

Research Article

Investigating the Effective Factors of Atmospheric Cold Plasma of Dielectric Barrier Discharge on *Salmonella Enterica Serovar Enteritidis* Inactivation

Bahareh Abdoli¹, Mohammad Hadi Khoshtaghaza^{2*}, Mohammad Amir Karimi Torshizi², Hamid Ghomi³, Saman Abdanan Mehdizadeh⁴

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Department of Poultry Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3. Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran

(Received 27 April 2024, Received in revised form 29 May 2024, Accepted 1 May 2024)

Introduction: More than half of foodborne illnesses are attributed to pathogenic bacteria, posing considerable health and economic dangers. *Salmonella enterica serovar Enteritidis* (*SESE*) is a prevalent bacterial pathogen responsible for a higher number of hospitalizations and fatalities compared to other bacteria. Non-thermal plasma, an innovative decontamination technique, exhibits the potential to serve as an intervention strategy for food safety. The dielectric barrier discharge atmospheric pressure cold plasma (DBD ACP) is characterized by its surface disinfection capabilities and holds significant potential for the treatment of various food items. Contained within the DBD ACP source is a dielectric material (insulation) situated in the discharge path between the electrodes. Although DBDs have traditionally been employed in the examination of food disinfection, a thorough analysis of the factors impacting their disinfection efficacy is still required. This study specifically delves into the process and microbiological factors that influence the antimicrobial properties of DBD ACP. Under optimal conditions, DBD ACP plasma emerges as a promising technology capable of enhancing food safety with minimal repercussions on food quality. Upon effectively addressing the challenges associated with scaling up plasma sources, the widespread adoption of DBD ACP technology within the food industry can be anticipated. The study aimed to explore the possibility of deactivating *SESE* through a brief industrial treatment utilizing non-thermal DBD ACP device.

Materials and method: *SESE* was acquired from the poultry science department at Tarbiat Modares University. The DBD ACP device is furnished with a set of upper electrodes carrying high voltages of 6 kHz and 10 kV, while the lower electrodes are provided with adjustable voltages of around 25 kV and 50 Hz. Within a plasma chamber, a 25 kV voltage is administered to the samples at various time intervals. Subsequently, the samples are exposed to treatment for 0 to 60 s in an air environment at standard atmospheric pressure. In order to conduct microbiological analysis, suitable controls were incorporated into the experimental setup. These controls encompassed inoculated samples and untreated samples, which were utilized to determine the initial bacterial population and assess alterations in microbial growth following a 24 h storage period. To assess the reduction of *SESE*, air was used as the process gas under different experimental circumstances, with Petri dishes containing an initial concentration of 10^7 CFU/ml. Optical emission spectroscopy (OES), featuring a 0.5 nm resolution, was employed to pinpoint the excited states within the plasma and ascertain the species associated with the ACP flame.

* Corresponding author: khoshtag@modares.ac.ir

The statistical analysis of the current research was carried out using SAS software (version 0.9). A scanning electron microscope method (SEM) was adopted to observe and analyze the physical damage of microorganisms.

Results and discussion: The application of the DBD ACP device resulted in a decrease in *SESE* concentration by over 7 log CFU/ml following a 60 s treatment. The DBD ACP device produces electrically charged particles that gather on the exterior membrane of cells. The electrical forces from these charges can compromise and break the cell membranes. This phenomenon occurs when DBD ACP directly interacts with bacteria. In cases where the plasma indirectly contacts bacteria (post-light plasma), the number of charged particles reduces as electrons and ions quickly recondense. Thus, the role of charged particles in deactivating bacteria is considered secondary. Chemical compounds generated in ACP systems were detected through OES. Moreover, SEM revealed that the DBD ACP treatment caused significant physical damage to the cells.

Conclusion: This study showcases how industrial DBD ACP device can effectively prevent *SESE*. The plasma device demonstrated high efficiency, with DBD ACP leading to the quickest reduction in bacteria. The adoption of air plasma at atmospheric pressure is anticipated to supplant conventional sterilization methods because of its safe attributes and uncomplicated design. Despite the anticipated limited impact of UV radiation, the industry still requires it for reliable sterilization at a reasonable cost.

Keywords: Cold plasma, Microbial load, Optical emission spectroscopy, Scanning electron microscopy

How to cite this article:

Abdoli, B., Khoshtaghaza, M., Karimi Torshizi, M., Ghomi, H & Abdanan Mehdizadeh, S., (2024). Investigating the Effective Factors of Atmospheric Cold Plasma of Dielectric Barrier Discharge on *Salmonella Enterica Serovar Enteritidis* Inactivation., *Innov. Food Technol.*, 11(2), 172-181., DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2024.6823.2170>



مقاله پژوهشی

بررسی عوامل مؤثر پلاسمای سرد اتمسفری تخلیه سد دی‌الکتریک بر غیرفعال کردن سالمونلا انتریکا سروتیپ انتریتیدیس

بهاره عبدلی^۱، محمدهادی خوش تقاضا^{۲*}، محمدمیر کریمی ترشیزی^۲، حمیدرضا قمی مرزدشتی^۲، سامان آبدانان مهدی‌زاده^۴

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. گروه علوم طیور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱)

چکیده

بیش از ۵۰ درصد بیماری‌های ناشی از غذا توسط باکتری‌های بیماری‌زا ایجاد می‌شوند و این عوامل بیماری‌زا خطرات بهداشتی و اقتصادی قابل توجهی را نشان می‌دهند. سالمونلا/انتریکا سروتیپ/انتریتیدیس (*SESE*)، یکی از شایع‌ترین پاتوژن‌های باکتریایی است که بیش از هر باکتری دیگری باعث بستری شدن و مرگ در بیمارستان می‌شود. پلاسمای غیرحرارتی، یک روش ابتکاری ضد عفونی‌کننده است که پتانسیل استفاده از یک استراتژی مداخله‌ای برای ایمنی مواد غذایی را نشان می‌دهد. این مطالعه، با هدف بررسی امکان غیرفعال کردن *SESE* از طریق یک دستگاه پلاسمای سرد اتمسفری تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD ACP) در فشار اتمسفر غیرحرارتی صنعتی انجام شد. برای ارزیابی کاهش *SESE*، هوا به‌عنوان گاز فرایند، تحت شرایط تجربی مختلف، با ظروف پتری حاوی غلظت اولیه 1×10^7 CFU/ml استفاده شد. طیف‌سنجی انتشار برای نظارت بر عوامل کلیدی غیرفعال‌سازی پلاسما، یعنی پرتوهای فرابنفش و گونه‌های واکنش‌پذیر استفاده شد. استفاده از دستگاه DBD ACP، منجر به کاهش غلظت *SESE* بیش از $7 \log$ CFU/ml پس از تیمار ۶۰ s شد. علاوه بر این، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که تیمار با پلاسمای اتمسفر سرد، باعث آسیب فیزیکی قابل توجهی به سلول‌ها می‌شود.

کلید واژه‌ها: پلاسمای سرد، بار میکروبی، طیف‌سنجی، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

تخلیه سد دی الکتریک^۸ (DBD) یکی از متداول ترین منابع تخلیه گاز اتمسفر غیرحرارتی است. پلاسمای سرد اتمسفری تخلیه سد دی الکتریک^{۱۰} (DBD ACP) اثر ضد عفونی سطحی را نشان می دهد و پتانسیل زیادی برای تیمار انواع محصولات غذایی دارد. منبع DBD ACP، حاوی یک ماده دی الکتریک (عایق) در مسیر تخلیه بین الکترودها است؛ در حالی که DBDها به طور گسترده برای مطالعه ضد عفونی مواد غذایی کاربرد دارند، عوامل مؤثر بر کارایی ضد عفونی آنها همچنان باید به دقت تجزیه و تحلیل شوند [۷-۸]. به طور خاص، تأثیر فرایند و عوامل میکروبیولوژیکی مؤثر، بر اثر ضد میکروبی DBD ACP در این پژوهش بررسی می شوند. پلاسمای DBD ACP، فناوری امیدوار کننده ای است که می تواند ایمنی مواد غذایی را با کمترین تأثیر بر کیفیت غذا در شرایط بهینه بهبود بخشد [۹-۱۰]. هنگامی که مسائل مربوط به افزایش مقیاس منابع پلاسمای، به طور مناسب مورد توجه قرار گیرند، فناوری DBD ACP سازگاری گسترده تری در صنایع غذایی پیدا خواهد کرد. هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد دستگاه DBD ACP برای غیرفعال کردن SESE است. به منظور توجیه کاربرد مؤثر این دستگاه غیرحرارتی در کنترل مشکلات باکتریایی مرتبط با غذا، کاهش باکتری باید در کوتاه ترین زمان ممکن روی دهد.

۲. مواد و روشها

۲.۱. سویه های باکتریایی و کشت

سالمونلا انتریکا سروتیپ انتریپتیدیس (RITCC 1695)^{۱۱} از مجموعه ای مؤسسه تحقیقات واکسن و سرم سازی رازی تهیه شد. برای اطمینان از حفظ آن، کشت استوک به دقت در دمای سرد 80°C با گلیسرول ۱۵٪ نگهداری شد. کشت های کاری تازه با استفاده از ۲۰ ml برات سویا تریپتیک^{۱۲} (TSB) (DifcoTM, MD, USA) با تلقیح کشت های منجمد و انکوبه کردن آنها به مدت ۲۴ h در دمای 37°C تهیه شد. به منظور کشت از آگار زایلوز لیزین

۱. مقدمه

میکروارگانیزم های منتقل شده از غذا، یکی از بزرگ ترین نگرانی ها در صنایع غذایی هستند. این میکروارگانیزم ها، از غذا مانند لیستریا مونوسیژنوز، اشریشیا کلی، سالمونلا^۱ و ویبریو^۲ کمپیلوباکتر ژژونی^۳ و هپاتیت A معمولاً در محصولات غذایی یافت می شوند و می توانند باعث بیماری های شدیدی در انسان شوند. از این رو، ضد عفونی مواد غذایی قبل از بسته بندی برای استریل کردن انجام می شود. روش های سنتی ضد عفونی میکروارگانیزم ها بر اساس اصول شیمیایی، حرارتی، رادیولوژیکی و فیزیکی است. این روش ها بسیار موفق هستند، اما پیچیده اند و انجام آنها مستلزم زمان و انرژی بیشتری است. پلاسمای سرد تکنیک جدیدی در زمینه فرآوری مواد غذایی است که تیمار آن، بر خواص فیزیکی، شیمیایی و تغذیه ای محصولات غذایی تأثیری ندارد یا بسیار ناچیز است [۱-۴].

پلاسمای سرد اتمسفری^۶ (ACP)، یک فناوری جدید و غیرحرارتی برای تیمار محصولات غذایی، به منظور کاهش میکروارگانیزم های موجود در مواد غذایی، بدون تأثیر بر کیفیت است. گونه های شیمیایی فعال در ACP، می توانند میکروارگانیزم ها را بر روی سطوح غذا به دلیل خواص ضد میکروبی خود غیرفعال کنند [۵]. دو گونه اصلی مؤثر در فرایند پلاسمای هوا، گونه های اکسیژن فعال^۷ (ROS) و گونه های نیتروژن فعال^۸ (RNS) هستند. مولکول های برانگیخته N_2 و رادیکال اکسید نیتریک (NO) گونه های اصلی RNS هستند. ازن (O_3)، اکسیژن منفرد (O^{\cdot} یا O)، سوپراکسید (O_2)، پراکسید ($\text{O}_2^{\cdot-}$ یا H_2O_2)، و رادیکال های هیدروکسیل (OH) گونه های فعال اکسیژن هستند که می توانند به طور مؤثر میکروارگانیزم ها را غیرفعال کنند. خاصیت ضد میکروبی این گونه های اکسیداتیو را می توان به پراکسیداسیون لیپیدی در غشای سلولی، اکسیداسیون پروتئین ها و DNA در سلول های میکروبی نسبت داد [۶].

8 Reactive Nitrogen Species

9 Dielectric barrier discharge

10 Dielectric barrier discharge atmospheric pressure cold plasma

11 Salmonella enterica serovar Enteritidis

12 Tryptic Soy Broth

1 Listeria monocytogenes

2 Escherichia coli

3 Salmonella

4 Vibrio

5 Campylobacter jejuni

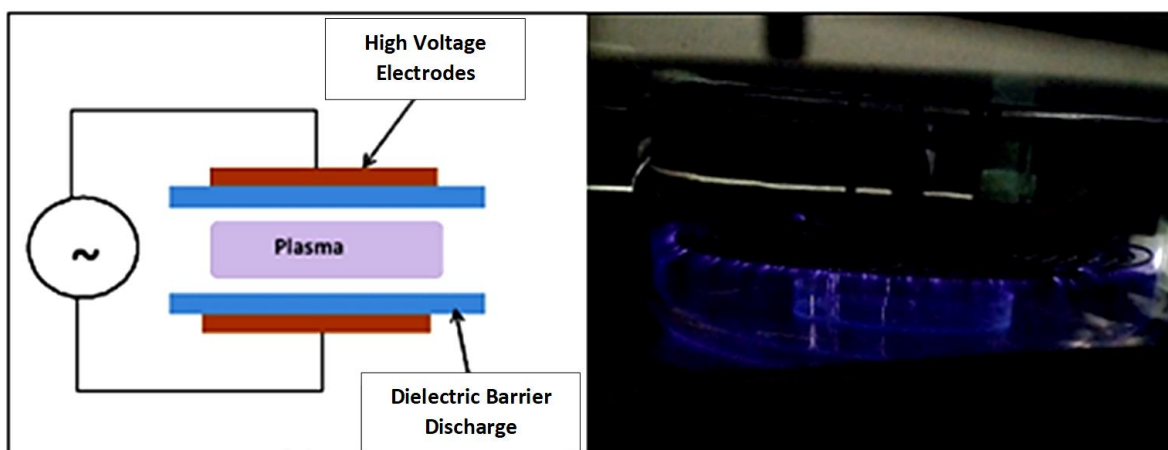
6 Atmospheric pressure cold plasma

7 Reactive Oxygen Species

دستگاه پلاسما DBD ACP با ترکیبی از الکترودهای بالایی با ولتاژهای بالای ۶ kHz و ۱۰ kV مجهز شده بود، در حالی که الکترودهای پایینی با ولتاژهای متغیر تقریباً ۲۵ و ۵۰ Hz بودند. علاوه بر این، DBD از دو الکترودهای موازی تشکیل شده بود که قطر هر کدام، ۲۲ × ۱۵ cm است. به منظور استفاده به عنوان یک مانع دی‌الکتریک، نمونه‌های SESE در ظروف پتری (BIPEE polystyrene Petri dish) 35 × 10 mm, sterile در یک کاسه شیشه‌ای به ضخامت ۵mm ساخته شده از کوارتز قرار گرفتند. در یک محفظه پلاسما (شکل ۱)، ولتاژ ۲۵ kV در فواصل مختلف به نمونه‌ها اعمال شد. سپس نمونه‌ها از زمان صفر تا ۶۰s در هوا و در فشار اتمسفر تیمار شدند [۱۴-۱۱،۹].

دئوکسی کولات^۱ (DifcoTM, MD, USA) (XLD) استفاده شد. هنگامی که کلنی‌های روی آگار XLD، به مدت ۲۴ h در دمای ۳۷ °C بالغ شدند، کلنی‌های سیاه جدا شده و در ادامه به بطری‌های پلاستیکی حاوی ۱۰۰ ml TSB منتقل شدند. سپس کشت به آرامی با استفاده از تکان‌دهنده اوربیتال^۲، با سرعت ۱۰۰RPM، به مدت ۲۲ h ساعت در دمای ۳۷ °C تکان داده شد تا زمانی که باکتری‌ها شروع به رشد کنند [۷].

۲.۲. دستگاه پلاسما DBD ACP



شکل (۱) تصویر شماتیک از تنظیمات آزمایشی تخلیه پلاسمای سرد اتمسفری سد دی‌الکتریک

Fig 1. A schematic illustration for the experimental setup of the DBD ACP

دستگاه پخش‌کننده سلولی استریل در پتری‌دیش خالی توزیع و همین روش روی نوترینت آگار تکرار شد [۱۵].

۴.۲. آنالیز میکروبیولوژیکی

برای آنالیز میکروبیولوژیکی، کنترل‌های مناسب در طرح آزمایشی گنجانده شد. این کنترل‌ها شامل نمونه‌های تلقیح‌شده و همچنین نمونه‌های تیمار نشده بودند که به ترتیب برای تخمین جمعیت باکتریایی اولیه و ارزیابی تغییرات رشد میکروبی پس از یک دوره نگهداری ۲۴ h

۳.۲. آماده‌سازی نمونه

با استفاده از استاندارد لوله مک‌فارلند شماره ۱ سوسپانسیون باکتری SESE تا غلظت ۱۰^۸ CFU/ml آماده شد. کشت به مدت یک شب^۳ در دمای ۳۷ °C تحت انکوباسیون قرار گرفت و سپس در ۷۰۰۰ x g به مدت ۵ min در دمای ۴ °C سانتریفیوژ شد. پس از تهیه سوسپانسیون، ۱ml از این سوسپانسیون حاوی ۱۰^۷ CFU باکتری با

3 Over night

1 Xylose Lysine Deoxycholate
2 Orbital Shaker

چسبیدن به اسلایدها در دمای اتاق به مدت ۶۰ min بودند. سپس اسلایدها در بافر فسفات سالین (PBS) شسته شده، در هوا خشک و به مدت ۴۰ min با ۲/۵٪ گلو تار آلدئید^۴ ثابت شدند. نمونه‌ها متعاقباً در غلظت‌های مختلف اتانول (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ولتاژ/حجم اتانول در آب؛ ۲۰ min در هر غلظت) آب‌گیری، و در جریان آرام در هوا خشک شدند.

۷.۲. تحلیل آماری

تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۰) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. جمعیت‌های SESE که تیمار DBD ACP را تحمل کردند تحت آنالیز واریانس قرار گرفتند، که متعاقباً توسط آزمون تفاوت معنی‌دار فیشر^۵ (LSD) در آستانه p-value کمتر از ۰/۰۵ برای تعیین معنی‌داری دنبال شد.

۳. نتایج و بحث

اثرات تخلیه در پلاسمای سرد هوای اتمسفر بر سویه‌های SESE مطالعه شد. تیمارهای مستقیم DBD ACP در شکل ۲ نشان داده شده است. دستگاه DBD ACP در غیرفعال کردن باکتری‌ها در چند ثانیه اول مؤثر بود. مناطق شفاف نشان‌دهنده مناطق رشد غیر فعال میکروارگانیسم‌ها است. اثر باکتری‌کشی مطلوب در فاصله ۲۰ mm تا ۳۰ mm از مرکز الکترود رخ داده است. حداقل زمان غیرفعال‌سازی پلاسمای برای سلول‌های SESE ۶۰ s در فاصله ۲۰ mm از ساختار الکترود بود. افزایش زمان تیمار پلاسمای به میزان چشمگیری تعداد میکروارگانیسم‌های زنده‌مانده را کاهش داد (شکل ۳).

استفاده شدند. علاوه بر این، کنترل‌هایی که تحت تیمار DBD ACP قرار گرفته بودند که با تلقیح و یا بدون تلقیح رها شدند. نمونه‌های تیمار شده از ظرف پتری استخراج و در آب پپتون بافر (BPW) بدون مواد مغذی آگار جمع‌آوری شدند. متعاقباً، آنها به صورت سریالی در BPW رقیق شدند و مطابق با روش مایل و میسر^۱ روی تریپتیک سویا آگار^۳ (TSA) قرار گرفتند [۱۵]. حداقل حد تشخیص log CFU/ml ۱/۰ با استفاده از روش کشت سطحی تعیین شد. پس از یک دوره انکوباسیون ۲۴ h در دمای ۳۷ °C، شمارش کلنی‌ها آغاز و برای هر تکرار، سه پلیت برای هر تیمار استفاده شد.

۵.۲. طیف‌سنجی انتشار نوری

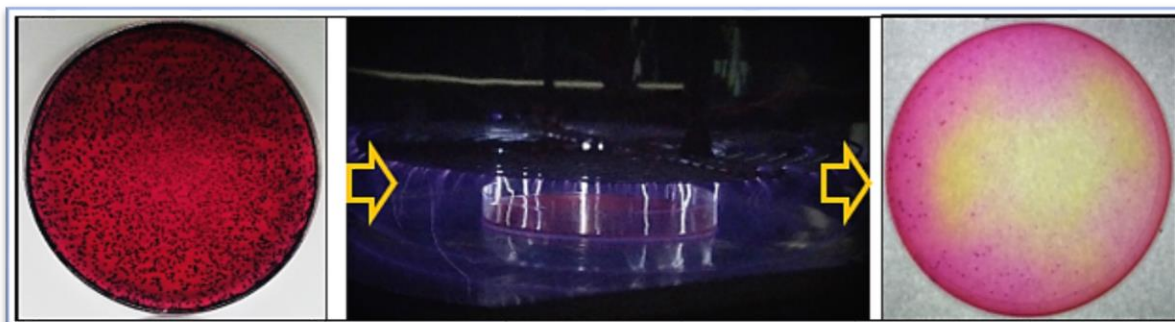
برای شناسایی حالات برانگیخته در پلاسمای تعیین‌گونه مربوط به شعله ACP، از طیف‌سنجی انتشار نوری (Emerald C0R10, Teksan Co, Iran) با وضوح ۰/۵ nm استفاده شد. محدوده طیفی بین ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ nm تنظیم گردید و طیف‌های حاصل با استفاده از خط پایگاه داده طیف‌اتمی، برای شناسایی گونه‌های مختلف آنالیز شدند. طیف انتشار گونه‌های فعال در فاصله ۵ mm از ابتدا و ۱۰ mm از محور جت پلاسمای جمع‌آوری شد.

۶.۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی

اسلایدهای شیشه‌ای استریل به قطعات ۱۰ × ۱۰ mm در یک ظرف پتری استریل برش داده شدند. تهیه و تیمار تلقیح SESE شامل انواع سیستم‌ها و فرایندهای پلاسمای بود. به طور خاص، ۱ mm تلقیح SESE، تیمار نشده و ۱ mm تلقیح SESE تیمار شده با DBD ACP مجاز به

4 Glutaraldehyde Fisher's
5 Fisher's

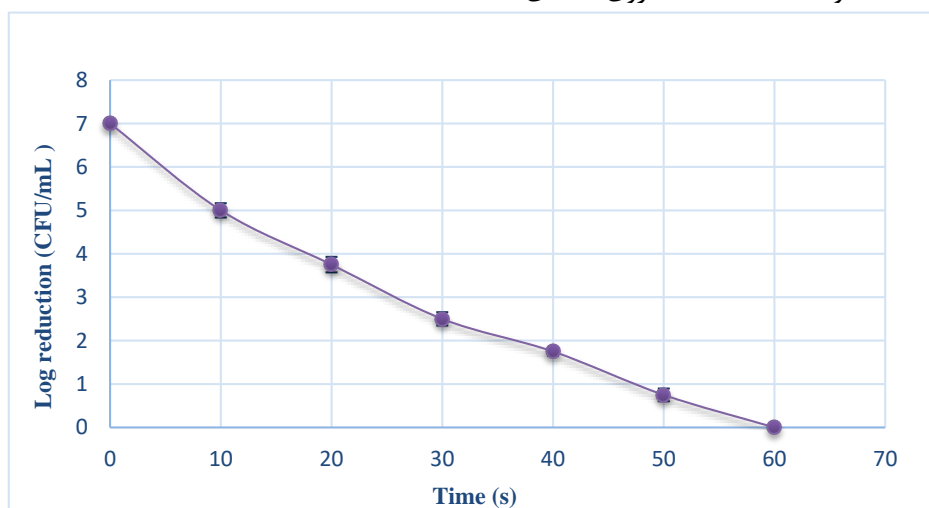
1 Buffered Peptone Water
2 Miles & Misra
3 Tryptic Soy Agar



شکل (۲) غیرفعال‌سازی رشد *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis* با روش تخلیه پلاسمای سرد اتمسفری سد دی‌الکتریک
 Fig 2. Inactivation of the *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis* growth by the DBD ACP method

سلولی تجمع می‌یابند که می‌تواند منجر به پارگی سلول میکروارگانیسم شود. در حالی که تماس مستقیم با باکتری‌ها برای این فرایند ضروری است، تماس غیرمستقیم از طریق پلاسمای هنوز تا حدی تأثیر دارد. علاوه بر این، اشعه ماوراءبنفش پلاسمای می‌تواند به‌طور موثری باکتری‌ها را با القای دیمرهای تیمین و آسیب‌رساندن به پروتئین‌ها غیرفعال کند و تیمار ترکیبی با ROS^۱ و UV^۱، سرعت غیرفعال‌سازی را افزایش دهد [۱۶، ۱۳، ۹].

اثر بخشی تیمار پلاسمای DBD ACP در غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها توسط محققان مختلف نشان داده شده است. اثر ضدباکتریایی تیمار DBD ACP بسیار کارآمد است و عوامل فیزیکی و شیمیایی در مکانیسم غیرفعال‌سازی باکتری نقش دارند. دمای گاز تولید شده در طی تیمار DBD ACP باکتری را غیرفعال نمی‌کند و قرارگرفتن مناسب در معرض پلاسمای و زمان از عوامل مهم غیرفعال شدن *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis* است. ذرات باردار تولیدشده توسط DBD ACP روی غشای

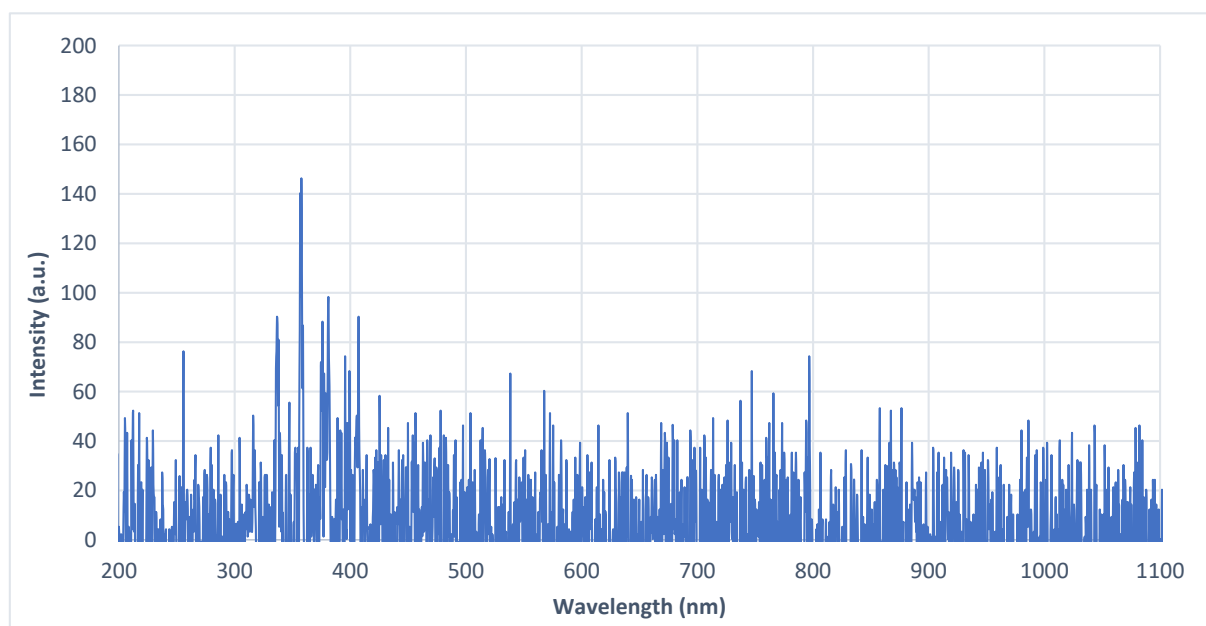


شکل (۳) اثر زمان‌های مختلف پلاسمای سرد بر جمعیت *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis*
 Fig 3. The effect of different durations of cold plasma on the *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis*

عامل اصلی غیرفعال شدن باکتری‌ها هستند. برای شناسایی گازها می‌توان از OES استفاده کرد (شکل ۴). به خوبی نشان داده شده است که تخلیه‌های پلازما مقادیر قابل توجهی از گونه‌های اتمی برانگیخته (مانند H، O و N) و همچنین نوارهای مولکولی (مانند N_2 ، N_2^+ ، NO، O_2 ، OH) تولید می‌کنند که قادر به تولید واکنش‌های برانگیختگی و تفکیک الکترون و معمولاً دارای خاصیت ضد میکروبی هستند.

۱.۳. تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی انتشار نوری

گونه‌های شیمیایی تولید شده در سیستم DBD ACP با استفاده از طیف‌سنجی انتشار نوری^۱ (OES) شناسایی شد. ترشحات پلازما گونه‌های اتمی و مولکولی برانگیخته‌ای ایجاد می‌کند که دارای خواص ضد میکروبی هستند. واکنش‌های ACP با تخریب ساختارها و اجزای سلولی میکروبی و مرگ میکروارگانیسم‌ها، نقش مهمی در خواص ضد میکروبی DBD ACP ایفا می‌کنند. گونه‌های فعال



شکل (۴) طیف‌سنجی انتشار نوری تخلیه پلاسمای سرد اتمسفری سد دی الکتریک

Fig 4. The DBD ACP optical emission spectrometry

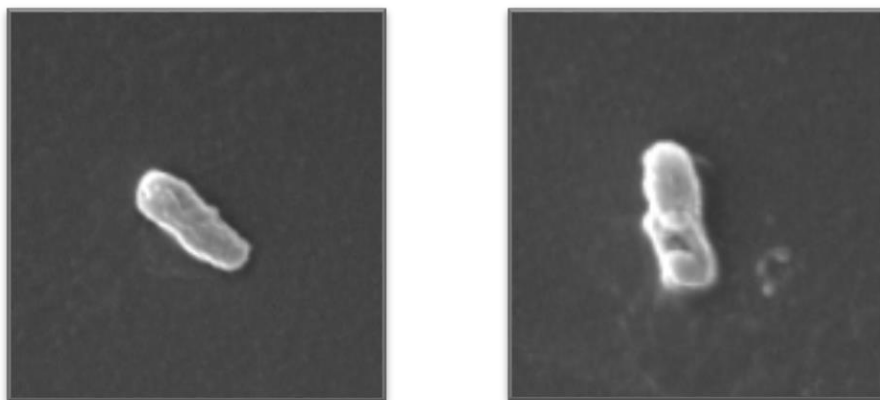
[۹]. عوامل فعال اصلی که در غیرفعال کردن اهداف میکروبی به طور مستقل یا با هم‌افزایی نقش دارند، شامل گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) (اکسیژن منفرد،^۵ آنیون سوپراکسید،^۴ ازن^۵)، گونه‌های نیتروژن فعال (RNS) (نیتروژن اتمی^۶، نیتروژن برانگیخته^۷، اکسید نیتریک^۸)، ذرات باردار، ذرات خنثی و فوتون‌های UV است که ظرفیت ضدباکتریایی پلازما برای غیرفعال کردن گونه‌های SESE را با موفقیت نشان داده شده است [۲۰-۱۶].

۲.۳. تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی

تفاوت‌های مورفولوژیکی بین سلول‌های سالمونلا/نتریکا سروتیپ/نتریتیدیس تیمار شده با پلازما و تیمار نشده، توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) مشهود بود (شکل ۵). گروه کنترل ساختار SESE دست‌نخورده را نشان دادند، در حالی که تیمار DBD ACP باعث تخریب ساختار SESE، فروپاشی سطح و بیرون راندن محتوای باکتری و در نتیجه سلول غیرفعال گردید

5 Ozone
6 Atomic Nitrogen
7 Excited Nitrogen
8 Nitric Oxide

1 Optical emission spectroscopy
2 Scanning electron microscopy
3 Singlet Oxygen
4 Superoxide Anion



شکل (۵) تصاویر SEM از *Salmonella enterica* سروتیپ *انتریتیدیس* تیمار شده با پلاسما (سمت راست) و کنترل (سمت چپ) در ۶۰ ثانیه
Fig 5. SEM images of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis treated with plasma (right) and control (left) in 60 s

فرابنفش در فرایند، برای ضد عفونی تضمینی با قیمت قابل قبول، مورد تقاضای صنعت باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی بنیاد ملی علوم ایران پشتیبانی شده است و نویسندگان قدردان این حمایت هستند.

۳.۳. نتیجه‌گیری

این تحقیق، توانایی دستگاه‌های پلاسمایی فشار اتم سفر هوای صنعتی را برای جلوگیری از *SESE* نشان می‌دهد. راندمان دستگاه پلاسما بالا بود و DBD ACP با سرعت بیشتری به حداکثر کاهش باکتریایی دست یافت. استفاده از پلاسمای هوا در فشار اتمسفر، ممکن است به دلیل ویژگی‌های غیر سمی و طراحی ساده، جایگزین روش‌های سنتی استریل‌سازی شود و با وجود نقش جزئی تابش

منابع

- [1] Raybaudi-Massilia, R. M., Mosqueda-Melgar, J., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Control of pathogenic and spoilage microorganisms in fresh-cut fruits and fruit juices by traditional and alternative natural antimicrobials. *CRFSFS.*, 8(3), 157-180. doi: org/10.1111/j.1541-4337.2009.00076.x.
- [2] Subramanian, A., Harper, W. J., & Rodriguez-Saona, L. E. (2009). Rapid prediction of composition and flavor quality of cheddar cheese using ATR-FTIR spectroscopy. *J. Food Sci.*, 74(3), C292-C297. doi: org/10.1111/j.1750-3841.2009.01111.x.
- [3] Scallan, E., Hoekstra, R. M., Angulo, F. J., Tauxe, R. V., Widdowson, M. A., Roy, S. L., Jones, J.L., Griffin, P. M. (2011). Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens. *Emerg. Infect. Dis.*, 17(1), 7. doi: org/10.3201/eid1701.p11101.
- [4] Mandal, R., Singh, A., & Singh, A. P. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends Food Sci.*, 80, 93-103. doi: org/10.1016/j.tifs.2018.07.014.
- [5] Turtoi, M. and Borda, D., (2014). Decontamination of egg shells using ultraviolet light treatment. *J. World's Poult.*, 70(2), pp.265-278. doi: org/10.1017/S0043933914000282.
- [6] Baier, M., Görgen, M., Ehlbeck, J., Knorr, D., Herppich, W. B., & Schlüter, O. (2014). Non-thermal atmospheric pressure plasma: Screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on

- perishable fresh produce. *IFSET.*, 22, 147-157. doi: org/10.1016/J.IFSET.2014.01.011.
- [7] Wan, Z., Chen, Y., Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). High voltage atmospheric cold plasma treatment of refrigerated chicken eggs for control of *Salmonella* Enteritidis contamination on egg shell. *LWT - Food Sci. Technol.*, 76, 124-130. doi: org/10.1016/J.LWT.2016.10.051.
- [8] Hernández-Torres, C. J., Reyes-Acosta, Y. K., Chávez-González, M. L., Dávila-Medina, M. D., Kumar Verma, D., Martínez-Hernández, J. L., Narro-Céspedes, R. I., & Aguilar, C. N. (2022). Recent trends and technological development in plasma as an emerging and promising technology for food biosystems. *Saudi J. Biol. Sci.*, 29, 1957–1980. doi: org/10.1016/j.sjbs.2021.12.023.
- [9] Abdoli, B., Khoshtaghaza, M. H., Ghomi, H., Torshizi, M. A. K., Mehdizadeh, S. A., Pishkar, G., & Dunn, I. C. (2024). Cold atmospheric pressure air plasma jet disinfection of table eggs: Inactivation of *Salmonella enterica*, cuticle integrity and egg quality. *Int. J. Food Microbiol.* 410. doi: org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110474.
- [10] Ragni, L., Berardinelli, A., Vannini, L., Montanari, C., Sirri, F., Guerzoni, M. E., & Guarnieri, A. (2010). Non-thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs. *J. Food Eng.*, 100(1), 125–132. doi: org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.036.
- [11] Marzdashty, H. R. G., Safa, N. N., & Golghand, M. R. (2017). *U.S. Patent Application No. 15/409,457*.
patents.google.com/patent/US20170127506A1/en (Accessed: 3 June 2022).
- [12] Tolouie, H., Mohammadifar, M. A., Ghomi, H., & Hashemi, M. (2021). Argon and nitrogen cold plasma effects on wheat germ lipolytic enzymes: Comparison to thermal treatment. *Food Chem.*, 346, 128974. doi: org/10.1016/j.foodchem.2020.128974.
- [13] Rezaei, S., Ebadi, M. T., Ghobadian, B., & Ghomi, H. (2021). Optimization of DBD-Plasma assisted hydro-distillation for essential oil extraction of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) seed and spearmint (*Mentha spicata* L.) leaf. *JMAPS.*, 24, 100300. doi: org/10.1016/j.jarmap.2021.100300.
- [14] Dasan, B. G., Yildirim, T., & Boyaci, I. H. (2018). Surface decontamination of eggshells by using non-thermal atmospheric plasma. *Int. J. Food Microbiol.*, 266, 267-273. doi: org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.021.
- [15] Miles, A. A., Misra, S. S., & Irwin, J. O. (1938). The estimation of the bactericidal power of the blood. *J. Infectiology & Epidemiol.*, 38(6), 732-749. doi: org/10.1017/S002217240001158X.
- [16] Mattick, K. L., Jørgensen, F., Wang, P., Pound, J., Vandeven, M. H., Ward, L. R., Legan, J. D., Lappin-Scott, H.M & Humphrey, T. J. (2001). Effect of challenge temperature and solute type on heat tolerance of *Salmonella* serovars at low water activity. *AEM.*, 67(9), 4128-4136. doi: org/10.1128/AEM.67.9.4128-4136.2001.
- [17] Al-Rawaf, A. F., Fuliful, F. K., Khalaf, M. K., & Oudah, H. K. (2018). Studying the non-thermal plasma jet characteristics and application on bacterial decontamination. *J. Theor. Appl. Phys.*, 12(1), 45-51. doi: org/10.1007/s40094-018-0279-y.
- [18] Smadi, H., Sargeant, J. M., Shannon, H. S., & Raina, P. (2012). Growth and inactivation of *Salmonella* at low refrigerated storage temperatures and thermal inactivation on raw chicken meat and laboratory media: mixed effect meta-analysis. *J. Epidemiol. Glob. Health.*, 2(4), 165-179. doi: org/10.1016/j.jegh.2012.12.001.
- [19] Scholtz, V., Pazlarova, J., Souskova, H., Khun, J., & Julak, J. (2015). Nonthermal plasma - A tool for decontamination and disinfection. *Biotechnol. Adv.*, 33(6), 1108–1119. doi: org/10.1016/j.biotechadv.2015.01.002.
- [20] Lin, C. M., Herianto, S., Syu, S. M., Song, C. H., Chen, H. L., & Hou, C. Y. (2021). Applying a large-scale device using non-thermal plasma for microbial decontamination on shell eggs and its effects on the sensory characteristics. *LWT*, 142, 111067. doi: org/10.1016/j.lwt.2021.111067.