

## ORIGINAL ARTICLE

# Investigating the effect of physical and electrical parameters of a cold plasma device on the pest of storage beans

1 Authors' introduction in English: Academic position, Education field, Professional membership (all in a line) (**Times New Roman 9**)

**Correspondence**  
Name  
Email:

**How to cite**  
Last Name, J. (of all Author) ().  
Subject (**Times New Roman 8**), Optoelectronic.,

### 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

نشریه علمی

اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

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

### چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از پلاسمای سرد به‌عنوان یک فناوری غیرحرارتی و دوستدار محیط‌زیست، توجه گسترده‌ای را در حوزه ضدعفونی و کنترل آفات انباری مواد غذایی به خود جلب کرده است. در این پژوهش، عملکرد سامانه پلاسمای سرد نوع شکست سد دی‌الکتریک (DBD) در غیرفعال‌سازی زیستی آفات انباری مهم، با تمرکز بر تحلیل فیزیکی-ریاضی فرآیند و بررسی تاثیر پارامترهای الکتریکی و هندسی و برای نمونه آفت انباری، سوسک چهار نقطه‌ای حبوبات، مورد مطالعه قرار گرفته است. روابط حاکم بر میدان کاهش‌یافته، چگالی الکترونی و نرخ تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن به‌صورت تحلیلی بررسی شده و ارتباط مستقیم آن‌ها با راندمان آفت‌کشی تبیین گردیده است. همانگونه که روابط مربوطه نشان می‌دهد افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش فاصله الکترودها، از طریق افزایش میدان الکتریکی مؤثر، منجر به رشد نمایی چگالی الکترون‌ها و افزایش نرخ تولید ROS می‌شود؛ گونه‌هایی که نقش اصلی در تخریب دیواره سلولی، پروتئین‌ها و DNA آفات ایفا می‌کنند. تحلیل سینتیکی کاهش جمعیت آفات نشان داد که می‌توان درصد آفت‌کشی را به‌طور کمی به زمان تیمار و پارامترهای الکتریکی سامانه مرتبط ساخت به گونه‌ای که حدود بازده ۱۰۰٪ آفت‌کشی حشرات بالغ نمونه، حتی برای زمانهای کوتاهی در حدود 4s هم کاملاً در دسترس است. همچنین مقایسه ساختارهای مختلف پلازما نشان داد که سامانه DBD به‌دلیل یکنواختی میدان و پوشش حجمی مناسب، کارایی بالاتری نسبت به پلاسماهای موضعی نظیر پلازما سوزنی دارد.

### واژه‌های کلیدی

پلاسمای سرد، شکست سد دی‌الکتریک، آفت‌کشی حبوبات انباری، سوسک چهار نقطه‌ای حبوبات، ایمنی غذایی

نویسنده مسئول:  
رایانامه:

استناد به این مقاله:

نام کامل نویسندگان (B mitra 10) (۱۴۰۲). عنوان مقاله. اپتوالکترونیک، سال و شماره چاپ، شماره صفحه.

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

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 به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد [۳].

برنج و آرد گندم و غلاتی مانند عدس به‌دلیل ساختار فیزیکی خاص و سطح تماس بالا، از جمله مواد غذایی مستعد آلودگی و آفات مختلف محسوب می‌شوند. در اواخر دهه ۲۰۱۰، پژوهش‌هایی به‌طور 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 [۴].

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 [۵].

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 پلاسما سرد درون‌بسته‌بندی بود که امکان ضدعفونی محصول نهایی در بسته‌بندی را فراهم می‌کند. این رویکرد خطر آلودگی ثانویه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و گامی مهم در جهت کاربرد صنعتی پلاسما سرد محسوب می‌شود [۶].

مرور پژوهش‌های جامع منتشرشده در سال‌های اخیر نشان می‌دهند که پلاسما سرد نه‌تنها 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 پلاسما سرد طی مدت کوتاهی از یک موضوع پژوهشی نوظهور به یک فناوری امیدوارکننده و قابل‌استفاده در صنایع غذایی تبدیل شده است [۷].

لذا دهه گذشته شاهد افزایش پژوهش‌های مختلف در بررسی کاربردهای بالقوه پلاسما غیرحرارتی در زمینه مواد غذایی به‌عنوان راهکاری مطلوب بوده است و یک تلاش علمی چندرشته‌ای برای اثبات کارایی این فرآیند در طیف وسیعی از

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> به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین غیرحرارتی، در دو دهه اخیر به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهای زیستی و صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه علم پلاسما از اوایل قرن بیستم به‌عنوان 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 (DBD<sup>۲</sup>) 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 مروری نیمیرا<sup>۳</sup> یکی از اولین منابعی است که پلاسما سرد را به‌عنوان یک فناوری نوظهور برای ضدعفونی مواد غذایی معرفی کرد و مکانیسم‌های احتمالی غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها را 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 [۲].

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 به‌دلیل عدم افزایش محسوس دما و عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی، به‌سرعت به‌عنوان گزینه‌ای جایگزین مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات متعدد نشان دادند که پلاسما سرد

4 Escherichia coli

5 Salmonella

6 Listeria

1 Cold Plasma

2 Dielectric Barrier Discharge

3 Niemira

کنترل پذیری بالا، گزینه‌ای مناسب برای ضد عفونی بسیاری از غلات یا مواد غذایی حساس محسوب می‌شود.

در سامانه‌های DBD، اختلاف پتانسیل متناوب یا پالسی بالایی (چند کیلوولت) بین دو الکتروود اعمال می‌شود که حداقل یکی از آن‌ها با لایه‌ای دی‌الکتریک پوشیده شده است. این دی‌الکتریک مانع عبور جریان پیوسته شده و تخلیه را به صورت ریزتخلیه‌های کوتاه‌عمر<sup>۴</sup> در می‌آورد. ویژگی کلیدی این فناوری، عدم تعادل حرارتی است. زیرا در این محیط، الکترون‌ها دارای انرژی بالا، درحالی‌که انرژی و دمای گونه‌های سنگین (یون‌ها و مولکول‌ها) در دمای نزدیک به محیط باقی می‌ماند. این ویژگی امکان انجام واکنش‌های شیمیایی فعال بدون آسیب حرارتی به مواد غذایی را فراهم می‌کند.

از طرفی دیگر در فناوری DBD، مشخصات فیزیکی دستگاه و نحوه چیدمان آن تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های پلاسمای تولید شده و در نتیجه کارایی آن در مواد غذایی دارد. در این روش، یک دی‌الکتریک (که معمولاً از جنس شیشه، کوارتز یا سرامیک است) بین دو الکتروود قرار می‌گیرد که وظیفه اصلی آن محدود کردن جریان و جلوگیری از تبدیل تخلیه به "آرک" یا قوس الکتریکی گرم است. این امر باعث می‌شود پلاسمای در دمای اتاق باقی بماند که برای مواد غذایی حساس به حرارت، حیاتی است. همچنین دی‌الکتریک باعث می‌شود که تخلیه به صورت میکروتخلیه‌های متعدد و پراکنده در کل سطح پخش شود که منجر به تولید یکنواخت گونه‌های واکنش‌پذیر می‌شود. همچنین فاصله بین الکتروودها، یکی از حیاتی‌ترین 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 می‌شود، اما اگر فاصله خیلی کم باشد، فضای کافی برای عبور محصول یا جریان گاز وجود نخواهد داشت. همچنین هندسه الکتروودها می‌تواند مستقیماً روی محصول یا غلاف بسته‌بندی آنها اثرات متفاوتی داشته باشد. مثلاً الکتروودهای تخت، برای تیمار سطوح صاف و یکنواخت مناسب هستند و الکتروودهای سوزنی یا سیمی، باعث تمرکز میدان الکتریکی در نقاط تیز شده و چگالی پلاسمای بالاتری ایجاد می‌کنند که برای نفوذ در بافت‌های 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 الکترون‌ها و در نتیجه افزایش دمای

کاربردهای پلاسمای از جمله خواص ضد میکروبی، آفت‌کشی، عملکردسازی (غنی‌سازی) مواد غذایی و تصفیه پسماندها آغاز شده است. همچنین ایده‌های جدیدی در مورد تعامل گونه‌های پلاسمای با مواد غذایی و مکانیسم‌های عمل آن‌ها نیز در حال ظهور است. یکی از مزایای کلیدی به کارگیری فناوری پلاسمای در صنعت مواد غذایی، ترکیب منحصربه‌فردی 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 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 یزونیان<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 دی‌الکتریک در صنایع کشاورزی-غذایی و ذیخیز 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 تأثیر پلاسمای سرد در کنترل آفت انباری سوسک دندانه دار غلات بررسی گردید. [۱، ۸-۱۱].

در این پژوهش نیز تأثیر تغییر مشخصه‌های هندسی و الکتریکی یک دستگاه پلاسمای سرد تخلیه سد دی‌الکتریک 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 دی‌الکتریک

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 دی‌الکتریک (DBD) به دلیل سادگی طراحی، امکان کار در فشار اتمسفری و

می‌باشد. برای  $pd$  حدود یک پاسکال متر، حداقل ولتاژ شکست معمولاً در محدوده ۱۰۰-۵۰۰ ولت رخ می‌دهد. این بدان معنی است که در فشار اتمسفر، شکاف الکترون 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 الکترون 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 الکترون بستگی دارد، اما اغلب مقداری کوچک دارد ( $\gamma \leq 0.01$ ). هر یک از الکترونهای ثانویه در سراسر شکاف الکترون 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 الکترون و یونیزاسیون در فضای بین الکترودها تولید شود [۳].

شکل کلی منحنی پاشن به رابطه بین مسیر آزاد میانگین الکترون و شکاف الکترون بستگی دارد. در سمت چپ مینیمم پاشن، میانگین مسیر آزاد ممکن است بزرگتر از فاصله باشد. در این حالت، فرکانس برخورد الکترون 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 الکترون 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 تاوانسند نامیده می‌شود. یک فرض مکانیسم شکست تاوانسند این است که توده بارهای مرتبط با شروع فرآیند یونیزاسیون، بر میدان الکتریکی تأثیری 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 الکترون منفرد آغاز شود، الکترون از سمت کاتد حرکت

گاز می‌شود (که باید کنترل شود تا به ماده غذایی آسیب نرسد) و استفاده از ولتاژ پالسی اجازه می‌دهد تا بدون گرم شدن گاز، گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر و پرنرژی تولید شوند.

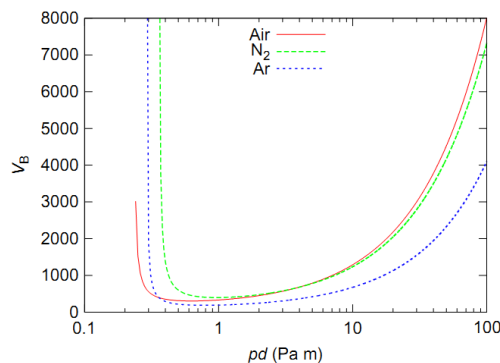
می‌دانیم که رابطه میان میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل با رابطه

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

مشخص می‌گردد و افزایش ولتاژ  $V$  یا کاهش فاصله  $d$  باعث افزایش میدان الکتریکی و انرژی الکترون‌ها و در نتیجه افزایش برخوردهای مؤثرتر الکترون‌ها با مولکول‌های هوا و نهایتاً تولید بیشتر گونه‌های فعال خواهد شد. البته این افزایش میدان در فشار و محیط جو محدود به میدان شکست الکتریکی هوا یعنی ۳ مگا ولت بر متر می‌باشد 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>۱</sup> در قرن نوزدهم برای این سوال مطرح شد. او مشخص کرد که وقتی دو الکترون با فاصله  $d$  از هم جدا می‌شوند، حداقل ولتاژی که باید برای شروع یک شکست اعمال شود، توسط معادله زیر داده می‌شود [۱۲]:

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

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 الکترون بستگی دارند. نمونه‌هایی از منحنی‌های پاشن در شکل ۱ نشان داده شده است [۳].



شکل ۱- منحنی پاشن برای آرگون، نیتروژن و هوای خشک [۳].

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:

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

که در آن  $C_{total}$  ظرفیت خازنی کل سامانه (DBD) که پاسخ الکتریکی کل را تعیین می‌کند، و  $C_g$ ، ظرفیت خازنی ناحیه گازی بین الکترودها که پلاسما در آن تشکیل می‌شود (که این پارامتر بیانگر توانایی ناحیه تخلیه در ذخیره انرژی الکتریکی است.) و نهایتاً  $C_d$ ، ظرفیت خازنی لایه دی‌الکتریک (که نقش کلیدی در محدودسازی جریان و جلوگیری از تشکیل قوس الکتریکی ایفا می‌کند)، می‌باشد.

این مدل توضیح می‌دهد چگونه دی‌الکتریک با ذخیره بار، جریان را محدود و پایداری پلاسما را تضمین می‌کند. در واقع این مدل نشان می‌دهد که وجود دی‌الکتریک باعث کاهش ظرفیت کل سامانه شده و در نتیجه جریان تخلیه به صورت خودمحدودشونده باقی می‌ماند، که ویژگی اساسی پلاسما 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 می‌شود که در آن  $\epsilon_0$ ، ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و  $A$ ، سطح مؤثر الکترودها ( $m^2$ ) که در تخلیه شرکت می‌کنند و  $d_g$ ، فاصله مؤثر بین الکترودها یا ضخامت ناحیه گازی ( $m$ ) می‌باشد.

لذا کاهش فاصله بین الکترودها یا افزایش سطح آن‌ها باعث افزایش ظرفیت خازنی ناحیه گاز و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی می‌شود و این پارامتر مستقیماً بر چگالی الکترون‌ها و نرخ تولید گونه‌های فعال شیمیایی اثر می‌گذارد [۱۷-۱۸].

همچنین در DBD توجه به ظرفیت خازنی لایه دی‌الکتریک که به صورت:

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

بیان می‌شود، بسیار مهم است، که در آن ثابت دی‌الکتریک نسبی ماده دی‌الکتریک (بدون بعد) می‌باشد و 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

کرده و در حین حرکت باعث یونیزاسیون می‌شوند. یونیزاسیون پیاپی صورت گرفته و الکترون اولیه به ابری از الکترون تبدیل می‌شود. حرکت این الکترون‌ها ترکیبی از انتشار به دلیل حرکت تصادفی تک‌تک الکترون‌ها و رانش به دلیل میدان الکتریکی که برای هر یک از الکترون‌ها یکسان است، خواهد بود. در نتیجه، ابر الکترونی یک کره در حال انبساط را تشکیل می‌دهد که به سمت آند رانش می‌شود و البته یونها بسیار کندتر به سمت کاتد حرکت می‌کنند. این فرآیند، جداسازی بار فضایی را ایجاد می‌کند، یعنی بار منفی در ابر الکترونی در حال حرکت و بار مثبت در ناحیه ای که در آن الکترون‌ها پس زده شده‌اند. این توزیع بار فضایی، یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند، و اگر این میدان الکتریکی با میدان الکتریکی اعمال شده، قابل مقایسه باشد، مکانیسم تاونسند دیگر اعمال نمی‌شود. در این شرایط ممکن است که الکترون‌ها به نواحی دارای بار فضایی مثبت مانند آند رانش شوند و شکستهای ثانویه رخ دهد. اولین بار این مکانیسم با معیار رادر-میک (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 پلاسما در حال ایجاد را به شدت تغییر می‌دهد. شکست تاونسند، پلاسمايي تولید می‌کند که فضای بین الکترودها را به طور یکنواخت پر می‌کند، در حالی که مکانیسم رادر-میک منجر به شکست استریم و تولید پلاسما با ساختار فضایی پیچیده که معمولاً مطلوب نیست، می‌گردد. زیرا پلاسمايي تولید خواهد کرد که فقط بخش کوچکی از حجم موجود را پر کرده و اغلب منجر به تولید حرارت می‌شود [۱۴-۱۵].

همچنین می‌توان برای سامانه پلاسما سرد DBD، یک مدل خازنی تعریف کرد. در تخلیه‌های نوع شکست سد دی‌الکتریک (DBD)، رفتار الکتریکی سامانه را می‌توان به‌طور مؤثر با یک مدل خازنی سری شده شامل ناحیه گاز و لایه دی‌الکتریک توصیف کرد. این مدل به‌طور گسترده در تحلیل فیزیکی و مهندسی پلاسماهای فشار اتمسفری به‌کار می‌رود [۲۰،۳]. رابطه خازن معادل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

$$N \approx 2.5 \times 10^{25} m^{-3} \quad (۱۲)$$

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:

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

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].

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 ( $R_{ROS}$ )، 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 کاهش‌یافته می‌باشد و با افزایش  $E/N$ ، این ثابت به‌طور 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:

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

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

می‌یابند که چگالی بار سطحی تجمع‌یافته روی دی‌الکتریک  $\sigma$  ( $C/m^2$ ) به‌صورت:

$$\sigma(t) = \int J(t) dt \quad (۹)$$

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 پلاسما 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 پلاسما DBD را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P = \frac{1}{T \int_0^T V(t) I(t) dt} \quad (۱۰)$$

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 تعیین‌کننده شدت واکنش‌های الکترونی در پلاسما است را می‌توان با رابطه:

$$n_e \propto \exp\left(\alpha \cdot \frac{E}{N}\right) \quad (۱۱)$$

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 الکترودها تعیین می‌شود [۲۰].

همچنین:

در به انبار منتقل می‌شود و در شرایط مناسب از نظر حرارت و رطوبت، نشو و نما و خسارت حشره در انبار ادامه می‌یابد. پلاسمای سرد DBD یک فناوری امیدبخش برای از بین بردن این آفت بدون آسیب رساندن به مواد غذایی محصول است و می‌تواند جایگزین یا مکمل روش‌های سنتی شود [۲۷].



شکل ۲- تصویری از سوسک چهار نقطه‌ای حبوبات در محصول عدس که قبل از تیمار با پلازما ثبت شده است.

بدین منظور در هر مرتبه از این پژوهش ولتاژ اعمالی در چهار مقدار ۴، ۶ و ۱۰ کیلوولت و فاصله میان دی‌الکتریک با الکتروود (عمق پلازما) را با توجه به ابعاد محصول در دو بازه ۴ و ۶ میلی‌متر و ضخامت دی‌الکتریک‌ها را ۱، ۶ و ۱۰ میلی‌متر و با ضرایب شکست متفاوت انتخاب گردید. همچنین تاثیر پلاسمای ایجاد شده بر حشرات بالغ بررسی گردید. لذا در هر آزمون تعدادی حشره بالغ همراه با محصول آلوده (عدس) در محیط پلازما قرار داده شد و درصد آفت‌کشی 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- داده‌های تجربی میان درصد آفت‌کشی با ولتاژ و عمق پلازما

V(KV)	D(M)	T(S)	آفت‌کشی (%)
۴	۴	۲	۷۰
۴	۴	۴	۸۰
۴	۴	۸	۹۵
۴	۶	۳	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

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

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

بدست می‌آید که با جایگذاری آن در تعریف درصد آفت‌کشی داریم:

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

بنابراین با افزایش زمان تیمار، درصد آفت‌کشی به صورت غیرخطی به ۱۰۰٪ نزدیک می‌شود و لذا این رابطه مبنای طراحی زمان بهینه تیمار در سامانه‌های پلازما سرد است [۲۳].

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 آفت‌کشی 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 آفت‌کشی را با (-۱)، ۹۹ درصد را با (-۲)، ۹۹/۹ درصد را با (-۳) و ۹۹/۹۹ را با (-۴) لگاریتم کاهش یافته نشان می‌دهد [۲۴].

همچنین رابطه نیمه تجربی ارتباط درصد آفت‌کشی با پارامترهای الکتریکی پلازما 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 سامانه DBD را به راندمان آفت‌کشی وصل می‌کند و برای بهینه‌سازی 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 گونه‌ای مهم از آفات غلات، بنام سوسک چهار نقطه‌ای استفاده گردید و تاثیر تغییر پارامترهای هندسی و الکتریکی آن مانند ولتاژ اعمالی، فاصله میان الکتروودها و جنس و ضخامت دی‌الکتریک بکار رفته در آن بر بهره آفت‌کشی آن بررسی گردید.

سوسک چهارنقطه‌ای حبوبات<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین آفات حبوبات مخصوصاً لوبیا چشم بلبلی و عدس در مزرعه و انبار می‌باشد و به‌خاطر حساس بودن این محصول همه‌ساله خسارت زیادی به آن وارد می‌شود. آلودگی از مزرعه آغاز شده و آفت همراه با محصول



**شکل ۴-** نمایی از تاثیر ضخامت دی الکتریک بر کیفیت محیط پلاسمای ایجادی- 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 کشی بررسی گردید. این نوع پلاسمای 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.



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

**بحث و نتیجه گیری**

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی دستگاه پلاسمای سرد نوع شکست سد دی الکتریک (DBD) بر راندمان آفت کشی و غیرفعال سازی زیستی، با تمرکز بر آفات انباری

۱۰۰	۴	۴	۱۰
۱۰۰	۸	۴	۱۰
۹۰	۲	۶	۱۰
۱۰۰	۴	۶	۱۰
۱۰۰	۸	۶	۱۰
۹۵	۲	۱۰	۱۰
۷۵	۴	۱۰	۱۰
۷۵	۸	۱۰	۱۰

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 گپ ۶ سانتی متری و ولتاژ اعمالی ۱۰kv. 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 الکتریکی از جمله عمق ناحیه پلاسمای، اختلاف پتانسیل و جنس دی الکتریک ها برابر باشند، بر کیفیت پلاسمای ایجادی موثر است. همانگونه که مشاهده می گردد با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب، کیفیت و یکنواختی محیط پلاسمای در آزمون با دی الکتریک به ضخامت ۱۰ میلی متر، بیشتر است.

تجربی نشان دادند که با انتخاب مناسب ولتاژ، فاصله الکترودها و ضخامت و جنس دی‌الکترونیک، می‌توان به راندمان‌های بالای آفت‌کشی (تا حدود ۱۰۰٪) در زمان‌های کوتاه دست یافت. در مقابل، نتایج مربوط به پلاسمای سوزنی نشان داد که اگرچه شدت موضعی پلاسمای 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 پلاسمای 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 پلاسمای 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.

به‌ویژه سوسک چهارنقطه‌ای حبوبات، به‌صورت تحلیلی و تجربی بررسی شد. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که پلاسمای سرد DBD به‌عنوان یک فناوری غیرحرارتی و سبز، توانایی بالایی در کنترل آفات و کاهش بار زیستی بدون ایجاد آسیب حرارتی یا آفت 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 نمای 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 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

## References

- [2] Niemira, B. A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. *Annual review of food science and technology*, 3(1), 125-142.
- [3] Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J. (Eds.). (2016). *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*. Academic Press.
- [4] 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.
- [5] Chaple, S., Sarangapani, C., Jones, J., Carey, E., Causeret, 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.

## منابع

- [۱] ذبیحین پور. "طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسمای سرد اتمسفریک مناسب استفاده در صنایع غذایی." *فصلنامه علمی ایتوالکترونیک* ۵.۱ (۲۰۲۳): ۷۳-۸۲.
- Innovative Food Science & Emerging Technologies, 66, 102529.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Bourke, Paula, et al. "The potential of cold plasma for safe and sustainable food production." *Trends in biotechnology* 36.6 (2018): 615-626.
- [9] 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.
- [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.
- [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.