | ۲    | ۶۵          |
| ۶     | ۶    | ۴    | ۸۵          |
| ۶     | ۶    | ۸    | ۱۰۰         |
| ۶     | ۱۰   | ۲    | ۶۵          |
| ۶     | ۱۰   | ۴    | ۸۵          |
| ۶     | ۱۰   | ۸    | ۹۵          |
| ۱۰    | ۴    | ۲    | ۸۰          |
| ۱۰    | ۴    | ۴    | ۱۰۰         |
| ۱۰    | ۴    | ۸    | ۱۰۰         |
| ۱۰    | ۶    | ۲    | ۹۰          |
| ۱۰    | ۶    | ۴    | ۱۰۰         |
| ۱۰    | ۶    | ۸    | ۱۰۰         |

<sup>۱</sup> Callosobruchus maculatus

|    |   |    |    |
|----|---|----|----|
| ۹۵ | ۲ | ۱۰ | ۱۰ |
| ۷۵ | ۴ | ۱۰ | ۱۰ |
| ۷۵ | ۸ | ۱۰ | ۱۰ |

الکتریکی از جمله عمق ناحیه پلاسما، اختلاف پتانسیل و جنس دی الکتریک ها برابر باشند، بر کیفیت پلاسمای ایجاد می شود موثر است. همانگونه که مشاهده می گردد با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب، کیفیت و یکنواختی محیط پلاسما در آزمون با دی الکتریک به ضخامت ۱۰ میلی متر، بیشتر است.



**شکل ۴-** نمایی از تاثیر ضخامت دی الکتریک بر کیفیت محیط پلاسمای ایجاد می شود - در تصویر بالایی ضخامت دی الکتریک، ۶ میلی متر و در تصویر پایینی ضخامت دی الکتریک، ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد.

همچنین همانگونه که در شکل - دیده می شود تاثیر یک پلاسمای سوزنی در اختلاف پتانسیل ۶ kv بر همین آفت بررسی گردید. این نوع پلاسما اگر چه در مرکز آفت کشی قدرتمند و موثری دارد، اما در کناره ها فاقد اثر کافی برای آفت کشی موثر است و برای چگالی آفتی معادل آزمونهای انجام گرفته با DBD، بازدهی حدود ۳۵ درصد را نشان می دهد.

این نتایج به وضوح تاثیر اختلاف پتانسیل اعمالی بر درصد آفت کشی را نشان می دهد. به گونه ای که با افزایش ولتاژ اعمالی در شرایط یکسان، بازده آفت کشی دستگاه به شدت افزایش می یابد.



**شکل ۳-** تصویری از عدس آفت زده پس از ۱۰ ثانیه تیمار پلاسمای سرد با فاصله ۶ سانتی متری و ولتاژ اعمالی ۱۰ kv. همانگونه که مشخص است با این تیمار، تمام آفتها کشته شده و بدن برخی متلاشی شده است.

همچنین در جدول ۲ تاثیر ضخامت ( $d_d$ ) و ضریب نسبی ( $\epsilon_r$ ) دی الکتریک بر بازده آفت کشی در پتانسیل اعمالی ۶ kv و فاصله شکاف ۵ mm نشان داده شده است.

**جدول ۲-** رابطه تجربی میان ضخامت و ضریب نسبی دی الکتریک با درصد آفت کشی

| $V(kv)$ | $d_d (m)$ | $\epsilon_r$ | $t(s)$ | آفت کشی (%) |
|---------|-----------|--------------|--------|-------------|
| ۶       | ۱         | ۵/۴          | ۵      | ۱۰۰         |
| ۶       | ۶         | ۳/۴          | ۵      | ۸۵          |
| ۶       | ۶         | ۴/۸          | ۵      | ۸۵          |
| ۶       | ۱۰        | ۳/۴          | ۵      | ۹۰          |
| ۶       | ۱۰        | ۴/۸          | ۵      | ۸۵          |

همانگونه که شکل ۴ نشان می دهد، افزایش ضخامت دی الکتریک در شرایطی که سایر مشخصات هندسی و

به‌خوبی نشان می‌دهد که طراحی الکتریکی سامانه، مستقیماً با راندمان آفت‌کشی و ضدعفونی در ارتباط است.

بررسی مدل‌های سینتیکی نیز حاکی از آن است که کاهش جمعیت آفات در بسیاری از شرایط از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند. این موضوع امکان تعریف روابط کمی بین زمان تیمار، توان مصرفی و درصد آفت‌کشی را فراهم می‌سازد و مبنای مناسبی برای بهینه‌سازی مهندسی فرآیند ارائه می‌دهد. داده‌های تجربی نشان دادند که با انتخاب مناسب ولتاژ، فاصله الکترودها و ضخامت و جنس دی‌الکتریک، می‌توان به راندمان‌های بالای آفت‌کشی (تا حدود ۱۰۰٪) در زمان‌های کوتاه دست یافت. در مقابل، نتایج مربوط به پلاسما سوزنی نشان داد که اگرچه شدت موضعی پلاسما بالا است، اما عدم یکنواختی میدان و محدود بودن ناحیه مؤثر، کارایی کلی آفت‌کشی را کاهش می‌دهد؛ موضوعی که بر برتری ساختار DBD برای کاربردهای حجمی و غذایی تأکید می‌کند.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که پلاسما سرد DBD با اتکا بر مکانیسم‌های چندوجهی شیمیایی و فیزیکی، گزینه‌ای بسیار امیدبخش برای کنترل آفات انباری غلات و حبوبات است. ترکیب مدل‌سازی فیزیکی، روابط سینتیکی و داده‌های تجربی ارائه‌شده در این مقاله، چارچوبی منسجم برای طراحی، بهینه‌سازی و توسعه صنعتی سامانه‌های پلاسما سرد در حوزه ایمنی غذایی فراهم می‌کند. بر این اساس، می‌توان انتظار داشت که با توسعه راکتورهای مقیاس‌پذیر و کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی، این فناوری در آینده نزدیک به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های شیمیایی و حرارتی متداول در صنایع غذایی و کشاورزی مورد استفاده گسترده قرار گیرد.

## منابع

- [1] Niemira, B. A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. Annual review of food science and technology, 3(1), 125-142.
- [2] Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J. (Eds.). (2016). Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. Academic Press.



**شکل ۵-** نمایی از محفظه آفت‌کش پلاسمای سوزنی. همانگونه که مشخص است در مرکز آرک تشکیل شده و در اطراف محفظه پلاسما شکل نگرفته است.

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی دستگاه پلاسما سرد نوع شکست سد دی‌الکتریک (DBD) بر راندمان آفت‌کشی و غیرفعال‌سازی زیستی، با تمرکز بر آفات انباری به‌ویژه سوسک چهارنقطه‌ای حبوبات، به‌صورت تحلیلی و تجربی بررسی شد. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که پلاسما سرد DBD به‌عنوان یک فناوری غیرحرارتی و سبز، توانایی بالایی در کنترل آفات و کاهش بار زیستی بدون ایجاد آسیب حرارتی یا افت محسوس کیفیت محصول دارد.

تحلیل روابط فیزیکی و ریاضی حاکم بر تخلیه DBD نشان داد که میدان کاهش‌یافته E/N نقش محوری در تعیین انرژی متوسط الکترون‌ها، چگالی الکترونی و در نهایت نرخ تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (ROS/RNS) ایفا می‌کند. افزایش ولتاژ اعمالی یا کاهش فاصله الکترودها، از طریق افزایش میدان الکتریکی مؤثر، منجر به رشد نمایی چگالی الکترون‌ها و افزایش شدید تولید ROS می‌شود؛ گونه‌هایی که عامل اصلی تخریب دیواره سلولی، پروتئین‌ها و DNA آفات و میکروارگانیسم‌ها هستند. از این منظر، نتایج این پژوهش

- [16] Kogelschatz, U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, 23, 1–46.
- [17] Fridman, A. *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [18] Lieberman, M. A.; Lichtenberg, A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Wiley, 2005.
- [19] Wagner, H. E.; et al. The barrier discharge: Basic properties and applications. *Vacuum*, 2003, 71, 417–436.
- [20] Raizer, Y. P. *Gas Discharge Physics*. Springer, 1991.
- [21] Misra, N. N.; Keener, K. M.; Bourke, P.; Mosnier, J. P.; Cullen, P. J. In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of food products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 21, 72–81.
- [22] Jay, J. M. *Modern Food Microbiology*. Springer, 2000.
- [23] Moisan, M. et al. Sterilization/disinfection using plasma. *Pure Appl. Chem.*, 2002, 74, 349–358.
- [24] Misra, N. N. et al. Cold plasma in food processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12, 1–10.
- [25] Bogaerts, A.; Neyts, E. Plasma technology overview. *Spectrochimica Acta B*, 2002, 57, 609–658.
- [26] Pankaj, S. K.; Keener, K. M. Cold plasma processing of grains. *Journal of Cereal Science*, 2017, 77, 200–206.
- [27] Donohue, K. V., Bures, B. L., Bourham, M. A., & Roe, R. M. (2006). Mode of action of a novel nonchemical method of insect control: atmospheric pressure plasma discharge. *Journal of economic entomology*, 99(1), 38-47.
- [3] Thomas-Popo, E., Mendonça, A., Misra, N. N., Little, A., Wan, Z., Moutiq, R., ... & Keener, K. (2019). Inactivation of Shiga-toxin-producing *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and natural microflora on tempered wheat grains by atmospheric cold plasma. *Food Control*, 104, 231-239.
- [4] Chaple, S., Sarangapani, C., Jones, J., Carey, E., Causseret, L., Genson, A., ... & Bourke, P. (2020). Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and wheat flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102529.
- [5] Domonkos, M., Tichá, P., Trejbal, J., & Demo, P. (2021). Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry. *Applied Sciences*, 11(11), 4809.
- [6] Huang, J., Zhou, C., Huang, H., Yang, Z., & Liu, S. (2026). Cold Plasma as a Promising Non-Thermal Strategy for Enhancing Food Safety: A Review of Microbial and Mycotoxin Decontamination. *Molecules*, 31(3), 517.
- [۷] Bourke, Paula, et al. "The potential of cold plasma for safe and sustainable food production." *Trends in biotechnology* 36.6 (2018): 615-626.
- [۸] Ziuzina, Dana, et al. "Cold plasma for insect pest control: *Tribolium castaneum* mortality and defense mechanisms in response to treatment." *Plasma Processes and Polymers* 18.10 (2021): 2000178.
- [9] ذبیحین پور. "طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسمای سرد اتمسفریک مناسب استفاده در صنایع غذایی." *فصلنامه علمی / پژوهشی الکترونیک* ۵۰.۱ (۲۰۲۳): ۷۳-۸۲.
- [10] Liu, Siyao, et al. "Advances in Atmospheric Cold Plasma Technology for Plant-Based Food Safety, Functionality, and Quality Implications." *Foods* 14.17 (2025): 2999.
- [11] Than, Ha An Quoc, et al. "Control of *Sitophilus oryzae* (L.) using argon and helium atmospheric non-thermal plasma." *Journal of Stored Products Research* 108 (2024): 102394.
- [12] Llewellyn-Jones, F., 1966. *Ionization and Breakdown in Gases*. Methuen, London.
- [13] Marinov, D., Guerra, V., Guaitella, O., Booth, J.P., Antoine, R., 2013. Ozone kinetics in low-pressure discharges: vibrationally excited ozone and molecule formation on surfaces. *Plasma Sources Sci. Technol.* 22 (5), 055018. ISSN 0963 0252, 1361-6595.
- [14] Meek, J., 1940. A theory of spark discharge. *Phys. Rev.* 57 (8), 722–728.
- [15] Rawlins, W., Caledonia, G., Armstrong, R., 1987. Dynamics of vibrationally excited ozone formed by three-body recombination: II. Kinetics and mechanism. *J. Chem. Phys.* 00219606. 87 (9), 5209.