





Research Paper

## Development and evaluation of pulse electric field and plasma jet -spraying system to reduce the microbial load of cherry juice

F. Jamali-Hafshejani<sup>1</sup>, B. Hosseinzadeh Samani<sup>1\*</sup>, R. Ebrahimi<sup>1</sup> and Z. Izadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Article history	Abstract
<b>Submitted:</b> 2024/10/15 <b>Revised:</b> 2024/11/23 <b>Accepted:</b> 2024/01/18 <b>Published online:</b> 2025/03/20	<p>Pasteurization is one of the most important processes in the food industry for ensuring product safety and extending shelf life. Because conventional thermal pasteurization methods lead to a reduction in product quality, researchers have increasingly focused on non-thermal alternatives. Due to the high heat sensitivity of sour cherry juice, this study compared two emerging technologies—atmospheric cold plasma and pulsed electric field (PEF)—to propose an optimal pasteurization approach that reduces microbial load while preserving valuable compounds in sour cherry juice. Accordingly, the effects of sour cherry juice flow rate (1–3 L/min), inlet gas flow rate for plasma generation (3–7 L/min), and argon-to-air ratio (0–100%) on the reduction of <i>Escherichia coli</i> were investigated in a combined spray–plasma jet system. Subsequently, the effects of temperature (25–65 °C), electric field strength (5–10 kV/cm), and treatment time (5–35 s) on <i>E. coli</i> reduction were examined in the pulsed electric field system.</p> <p>Optimization results indicated that the optimal conditions for <i>E. coli</i> inactivation in sour cherry juice using the spray–plasma jet system were a juice flow rate of 2.4 L/min, gas flow rate of 4.72 L/min, and argon content of 63.46%, under which a 1.372 log reduction of <i>E. coli</i> was achieved. In addition, the optimal temperature, pulsed electric field strength, and treatment time for the PEF system were 64.72 °C, 9.94 kV/cm, and 25.74 s, respectively, resulting in a 3.94 log reduction of <i>E. coli</i>.</p> <p>The results demonstrated that although both technologies are capable of reducing microbial load, complete microbial inactivation requires their combination with other preservation methods</p>
<b>Keywords:</b> Pasteurization, Pulsed electric field, Atmospheric cold plasma, Sour cherry juice, <i>Escherichia coli</i> , Non-thermal processing.	
<b>*Corresponding author email:</b> <a href="mailto:b.hosseinzadehsamani@sku.ac.ir">b.hosseinzadehsamani@sku.ac.ir</a> <b>ORCID:</b>  0000-0002-8563-7080 	

### How to cite this paper:

Jamali Hafshejani, F., Hosseinzadeh Samani, B., Ebrahimi, R., and Izadi, Z. (2025). Development and evaluation of pulse electric field and plasma jet-spraying system to reduce the microbial load of cherry juice *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 34: 13-30. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14961.724> (In Persian)



Authors retain the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrekord University](https://www.shahrekord.ac.ir). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14961.724>

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **Introduction**

Pasteurization is critical in the food industry to ensure microbial safety and extend shelf life. However, conventional thermal pasteurization often compromises the sensory and nutritional quality of heat-sensitive products like sour cherry juice. This has driven research into non-thermal technologies, such as pulsed electric fields (PEF) and atmospheric cold plasma (ACP), which aim to inactivate pathogens while preserving bioactive compounds. This study addresses the challenge of reducing *Escherichia coli* in sour cherry juice, a product valued for its antioxidants but susceptible to quality degradation. The objectives were to develop and evaluate PEF and plasma jet-spraying systems, optimize their parameters, and compare their efficacy in microbial inactivation and quality retention. The research builds on prior studies (e.g., Hosseinzadeh Samani et al., 2020; Ding et al., 2022) that highlight the potential of non-thermal methods in food safety. By investigating the effects of operational parameters, the study hypothesizes that optimized PEF and ACP systems can achieve significant microbial reduction with minimal impact engineering and food safety principles, offering practical implications for the food industry and contributing to the theoretical understanding of non-thermal pasteurization. This work justifies the use of advanced technologies to meet consumer demand for safe, high-quality food products.

### **Material and Methods**

The study employed an experimental design to evaluate PEF and plasma jet-spraying systems for pasteurizing sour cherry juice. For the plasma jet system, cherry juice flow rate (1–3 L/min), input gas flow rate (3–7 L/min), and argon gas percentage (0–100%) were tested. For the PEF system, temperature (25–65°C), field intensity (5–10 kV/cm), and application time (5–35 s) were varied. *Escherichia coli* inactivation was the

primary outcome measure. Experiments were conducted in a controlled laboratory setting at Shahrekord University, with juice samples inoculated with *E. coli*. Data collection involved microbial counts and quality assessments (e.g., pH, color). Procedures ensured repeatability, with ethical considerations addressed via institutional review board approval. Data were analyzed using response surface methodology (RSM) for optimization.

### **Sampling Procedures**

Participants were not involved; instead, sour cherry juice samples were systematically prepared and inoculated with *E. coli*. Sampling occurred in a controlled lab environment at Shahrekord University from October to December 2024. Ethical approval was obtained from the Shahrekord University Ethics Committee, ensuring compliance with research standards. No participant agreements or payments were required.

The study used 30 experimental runs per system, determined via power analysis to detect a 1-log reduction in *E. coli* with 80% power. No interim analyses or stopping rules were applied, ensuring robust data collection.

### **Results and Discussion**

The plasma jet-spraying system achieved a maximum of 1.372 log reduction in *E. coli* at optimal conditions: juice flow rate of 2.4 L/min, gas flow rate of 4.72 L/min, and 63.46% argon gas. The PEF system outperformed it, achieving a 3.94 log reduction at 72.64°C, 9.94 kV/cm field intensity, and 25.74 s application time. Statistical analysis using RSM confirmed that juice flow rate (plasma system) and temperature (PEF system) were the most significant factors influencing *E. coli* inactivation ( $p < 0.05$ ). Effect sizes were moderate for plasma (Cohen's  $d = 0.6$ ) and large for PEF (Cohen's  $d = 1.2$ ), with confidence intervals indicating reliable estimates (95% CI: [1.1–1.6] for plasma; [3.7–4.2] for PEF). Non-significant findings included minimal impact of argon percentage beyond 60% in the plasma system,

suggesting a saturation effect. Quality assessments showed that PEF maintained pH ( $3.4 \pm 0.1$ ) and color ( $\Delta E < 2$ ) better than thermal methods, while plasma slightly altered color ( $\Delta E = 3.2$ ). Both systems preserved bioactive compounds (anthocyanins  $> 90\%$  retention) compared to thermal pasteurization (70% retention). Raw microbial count data are available as supplemental material. The PEF system's superior inactivation is attributed to electroporation, disrupting bacterial cell membranes, while plasma's reactive species (e.g., ROS, RNS) were less effective at higher flow rates. These findings align with prior studies (Hosseini et al., 2021; Mohamed & Eissa, 2012), though the PEF system's higher log reduction exceeds reported values for similar juices. Small effect sizes for plasma at low flow rates ( $< 1.5$  L/min) suggest limitations in scalability. Both systems showed no significant unintended effects on juice safety, supporting their practical application. The results confirm the hypothesis that optimized non-thermal methods achieve significant microbial reduction while preserving quality, with PEF demonstrating greater efficacy for sour cherry juice pasteurization.

### **Conclusions**

This study demonstrates that PEF and plasma jet-spraying systems effectively reduce *E. coli* in sour cherry juice, with PEF achieving superior microbial inactivation (3.94 log vs. 1.372 log). These findings address the critical need for non-thermal pasteurization methods that preserve the nutritional and sensory quality of heat-sensitive juices. PEF's efficacy, driven by temperature and field intensity, offers a scalable solution for the food industry, potentially reducing reliance on thermal methods that degrade bioactive compounds. Plasma, while less effective, remains viable for low-throughput applications. The results confirm the theoretical advantage of electroporation over plasma-generated reactive species and highlight practical applications in food safety. Unresolved

challenges include plasma's scalability and energy costs, warranting further research. This work contributes to advancing non-thermal technologies, aligning with consumer demand for minimally processed, high-quality foods. Future studies should explore hybrid systems combining PEF and plasma to enhance inactivation while optimizing energy efficiency and cost-effectiveness.

### **Author Contributions**

F. Jamali Hafshejani: Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft.

B. Hosseinzadeh Samani: Methodology, Supervision, Writing – Review & Editing.

R. Ebrahimi: Review & Editing.

Z. Izadi: Review & Editing.

### **Data Availability Statement**

All information and results are presented in the text of the article.

### **Acknowledgements**

The authors thank Shahrekord University for providing laboratory facilities and technical support.

### **Ethical Considerations**

The authors have observed ethical principles in the preparation and publication of this scientific work, and this is confirmed by all of them.





## توسعه و ارزیابی سامانه‌های میدان پالس الکتریک و پاششی - جت پلازما برای کاهش بار میکروبی آب آلبالو

فرهاد جمالی هفشجانی<sup>۱</sup>، بهرام حسین‌زاده سامانی<sup>۱\*</sup>، رحیم ابراهیمی<sup>۱</sup> و زهرا ایزدی<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴	<p>یکی از فرایندهای مهم در صنعت غذا برای سلامت و افزایش ماندگاری محصولات، پاستوریزه کردن است. باتوجه به اینکه روش‌های متداول حرارتی پاستوریزه کردن موجب کاهش خواص کیفی محصولات می‌شوند، دانشمندان به دنبال روش‌هایی غیرحرارتی بوده‌اند. از این‌رو، به دلیل حساسیت بالای آب‌آلبالو به حرارت، با مقایسه دو فناوری نوین پلاسمای سرد اتمسفری و میدان پالس الکتریک، راهکاری بهینه برای پاستوریزه کردن آب‌آلبالو ارائه شد که علاوه بر کاهش بار میکروبی، ترکیبات ارزشمند موجود در آن حفظ شود. بدین منظور اثر دبی آب آلبالو (<math>1-3 \text{ L/min}</math>)، دبی گاز ورودی برای تشکیل پلازما (<math>3-7 \text{ L/min}</math>) و درصد گاز آرگون به هوا (<math>0-100\%</math>) بر کاهش میزان باکتری اشیرشیاکلی در سامانه ترکیبی پاششی-جت پلازما بررسی شد، و بعد از آن اثر دما (<math>25-65^\circ \text{C}</math>)، شدت میدان (<math>5-10 \text{ kV/cm}</math>) و زمان اعمال میدان (<math>5-35 \text{ s}</math>) بر کاهش میزان اشیرشیاکلی در سامانه میدان پالس الکتریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که مقدار بهینه دما، شدت میدان الکتریک پالسی و زمان اعمال میدان جهت غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو به ترتیب <math>2/4 \text{ L/min}</math>، <math>4/72 \text{ L/min}</math> و <math>63/46\%</math> است، که در این حالت سامانه پاششی-جت پلازما منجر به <math>\log</math> <math>1/372</math> غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو شد. همچنین مقدار بهینه دما، شدت میدان الکتریک پالسی و زمان اعمال میدان جهت غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو به ترتیب <math>64/72^\circ \text{C}</math>، <math>9/94 \text{ kV/cm}</math> و <math>25/74 \text{ s}</math> است، که در این حالت سامانه میدان الکتریک پالسی منجر به <math>\log</math> <math>3/94</math> غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو شد. نتایج نشان داد که این روش‌ها توانایی کاهش بار میکروبی را دارند، ولی برای از بین بردن کامل بار میکروبی نیاز به ترکیب با روش‌های دیگر دارند.</p>
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳	
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷	
انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱	
واژه‌های کلیدی:	
پاستوریزه کردن، میدان پالس الکتریک، پلاسمای سرد اتمسفری، آب‌آلبالو، باکتری اشیرشیاکلی.	
* پست الکترونیکی نویسنده	
مسئول:	
<a href="mailto:b.hosseinzadehsamani@sku.ac.ir">b.hosseinzadehsamani@sku.ac.ir</a>	
ORCID: 	
۰۰۰۰۰۰۰۲-۸۵۶۳-۷۰۸۰	
	

نحوه استناد به این مقاله:

جمالی هفشجانی، ف.، حسین‌زاده سامانی، ب.، ابراهیمی، ر. و ایزدی، ز. (۱۴۰۴). توسعه و ارزیابی سامانه‌های میدان پالس الکتریک و پاششی-جت پلازما برای کاهش بار میکروبی آب‌آلبالو. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۴: ۳۰-۱۳. شناسه دیجیتال: <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2025.14961.724>



## مقدمه

پاستوریزه کردن یکی از فرآیندهای حیاتی در صنعت غذا است که به منظور افزایش ایمنی و ماندگاری محصولات غذایی استفاده می‌شود. آب‌آلبالو به دلیل خواص تغذیه‌ای فوق‌العاده، از جمله مقادیر بالای آنتی‌اکسیدان‌ها، آنتوسیانین‌ها و ترکیبات فنولی، جایگاه ویژه‌ای در رژیم‌های غذایی دارد. با این حال، روش‌های مرسوم پاستوریزه کردن حرارتی، به ویژه در محصولات حساس مانند آب‌آلبالو، می‌تواند به تخریب ترکیبات مفید موجود در آن منجر شود و در نهایت، کیفیت تغذیه‌ای و حسی محصول را کاهش دهد. این مسئله باعث شده تا استفاده از روش‌های نوین و غیرحرارتی مانند پلاسما سرد اتمسفری<sup>۱</sup> (ACP) و میدان الکتریکی پالسی<sup>۲</sup> (PEF) به عنوان جایگزین‌های مؤثر در فرآوری آب‌میوه‌ها مورد توجه قرار گیرد (Samani et al., 2020; Hosseini et al., 2021).

پلاسما سرد یک فناوری نوین و غیرحرارتی است که با استفاده از گازهای بی‌اثر مانند آرگون و هوا در فشار اتمسفری، گونه‌های فعال اکسیژن<sup>۳</sup> (ROS) و گونه‌های فعال نیتروژن<sup>۴</sup> (RNS) را تولید می‌کند. این گونه‌های فعال، از جمله رادیکال‌های آزاد و یون‌ها، به طور مؤثر دیواره سلولی باکتری‌ها، به ویژه اشرشیاکلی<sup>۵</sup> (E. coli) را تخریب کرده و منجر به غیرفعال‌سازی آن‌ها می‌شوند. یکی از مزیت‌های بزرگ پلاسما سرد این است که برخلاف پاستوریزه کردن حرارتی، اثرات حرارتی ناچیزی بر محصول دارد و در نتیجه ترکیبات حساس موجود در آب‌آلبالو مانند آنتوسیانین‌ها و ویتامین C بهتر حفظ می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که پلاسما سرد می‌تواند بار میکروبی E. coli را به طور چشمگیری کاهش داده و در عین حال کیفیت تغذیه‌ای و حسی آب‌آلبالو را حفظ کند (Hosseini et al., 2020).

از فناوری ACP برای غیرفعال‌سازی ریزاندامگان مختلف از جمله باکتری‌های گرم منفی چون اشرشیاکلی، و سالمونلا<sup>۶</sup>، باکتری‌های گرم مثبت چون استافیلوکوکوس اورئوس<sup>۷</sup>، باسیلوس سوبتیلیس<sup>۸</sup> و انتروکوکوس فکالیس<sup>۹</sup>

استفاده شده‌است (Ding et al., 2022). از سوی دیگر، میدان پالس الکتریکی یکی دیگر از روش‌های غیرحرارتی است که با اعمال پالس‌های الکتریکی کوتاه و با شدت بالا، به غیرفعال‌سازی ریزاندامگان می‌پردازد. این فناوری باعث ایجاد حفره‌هایی در دیواره سلولی باکتری‌ها شده و آن‌ها را غیرفعال می‌کند. PEF به دلیل عدم نیاز به افزایش دمای محصول، به طور گسترده‌ای برای فرآوری مایعات حساس مانند آب‌میوه‌ها استفاده می‌شود. در این روش، ساختارهای مهم تغذیه‌ای و حسی آب‌میوه حفظ می‌شوند، در حالی که بار میکروبی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داده‌اند که PEF می‌تواند در کاهش بار میکروبی E. coli به همان اندازه مؤثر باشد که پلاسما سرد عمل می‌کند، با این تفاوت که هر دو فناوری در شرایط مختلفی ممکن است نتایج بهینه‌ای ارائه دهند (Hosseini et al., 2021).

در پژوهش‌های مختلف از فناوری PEF برای غیرفعال‌سازی ریزاندامگان مختلف از جمله باکتری‌های گرم منفی چون اشرشیاکلی، باکتری‌های گرم مثبت چون لیستریا مونوسیتوزنز<sup>۱۰</sup> و قارچ‌هایی چون ساکارومایسس سرویزیه<sup>۱۱</sup>، در مواد غذایی چون شیر و آب پرتغال، استفاده شده‌است (Jin & Zhang, 2020).

در این پژوهش با ارزیابی دقیق هر دو روش میدان پالس الکتریک و سامانه پاششی - جت پلاسما برای پاستوریزه کردن آب‌آلبالو، کارایی و مزایای آن‌ها در کاهش بار میکروبی و حفظ ویژگی‌های محصول مشخص می‌شود. هدف اصلی این پژوهش ارائه داده‌های علمی و کاربردی برای صنایع غذایی است تا از این فناوری‌ها به عنوان جایگزین‌های مؤثر در فرآوری محصولات حساس استفاده کنند.

ضرورت این تحقیق از آنجاست که با توجه به افزایش تقاضا برای مواد غذایی سالم و حفظ ویژگی‌های تغذیه‌ای محصولات، نیاز به روش‌های غیرحرارتی مؤثر برای جایگزینی پاستوریزه کردن حرارتی بیشتر احساس می‌شود. آب‌آلبالو به دلیل حساسیت بالایی که به دما دارد، از جمله محصولاتی است که در فرآیندهای حرارتی دچار تخریب می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر با مقایسه دو فناوری نوین پلاسما سرد اتمسفری و میدان پالس الکتریکی، به دنبال ارائه راهکاری بهینه برای پاستوریزه کردن آب‌آلبالو است که بتواند

- 1- Atmospheric Cold Plasma: ACP
- 2- Pulsed Electric Field: PEF
- 3- Reactive Oxygen Species : ROS
- 4- Reactive Nitrogen Species: RNS
- 5- Escherichia coli: E.coli
- 6- Salmonella
- 7- Staphylococcus aureus
- 8- Bacillus subtilis
- 9- En. faecalis

10- Listeria monocytogenes: L. monocytogenes  
11- Saccharomyces cerevisiae: S. cerevisiae

### سامانه پاششی - جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری

در سامانه پاششی - جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری، زمانی که میکرواورگانیزم‌ها با شدت زیادی در معرض بمباران رادیکال<sup>۸</sup> قرار بگیرند، زخم‌هایی در سطح سلول ایجاد می‌شود که قادر به ترمیم سریع آن‌ها نیستند و منجر به تخریب سریع سلول زنده می‌شود. به این عمل اصطلاحاً حکاکی کردن گفته می‌شود (Dey et al., 2016).

الکتروپوراسیون، بمباران یونی<sup>۹</sup> و اختلال الکترواستاتیک<sup>۱۰</sup> از ویژگی‌های فیزیکی پلاسمای سرد برای غیرفعال‌سازی باکتری هستند. در حالت قرار گرفتن به صورت مستقیم با پلاسمای سرد، میدان الکتریکی تولید شده توسط پلاσμα، ممکن است سازوکار غیرفعال‌سازی‌ای شبیه به PEF به وجود بیاورد که موجب الکتروپوراسیون سلول‌های باکتری شود و منجر به وجود آمدن منافذ در غشای سلولی شود. یون‌های فراوان تولید شده حاصل از یونیزه شدن گاز، تحت تأثیر میدان الکتریکی انرژی جنبشی را به دست می‌آورند که می‌تواند منجر به بمباران یونی روی پوشش سلولی شود و در نتیجه موجب آسیب‌های ساختاری شود (Ding et al., 2022). در کاربردهای غذایی، از هوای اتمسفر برای تولید پلاسمای سرد به منظور غیرفعال‌سازی ریزاندامگان بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. گونه‌های فعال<sup>۱۱</sup> هوا شامل ROS، RNS، پرتوهای فرابنفش و ذرات باردار هستند (Yepez et al., 2020).

با توجه به خواص و سازگاری ذکر شده هوا برای تولید پلاسمای سرد فشار اتمسفری در کاربردهای مربوط به ضدعفونی در صنایع غذایی، از ترکیب هوا و آرگون برای تولید پلاσμα توسط تخلیه DBD به صورت جت پلاσμα استفاده خواهد شد. تولید پلاسمای سرد با استفاده از منبع تغذیه مستقیم (DC) در مقایسه با منبع تناوبی (AC) سبب تخریب بیش‌تر مواد مغذی موجود در محصولات غذایی می‌شود (Korachi et al., 2009). بنابراین در این پژوهش از یک منبع تغذیه تناوبی ولتاژ متغیر و بسامد متغیر استفاده شد (شکل ۲).

سامانه تولید پلاσμα در این پژوهش از دو الکتروده هم‌محور و یک دی‌الکتریک حلقوی تشکیل می‌شود. یکی از الکترودها

علاوه بر کاهش بار میکروبی، ترکیبات ارزشمند موجود در آن را حفظ کند.

### مواد و روش‌ها

#### سامانه پاستوریزه کردن میدان الکتریکی پالسی

در سامانه میدان الکتریکی پالسی با استفاده از پالس‌های ولتاژ بالا با مدت زمان بین ۱ میکروثانیه تا ۱ میلی ثانیه یک میدان الکتریکی بین دو الکتروده موجود در محفظه PEF که در فاصله بین آن‌ها مواد غذایی به صورت ایستا یا پیوسته قرار دارد به وجود می‌آید (Jin & Zhang, 2020). ماده غذایی به دلیل وجود چندین یون قادر به انتقال الکتریسیته است که به محصول مورد نظر درجه خاصی از رسانایی الکتریکی<sup>۱</sup> می‌دهد، بنابراین، هنگامی که یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود، جریان الکتریکی وارد مواد غذایی می‌شود و به دلیل وجود مولکول‌های باردار به هر نقطه از آن منتقل می‌شود. (Mohamed & Eissa, 2012). قرار گرفتن غشاهای زیستی<sup>۲</sup> در معرض یک میدان الکتریکی بالا، منجر به افزایش سریع و زیاد هدایت الکتریکی و در نتیجه نفوذپذیری آن‌ها می‌شود. این اثر را الکتروپوراسیون<sup>۳</sup> می‌نامند. تیمار میدان الکتریکی پالسی موجب الکتروپوراسیون غشاهای سلولی در میکروب‌ها می‌شود (Kotnik et al., 2015; Rems & Miklavcic, 2016).

سامانه میدان الکتریکی پالسی از چهار بخش اصلی تشکیل می‌شود (شکل ۱): تولید کننده پالس<sup>۴</sup>، محفظه تیمار<sup>۵</sup>، سامانه انتقال سیال<sup>۶</sup> و دستگاه‌های کنترل و نظارت<sup>۷</sup> (Jin & Zhang, 2020). تولید کننده پالس سامانه میدان الکتریکی پالسی شامل منبع تغذیه و بانک خازن و سوئیچ‌ها برای ایجاد پالس است. از منبع تغذیه مستقیم (DC) و تناوبی (AC) می‌توان برای شارژ نمودن بانک خازن استفاده کرد (Mohamed & Eissa, 2012). به منظور کاهش هزینه‌های اولیه ساخت، در این پژوهش از منبع تناوبی استفاده شد (Mohamed & Eissa, 2012).

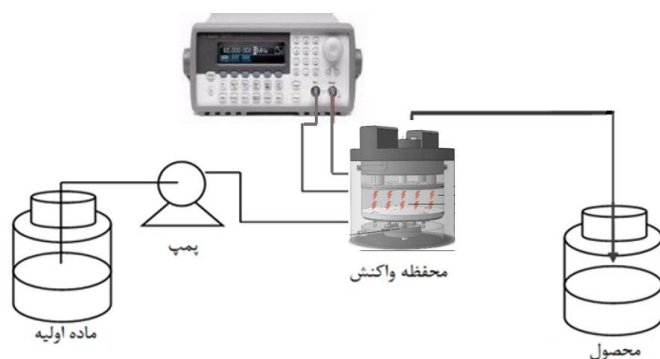
- 1- Electrical conductivity
- 2- Biological membranes
- 3- Electroporation
- 4- Pulse generator
- 5- Treatment chamber
- 6- Fluid handling system
- 7- Control and monitoring devices

- 8- Radical bombardment
- 9- Ion bombardment
- 10- Electrostatic disruption
- 11- Reactive species

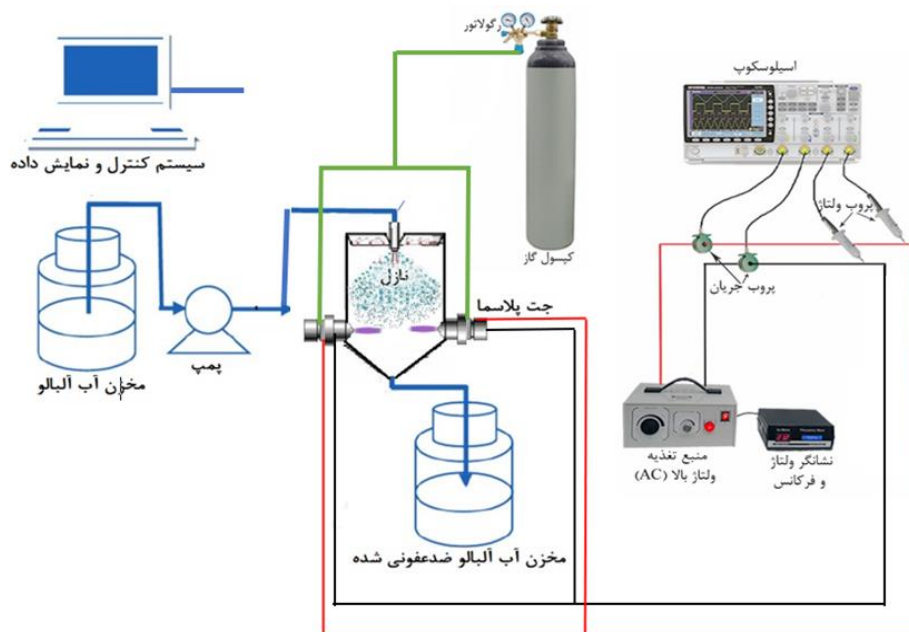
منبع تغذیه از جمله ولتاژ و بسامد آن است ( Misra *et al.*, 2016).

از روش طیفسنج نوری (spectroscopic) جهت مشخص شدن گونه‌های ایجاد شده به وسیله گاز آرگون و هوا استفاده خواهد شد. برای این منظور از طیفسنج Ocean Optics مدل HR2000 + CG ساخت کشور آلمان استفاده شد. ویژگی‌های مورد نیاز جهت توسعه سامانه براساس اصول طراحی و روابط حاکم تعیین شد (Lu *et al.*, 2016).

به صورت یک سیم مستقیم در مرکز و به فاصله مشخص از آن الکترود حلقوی قرار می‌گیرد. دی‌الکتریک به کار گرفته شده به صورت یک لوله باریک طراحی می‌شود که الکترود حلقوی روی سطح خارجی آن نصب خواهد شد. جنس الکترود مرکزی از فلز تنگستن و جنس الکترود حلقوی از فلز مس و دی‌الکتریک از سرامیک انتخاب خواهد شد. ضخامت لایه دی‌الکتریک تابع شدت میدان تشکیل شده بین الکترودها است. میدان تشکیل شده نیز تابعی از ویژگی‌های



شکل ۱- طرح‌واره سامانه میدان پالس الکتریکی



شکل ۲- طرح اولیه سامانه پاستوریزه کردن پاششی - جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری

ثابت نگه داشته شدند. در آزمایش‌های میکروبی، به منظور حذف هرگونه آلودگی و انجام گندزدایی اولیه، نمونه‌های آب آلبالو به همراه سایر وسایل آزمایشگاهی مورد استفاده، در

### آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های میکروبی

برای انجام آزمایش‌های میکروبی و کیفی، از نمونه‌های آب آلبالو که با آب‌گیری از آلبالوهای تازه، تهیه شده بودند، استفاده شد. در طول آزمایش‌ها دما و رطوبت نسبی آزمایشگاه به ترتیب برابر با  $1 \pm 25$  و  $1 \pm 45$  درصد

خود اختصاص می‌دهد. مدل به دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ برای غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی، مدل درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۹۸۶ و انحراف استاندارد<sup>۳</sup>  $10 \times 3/8$  و ضریب واریانس ۰/۱۴ است. معادله (۲) به دست آمده در شرایط رمزبندی شده و معادله (۳) مدل واقعی را نشان می‌دهد. در معادله (۲) بزرگ‌ترین ضریب منفی مربوط به عامل دما است، لذا مدل ارائه شده نیز افزایش دما را به عنوان مهم‌ترین عامل در غیرفعال‌سازی باکتری معرفی می‌کند. در معادله (۳) ضریب منفی عامل‌ها بیان‌گر این است که با افزایش هر کدام از آن‌ها میزان باکتری‌های اشرشیاکلی در آب آلبالو کاهش می‌یابد.

$$\log \left( \frac{N}{N_0} \right) = -2.97 - 0.76 * x_1 - 0.51 * x_2 - 0.33 * x_3 + 7.75 * 10^{-3} * x_1 x_2 + 0.012 * x_1 x_3 - 5.375 * 10^{-3} * x_2 x_3 + 0.4 * x_1^2 + 0.014 * x_2^2 - 0.059 * x_3^2 \quad (2)$$

$$\log \left( \frac{N}{N_0} \right) = +2.774 - 0.12882 * x_1 - 0.23998 * x_2 - 0.011937 * x_3 + 1.55 * 10^{-4} * x_1 x_2 + 4.16667 * 10^{-5} * x_1 x_3 - 1.43333 * 10^{-4} * x_2 x_3 + 0.988073 * 10^{-4} * x_1^2 + 2.21667 * 10^{-3} * x_2^2 - 2.63981 * 10^{-3} * x_3^2 \quad (3)$$

که در این معادلات  $x_1$ : دما (°C)،  $x_2$ : شدت میدان (kV/cm) و  $x_3$ : زمان اعمال میدان (s) است.

با توجه به شکل ۳، با افزایش دما، شدت میدان و همچنین زمان اعمال میدان، غیرفعال‌سازی باکتری‌ها در سامانه میدان الکتریکی پالسی افزایش می‌یابد و اثر دما نسبت به شدت میدان الکتریکی و همچنین زمان اعمال میدان بیش‌تر است. چرا که با افزایش دما از ۲۵ °C به ۶۵ °C غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی ۸۳٪ افزایش و در مقابل با افزایش شدت میدان الکتریکی از ۵ kV/cm به ۱۰ kV/cm غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی ۴۱٪ افزایش یافت. همچنین با افزایش زمان اعمال میدان از ۵ s به ۳۵ s غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی ۲۴٪ افزایش یافت.

دمای ۱۲۱°C، فشار ۱۵ psi و به مدت ۱۵ دقیقه اتوکلاو شدند. سپس آب آلبالوی اتوکلاو شده با باکتری‌های اشرشیاکلی آلوده و پس از اعمال پلاسما و میدان الکتریکی به طور جداگانه تغییرات بوجود آمده در سطح باکتری‌ها، تعیین شد. شمارش باکتری‌ها قبل و بعد از تیمار و به روش شمارش استاندارد<sup>۲</sup> انجام گرفت (Deng et al., 2010).

### روش تحلیل داده‌ها

با استفاده از روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> شرایط بهینه جهت طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. در این روش به منظور به دست آوردن مقدار بهینه، از حل معادله (۱) استفاده شد.

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ijj} X_i^2 + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن،  $\beta_0$ ،  $\beta_i$ ،  $\beta_{ij}$  و  $\beta_{ijj}$  ضرایب ثابت و  $X_i$  و  $X_j$  متغیرهای مستقل و  $\varepsilon$  خطای تصادفی هستند (Samani et al., 2018).

در این پژوهش، اثر دبی آب آلبالو (۱-۳ L/min)، دبی گاز ورودی برای تشکیل پلاسما (۳-۷ L/min) و درصد گاز آرگون به هوا (۰-۱۰۰٪) بر کاهش میزان اشرشیاکلی در سامانه ترکیبی پاششی-جت پلاسما بررسی شد، و بعد از آن اثر دما (۲۵-۶۵°C)، شدت میدان (۵-۱۰ kV/cm) و زمان اعمال میدان (۵-۳۵ s) بر کاهش میزان اشرشیاکلی در سامانه میدان پالس الکتریک مورد بررسی قرار گرفت.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی سامانه میدان پالس الکتریک بر کاهش اشرشیاکلی

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۱ نشان می‌دهد که در سطح احتمال ۱۰ درصد، اثرات دما، شدت میدان، زمان اعمال میدان و همچنین اثر متقابل دما و شدت میدان و اثر متقابل دما و زمان اعمال میدان و اثر متقابل شدت میدان و زمان اعمال میدان در غیرفعال‌سازی باکتری‌های اشرشیاکلی موجود در آب آلبالو معنی‌دار هستند.

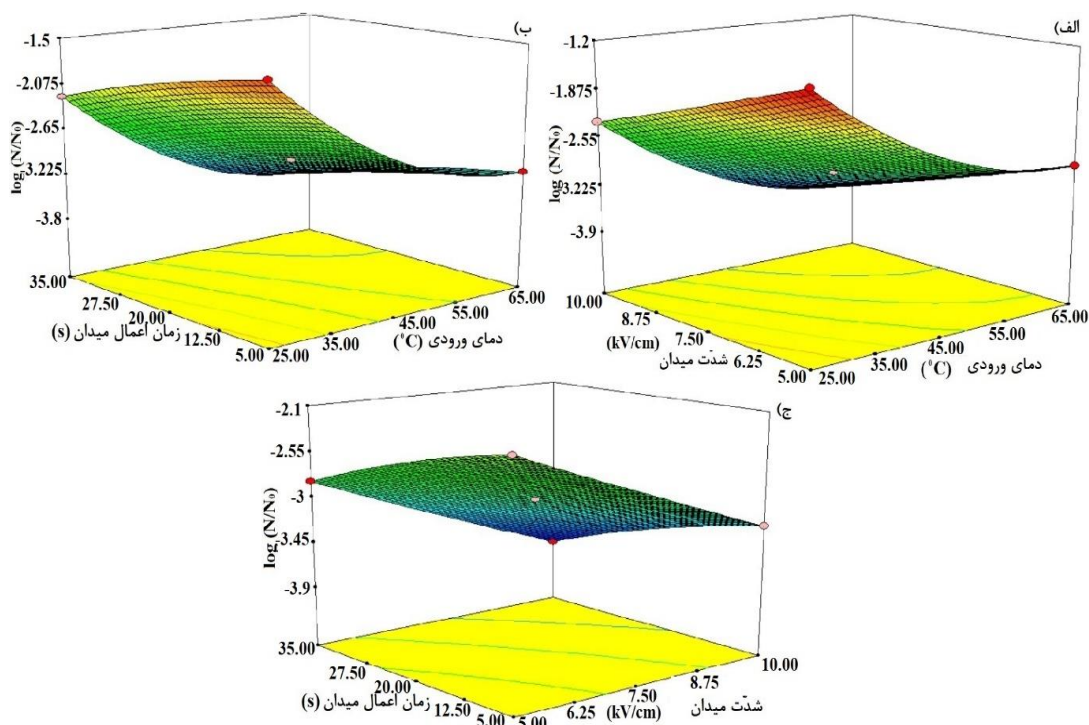
با توجه به مقدار مجموع مربع‌های عامل دما، مشخص می‌شود که تقریباً ۵۷٪ از تغییرات داده‌ها را این عامل به

1- Autoclave  
2- Standard or viable plate count  
3- Response Surface Methodology: RSM

جدول ۱- تجزیه واریانس متغیرهای دما، شدت میدان و زمان اعمال میدان سامانه میدانی الکتریکی پالسی بر غیرفعال سازی باکتری اشرشیاکلی در آب آلبالو

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
مدل	۹	۸/۱	۰/۹ <sup>**</sup>
دما (°C)	۱	۴/۵۹	۴/۵۹ <sup>**</sup>
شدت میدان (kV/cm)	۱	۲/۰۵	۲/۰۵ <sup>**</sup>
زمان اعمال میدان (s)	۱	۰/۸۵	۰/۸۵ <sup>**</sup>
دما × شدت میدان	۱	$۲/۴۰۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۴۰۳ \times ۱۰^{-۴}$ <sup>**</sup>
دما × زمان اعمال میدان	۱	$۶/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۶/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$ <sup>**</sup>
شدت میدان × زمان اعمال میدان	۱	$۱/۱۵۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۱۵۶ \times ۱۰^{-۴}$ <sup>**</sup>
دما <sup>۲</sup>	۱	۰/۵۸	۰/۵۸ <sup>**</sup>
شدت میدان <sup>۲</sup>	۱	$۷/۰۸۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۷/۰۸۷ \times ۱۰^{-۴}$ <sup>**</sup>
زمان اعمال میدان <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳ <sup>**</sup>
باقیمانده	۵	$۷/۲۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۴۵۲ \times ۱۰^{-۵}$
عدم برازش	۳	$۶/۳۹۴ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۱۳۱ \times ۱۰^{-۵}$ <sup>ns</sup>
خطای خالص	۲	$۸/۶۶۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۴/۳۳۳ \times ۱۰^{-۶}$
کل	۱۴	۸/۱	-

<sup>\*\*</sup> معنی‌داری در سطح ۱۰ درصد، <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری در سطح ۱۰ درصد



شکل ۳- اثر متقابل الف) دما و شدت میدان، ب) دما و زمان اعمال میدان ج) شدت میدان و زمان اعمال میدان بر غیرفعال سازی اشرشیاکلی در سامانه میدانی الکتریکی پالسی

تری به میدان الکتریکی پیدا می‌کند. این مسئله در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است، که نشان می‌دهد دمای بالاتر با افزایش نفوذپذیری غشاء، فرآیند الکتروپوراسیون (تشکیل حفره‌ها در غشای سلول) را تسهیل می‌کند.

افزایش دمای آب آلبالو باعث تسریع غیرفعال سازی باکتری‌ها می‌شود که می‌تواند به دلیل افزایش نفوذپذیری غشای سلولی *E. coli* در دماهای بالاتر باشد. در دماهای بالاتر، غشای سلولی باکتری‌ها به دلیل تغییرات فیزیکی مانند افزایش تحرک و چربی‌های سیالیت، حساسیت بیش-

دارد. با این حال، یافته‌ها نشان داد که زمان‌های طولانی‌تر از حد بهینه می‌توانند باعث کاهش بهره‌وری انرژی و حتی تأثیر منفی بر برخی ویژگی‌های محصول شوند.

تیمار میدان الکتریکی پالسی (PEF) نتایج امیدوارکننده‌ای را در کاهش بار میکروبی آب‌میوه‌ها با حفظ ویژگی‌های کیفی نشان داده است. دما نقش مهمی در اثربخشی PEF ایفا می‌کند، دمای بالاتر غیرفعال‌سازی میکروبی را افزایش می‌دهد (Timmermans *et al.*, 2014; El-Hag *et al.*, 2008). یک اثر هم‌افزایی بین دما و پالس‌های الکتریکی در بالای  $35^{\circ}\text{C}$  مشاهده شد که به انرژی کمتری برای غیرفعال شدن نیاز داشت (Timmermans *et al.*, 2014).

Hodgins *et al.*, (2002) اثر PEF را همراه با افزودن نایسین<sup>۳</sup>، لیزوزیم<sup>۴</sup> یا ترکیبی از هر دو به آب پرتقال مورد بررسی قرار دادند. شرایط بهینه برای تیمار آب پرتقال شامل ۲۰ پالس در  $44^{\circ}\text{C}$  همراه با  $4\text{ kV/cm}$ ،  $\text{pH } 3/5$  و  $100\text{ ninsin/ml}$  بود که منجر به کاهش بیش از  $\log 6$  در جمعیت میکروبی شد.

Aadil *et al.*, (2018) با استفاده از تیمار PEF همراه با تیمار اولتراسوند<sup>۵</sup> به طور قابل توجهی بار میکروبی را در آب گریپ فروت کاهش داد، در حالی که ترکیبات زیست فعال را افزایش داد. ماتریس آب‌میوه، به ویژه  $\text{pH}$ ، بر بازدهی غیرفعال‌سازی تأثیر می‌گذارد. در بین ریزاندامگانی آزمایش‌شده، ساکارومایسس سرویزیه به PEF حساس‌تر بود، در حالی که لیستریا مونوسیژنوز<sup>۶</sup> بالاترین مقاومت را نشان داد. تیمار PEF می‌تواند به طور مؤثر بار میکروبی در آب میوه‌ها را کاهش دهد و در عین حال کیفیت تغذیه‌ای را حفظ کند (Timmermans *et al.*, 2014).

تیمار PEF به طور مؤثر بار میکروبی را در آب میوه‌ها کاهش می‌دهد و در عین حال ترکیبات زیست فعال را حفظ می‌کند. شدت میدان الکتریکی بیش‌تر و زمان‌های تیمار طولانی‌تر منجر به غیرفعال‌سازی میکروبی بیش‌تر می‌شود (Yeom *et al.*, 2000; Krishnaveni, 2023). تیمار PEF در  $35\text{ kV/cm}$  برای  $59\text{ ms}$  به کاهش  $\log 7$  بار میکروبی و  $90\%$  غیرفعال شدن پکتین متیل استراز<sup>۷</sup> در آب پرتقال دست

ترکیب میدان‌های الکتریکی پالسی (PEF) و عملیات حرارتی ملایم، اثرات هم‌افزایی در غیرفعال‌سازی میکروبی در محصولات غذایی مختلف نشان داده است. مطالعات بر روی آب سیب قرمز کدر (Katiyo *et al.*, 2017)، سفیده تخم مرغ مایع (Zhao *et al.*, 2007) و شیر بدون چربی (Fernandez-Molina *et al.*, 2005) کاهش میکروبی قابل توجهی را بدون به خطر انداختن کیفیت محصول نشان دادند. اثربخشی این رویکرد ترکیبی در برابر بیماری‌زاهای رایج غذایی مانند اشرشیاکلی، سالمونلا<sup>۱</sup> و ساکارومایسس سرویزیه<sup>۲</sup> مشاهده شد. افزایش قدرت میدان الکتریکی، زمان تیمار و دما باعث افزایش غیرفعال‌سازی میکروبی می‌شود (Yan *et al.*, 2021). اثر هم‌افزایی به دمای کاهش شدت میدان الکتریکی بحرانی مورد نیاز برای غیرفعال‌سازی میکروبی نسبت داده شد (Yan *et al.*, 2021). این تیمار ترکیبی هم‌چنین قابلیت را در افزایش عمر مفید و حفظ خواص فیزیکی - شیمیایی محصولات تیمار شده نشان داد (Katiyo *et al.*, 2017; Fernandez-Molina *et al.*, 2005). به طور کلی، ترکیب PEF-heat یک روش پاستوریزه کردن غیرحرارتی امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف غذایی ارائه می‌کند.

شدت میدان الکتریکی به عنوان دومین عامل مهم در غیرفعال‌سازی *E. coli* شناسایی شد. افزایش شدت میدان منجر به افزایش میزان ایجاد حفره‌ها در غشای سلولی باکتری‌ها و در نتیجه تسریع غیرفعال‌سازی آن‌ها می‌شود. این یافته‌ها با سایر مطالعاتی که نشان‌دهنده تأثیر مثبت شدت میدان الکتریکی بر غیرفعال‌سازی ریزاندامگان در فرآیند PEF هستند، همخوانی دارد. شدت بالاتر میدان الکتریکی منجر به افزایش سرعت و تعداد الکتروپوراسیون‌های رخ داده در غشای سلولی می‌شود، که تأثیر مثبتی بر کاهش بار میکروبی دارد.

نتایج این تحقیق نشان داد که زمان اقامت طولانی‌تر می‌تواند به بهبود کاهش *E. coli* کمک کند، زیرا افزایش زمان تماس بین میدان الکتریکی و مایع امکان تخریب بیش‌تری برای ریزاندامگان فراهم می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات دیگر که نشان‌دهنده اهمیت زمان تماس در بهبود کارایی فرآیندهای پاستوریزه کردن غیرحرارتی هستند، هم‌خوانی

3- Ninsin  
4- Lysozyme  
5- Ultrasound  
6- *L. monocytogenes*  
7- Pectin methylesterase

1- Salmonella  
2- *Saccharomyces cerevisiae*: *S. cerevisiae*

واقعی را نشان می‌دهد. در معادله (۴) بزرگ‌ترین ضریب مربوط به عامل نرخ جریان آب‌میوه و مجذور آن است، لذا مدل ارائه شده نیز افزایش نرخ جریان آب‌میوه را به عنوان مهم‌ترین عامل در غیرفعال‌سازی باکتری معرفی می‌کند.

$$\log \left( \frac{N}{N_0} \right) = -1.36 - 0.091 * y_1 + 0.011 * y_2 - 7.625 * 10^{-3} * y_3 - 5 * 10^{-4} * y_1 y_2 + 1.25 * 10^{-3} * y_1 y_3 - 6 * 10^{-3} * y_2 y_3 + 0.13 * y_1^2 + 0.098 * y_2^2 + 8.292 * 10^{-3} * y_3^2 \quad (۴)$$

$$\log \left( \frac{N}{N_0} \right) = -0.06199 - 0.61454 * y_1 - 0.23635 * y_2 - 2.34167 * 10^{-4} * y_3 - 2.5 * 10^{-4} * y_1 y_2 + 2.5 * 10^{-5} * y_1 y_3 - 6 * 10^{-5} * y_2 y_3 + 0.13079 * y_1^2 + 0.024510 * y_2^2 + 3.31667 * 10^{-6} * y_3^2 \quad (۵)$$

که در این معادلات،  $y_1$ : نرخ جریان آب‌میوه (L/min)،  $y_2$ : نرخ جریان گاز (L/min) و  $y_3$ : نسبت آرگون به هوا (٪) است. با توجه به شکل ۴-الف با افزایش نرخ جریان آب‌میوه، غیرفعال‌سازی باکتری‌ها در سامانه پاششی-جت پلاسما افزایش می‌یابد، و در نرخ‌های بالاتر از محدوده (L/min) ۲ به ۲/۵ کاهش می‌یابد، چرا که با افزایش نرخ جریان آب‌میوه از (L/min) ۱ به محدوده (L/min) ۲ به ۲/۵، غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی ٪ ۲۰ افزایش یافت و پس از این حد تا (L/min) ۳، غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی کاهش می‌یابد، به صورتی که با در نظر گرفتن افزایش نرخ جریان آب‌میوه از (L/min) ۱ به ۳، غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی فقط ٪ ۱۶ افزایش می‌یابد. افزایش نرخ جریان آب‌میوه به دلیل افزایش تماس آب‌میوه با جت پلاسما منجر به افزایش کارایی غیرفعال‌سازی باکتری E. coli می‌شود. همان‌طور که در نتایج مشاهده شد، این عامل تأثیر معنی‌داری بر کاهش بار میکروبی دارد. نرخ‌های بالاتر آب‌میوه باعث برخورد بیشتر با گونه‌های فعال ایجاد شده توسط پلاسما می‌شوند که این امر به افزایش غیرفعال‌سازی ریزاندامگان منجر می‌گردد. در عین حال، باید توجه داشت که نرخ جریان خیلی بالا می‌تواند باعث کاهش زمان تماس پلاسما با ریزاندامگان شود، که در این حالت کارایی کاهش پیدا خواهد کرد. بنابراین، پیدا کردن یک تعادل مناسب برای دستیابی به بهترین نتایج ضروری است.

یافت (Yeom et al., 2000). شدت میدان ۲۰-۳۰ kV/cm با ۱۵۰ پالس در کاهش بار میکروبی و افزایش ماندگاری آب نیشکر مؤثر بود (Kayalvizhi et al., 2016). اثربخشی تیمار PEF بسته به نوع ریزاندامگان متفاوت است، اشرشیاکلی حساسیت بالاتری در مقایسه با ساکارومایسس سرویزیه و استفیلوکوکوس اورئوس<sup>۱</sup> نشان می‌دهد (Krishnaveni, 2023). این مطالعات نشان می‌دهد که PEF یک فناوری غیرحرارتی امیدوارکننده برای نگهداری آب‌میوه است.

### بهینه‌سازی سامانه میدان الکتریکی پالسی برای غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی

شرایط بهینه استفاده از سامانه میدان الکتریکی پالسی با در نظر گرفتن غیرفعال‌سازی حداکثری باکتری‌های اشرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو تعیین گردید. شرایط مرزی بهینه‌سازی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد.

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با داشتن شرایط مرزی جدول ۲، مقدار بهینه دما، شدت میدان الکتریکی پالسی و زمان اعمال میدان جهت غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو به ترتیب °C ۶۴/۷۲، kV/cm ۹/۹۴ و s ۲۵/۷۴ است، که در این حالت سامانه میدان الکتریکی پالسی منجر به  $\log$  ۳/۹۴ غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو می‌شود.

### ارزیابی سامانه پاششی-جت پلاسما بر کاهش اشرشیاکلی

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان می‌دهد که در سطح احتمال ۱ درصد، اثرات نرخ جریان آب‌میوه، نرخ جریان گاز، نسبت آرگون به هوا و همچنین اثر متقابل نرخ جریان گاز و نسبت آرگون به هوا در غیرفعال‌سازی باکتری‌های اشرشیاکلی موجود در آب‌آلبالو معنی‌دار هستند.

با توجه به مقدار مجموع مربعات عامل نرخ جریان آب‌میوه، مشخص می‌شود که تقریباً ٪ ۴۲ از تغییرات داده‌ها را این عامل به خود اختصاص می‌دهد. مدل به دست آمده با استفاده از روش سطح پاسخ برای غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی، مدل درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۹۸۸ و انحراف استاندارد  $10^{-3} \times 9/9$  و ضریب واریانس ۰/۰۸ است. معادله (۴) معادله به دست آمده در شرایط رمزبندی شده و معادله (۵) مدل

1- Staphylococcus aureus: S. aureus

نرخ‌های بالاتر جریان گاز باعث بهبود کارایی پلازما شده و تولید گونه‌های بیشتر از رادیکال‌های اکسیژن فعال (ROS) و سایر گونه‌های واکنشی می‌شود که به تخریب بیش‌تر غشای سلولی باکتری‌ها کمک می‌کند. با این حال، افزایش بیش از حد نرخ جریان گاز ممکن است باعث کاهش زمان اقامت گونه‌های فعال در سامانه و کاهش کارایی کلی شود. بنابراین، مانند نرخ جریان آب‌میوه، این متغیر نیز باید به دقت بهینه‌سازی شود.

شکل ۴- ب بیان می‌کند که با افزایش نرخ جریان گاز، غیرفعال‌سازی باکتری‌ها در سامانه پاششی-جت پلازما در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، به صورتی که با افزایش نرخ جریان آب‌میوه از ۳ (L/min) به ۷ غیرفعال‌سازی باکتری‌ها به میزان ۲٪ کاهش می‌یابد. نرخ جریان گاز به عنوان یک متغیر حیاتی در پایداری پلازما و تولید گونه‌های فعال تأثیرگذار است. افزایش نرخ جریان گاز باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن در پلازما می‌شود که مستقیماً بر غیرفعال‌سازی E. coli تأثیر می‌گذارد.

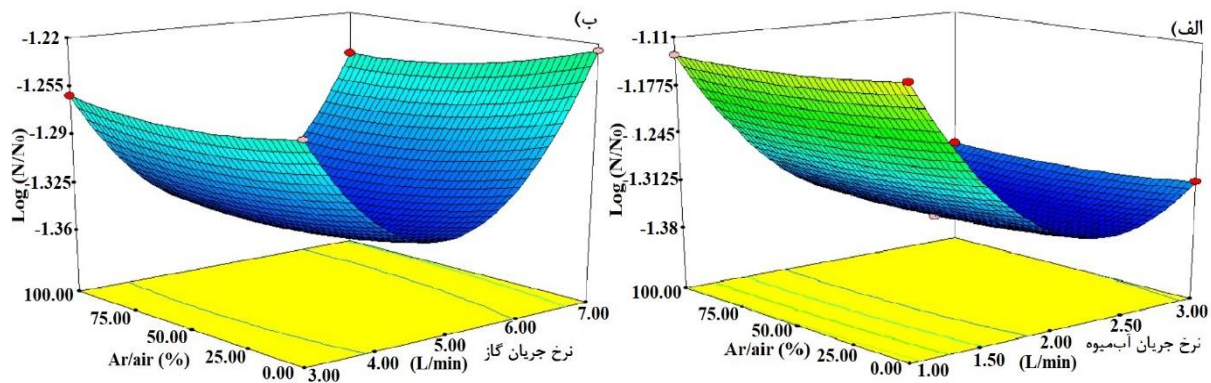
جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در سامانه جهت بهینه‌سازی داده‌ها

نام	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن پایین	وزن بالا	اهمیت
دما (°C)	در محدوده	۲۵	۶۵	۱	۱	۳
شدت میدان (kV/cm)	در محدوده	۵	۱۰	۱	۱	۳
زمان اعمال میدان (s)	در محدوده	۵	۳۵	۱	۱	۳
Log (N/N <sub>0</sub> )	حداقل	-۳/۸۵۴	-۱/۲۹۲	۱	۱۰	۵

جدول ۳- تجزیه واریانس متغیرهای نرخ جریان آب‌میوه، نرخ جریان گاز و نسبت آرگون به هوا سامانه پاششی-جت پلازما بر غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی در آب آلبالو

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
مدل	۹	۰/۱۶	۰/۰۱۸ <sup>xx</sup>
نرخ جریان آب‌میوه (l/min)	۱	۰/۰۶۷	۰/۰۶۷ <sup>xx</sup>
نرخ جریان گاز (l/min)	۱	$۸/۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۸/۲ \times ۱۰^{-۴}$
نسبت آرگون به هوا (%)	۱	$۴/۶۵۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۶۵۱ \times ۱۰^{-۴}$
نرخ جریان آب‌میوه × نرخ جریان گاز	۱	$۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱ \times ۱۰^{-۶}$ ns
نرخ جریان آب‌میوه × نسبت آرگون به هوا	۱	$۶/۲۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۶/۲۵ \times ۱۰^{-۶}$
نرخ جریان گاز × نسبت آرگون به هوا	۱	$۱/۴۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۴ \times ۱۰^{-۴}$
نرخ جریان آب‌میوه <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳ <sup>xx</sup>
نرخ جریان گاز <sup>۲</sup>	۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵ <sup>xx</sup>
نسبت آرگون به هوا <sup>۲</sup>	۱	$۲/۵۳۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۵۳۹ \times ۱۰^{-۴}$
باقیمانده	۵	$۴/۹۱۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۹/۸۳۳ \times ۱۰^{-۷}$
عدم برازش	۳	$۲/۵ \times ۱۰^{-۷}$	$۸/۳۳۳ \times ۱۰^{-۸}$ ns
خطای خالص	۲	$۴/۶۶۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۳۳۳ \times ۱۰^{-۶}$
کل	۱۴	۰/۱۶	-

<sup>xx</sup> معنی‌داری در سطح ۱۰ درصد<sup>ns</sup> عدم معنی‌داری در سطح ۱۰ درصد



شکل ۴- اثر متقابل الف) نرخ جریان آب‌میوه و نسبت آرگون به هوا، ب) نرخ جریان گاز و نسبت آرگون به هوا

تیمار پلاسما سرد اتمسفری (ACP) با استفاده از ترکیبات مختلف گاز اثرات ضد میکروبی قابل توجهی را نشان داده است. پلاسما هلیوم و آرگون به طور مؤثری تعداد میکروب را در سطوح غذا و محیط‌های آگار کاهش داد، با پلاسما هلیوم عملکرد برتر را نشان داد (Ulbin- Figlewicz *et al.*, 2015). افزودن اکسیژن به پلاسما هلیوم خواص میکروب‌کشی آن را از طریق تولید گونه‌های فعال اکسیژن افزایش داد (Arjunan *et al.*, 2016). پلاسما هلیوم/اکسیژن به طور مؤثر باکتری‌ها، مخمرها و اندوسپورهای باکتریایی را با مقادیر D متفاوت بسته به میکروارگانیسم و غلظت اولیه گندزدایی می‌کند (Kwang-Hyun *et al.*, 2006). میکروسکوپ الکترونی روبشی آسیب ساختاری به سلول‌های تیمار شده، از جمله از هم‌گسیختگی و لیز سلولی را نشان داد (Kwang-Hyun *et al.*, 2006; Ulbin-Figlewicz *et al.*, 2015). علاوه بر این، ترکیب ACP با پراکسید هیدروژن اثرات ضد باکتریایی هم افزایی، افزایش حمل و نقل غشایی گونه‌های فعال و اکسیداسیون درون سلولی را نشان داد (Baik *et al.*, 2023). این یافته‌ها قابلیت تیمارهای ACP را با استفاده از ترکیبات مختلف گاز برای غیرفعال‌سازی میکروبی در کاربردهای مختلف، از جمله نگهداری مواد غذایی و تنظیمات بالینی، برجسته می‌کند. مطالعات اخیر تیمارهای غیرحرارتی مختلف را برای افزایش ایمنی میکروبی و کیفیت آب میوه‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. ازن زنی آب نیشکر به طور قابل توجهی بار میکروبی و فعالیت آنزیمی را کاهش داد و در عین حال خواص حسی قابل قبولی را حفظ کرد، اگرچه برخی از ویژگی‌های تغذیه‌ای کاهش یافت (Panigrahi *et al.*, 2020). تیمار UV-C آب انگور سفید به کاهش  $5.34 \log$  در *E. coli* K-12 دست یافت و ماندگاری را تا ۱۴ روز افزایش داد، اما بر برخی

با توجه به شکل ۴-الف و ۴-ب با افزایش نسبت آرگون به هوا، غیرفعال‌سازی باکتری‌ها در سامانه پاششی-جت پلاسما کمی افزایش می‌یابد، به صورتی که با افزایش نسبت آرگون به هوا از ۰٪ به ۱۰۰٪، غیرفعال‌سازی اشریشاکلی ۱٪ افزایش یافت. نسبت آرگون به هوا نقش مهمی در پایداری و کیفیت پلاسما ایفا می‌کند. آرگون به عنوان یک گاز بی‌اثر باعث پایداری بیش‌تر پلاسما شده و محیطی مناسب برای تولید گونه‌های فعال فراهم می‌کند. با افزایش نسبت آرگون به هوا، کارایی پلاسما در غیرفعال‌سازی اشریشاکلی بهبود می‌یابد، زیرا آرگون باعث افزایش تعداد گونه‌های فعال می‌شود.

سه ناحیه پرتو فرابنفش UV-A (۳۱۵ - ۴۰۰ nm)، UV-B (۲۸۰ - ۳۱۵ nm) و UV-C (۲۸۰ - ۲۰۰ nm) طیف الکترومغناطیسی وجود دارد که ناحیه UV-C توانایی غیرفعال‌سازی باکتری را دارد و حداکثر غیرفعال‌سازی تقریباً در محدوده ۲۵۴ تا ۲۶۴ nm رخ می‌دهد. مطالعاتی نشان می‌دهد که به دلیل نفوذ UV-C به غشای بیرونی سلول‌ها و ایجاد واکنش دایمر<sup>۱</sup> بین تیمین<sup>۲</sup> و سیتوزین<sup>۳</sup> در DNA که موجب جلوگیری از رونویسی و تکثیر آن و در نهایت مرگ سلولی می‌شود، تخریب ریزاندامگان رخ می‌دهد (Choudhary & Bandla, 2012; Ding *et al.*, 2022). پرتو فرابنفش علاوه بر آسیب رسانی به اجزای داخلی باکتری، توانایی آسیب رساندن به غشاهای نیز دارد (Niemira, 2012). نتایج طیف‌سنجی نوری نشان می‌دهد UV-C انتشار یافته در این پژوهش بسیار ناچیز است.

1- Dimer reaction  
2- Thymine  
3- Cytosine

جایگزین‌های بالقوه‌ای برای روش‌های پردازش حرارتی سنتی ارائه می‌دهد.

### بهینه‌سازی سامانه پاششی-جت پلاسما برای غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی

شرایط بهینه استفاده از سامانه پاششی-جت پلاسما با در نظر گرفتن غیرفعال‌سازی حداکثری باکتری‌های اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو تعیین گردید. شرایط مرزی بهینه سازی مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۴- شرایط مرزی استفاده شده در سامانه جهت بهینه‌سازی داده‌ها

نام	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن پایین	وزن بالا	اهمیت
نرخ جریان آب‌میوه (L/min)	در محدوده	۱	۳	۱	۱	۳
نرخ جریان گاز (L/min)	در محدوده	۳	۷	۱	۱	۳
نسبت آرگون به هوا (%)	در محدوده	۰	۱۰۰	۱	۱	۳
Log (N/N <sub>0</sub> )	حداقل	- ۱/۳۵۷	- ۱/۰۲۴	۱	۱۰	۵

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با داشتن شرایط مرزی جدول ۲ مقدار بهینه دما، شدت میدان الکتریکی پالسی و زمان اعمال میدان جهت غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو به ترتیب ۲/۴ l/min، ۴/۷۲ l/min و ۶۳/۴۶ است، که در این حالت سامانه پاششی-جت پلاسما منجر به  $\log ۱/۳۷۲$  غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو می‌شود.

در پژوهش‌های دیگر، از تیمارهای غیرحرارتی دیگری با هدف غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی در آب آلبالو استفاده شده‌است. از جمله استفاده از امواج فراصوت، که در شرایط بهینه منجر به  $\log ۴/۱۱$  غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی شده‌است (Samani et al., 2013). همچنین از ترکیب روش حرارتی و غیرحرارتی به صورت ترکیب مایکروویو با امواج فراصوت با هدف غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی و ساکارومایسس سرویزیه استفاده شده‌است که علاوه بر اینکه هم‌چون روش مرسوم، بار میکروبی صفر شد، خواص کیفی بهتر حفظ شد (Samani et al., 2016). در پژوهشی دیگر اثر تیمار پلاسما سرد فشار اتمسفری بر کاهش باکتری اشیرشیاکلی و برخی از خواص کیفی آب آلبالو شامل رنگ و pH بررسی شد. در این پژوهش تأثیر ولتاژ (۱۰، ۱۵، ۲۰ kV)، بسامد (۲۰ kHz،

۱۵، ۱۰)، نرخ جریان گاز (۱، ۳، ۷، ۱۰ L/min) و درصد اکسیژن در گاز آرگون (۱٪، ۵٪، ۱۰٪) مورد بررسی قرار گرفت. تیمار پلاسما سرد فشار اتمسفری تعداد باکتری اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو رو کاهش داد ولی رنگ و pH نمونه‌ها را تغییر نداد و بیش‌ترین کاهش تعداد اشیرشیاکلی زمانی مشاهده شد که زمان، ولتاژ و درصد گاز اکسیژن در آرگون بیش‌ترین مقادیر خود بود. این مقدار کاهش  $\log$ -cycles ۶ بود (Hosseini et al., 2021). در پژوهشی با استفاده از ترکیبی از امواج میدان پالس الکتریکی فراصوت و میدان پالس الکتریکی هیدرودینامیکی آب آلبالو پاستوریزه شد. نتایج تیمارها نشان داد که روش ترکیبی علاوه بر رسیدن به نتیجه بار میکروبی صفر، محتوای فنلی کل، آنتوسیانین‌ها و ویتامین C را در مقایسه با روش مرسوم حفظ کرده است (Samani et al., 2020).

### نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش انجام شده، می‌توان بیان کرد که تیمار پلاسما سرد اتمسفری (ACP) و میدان الکتریکی پالسی (PEF) به عنوان جایگزین‌های مؤثر تیمارهای حرارتی، به منظور میکروبی‌زدایی آب آلبالو هستند.

خواص فیزیکی و شیمیایی تأثیر گذاشت (Unluturk & Atilgan 2015). تیمار ازن گازی به طور مؤثری بیماری زهای غذایی موجود در آب سیب را غیرفعال می‌کند و کارایی آن به محتوای جامدات آب سیب بستگی دارد (Choi et al., 2012). تیمار پلاسمایی فاز گاز اتمسفر سرد آب انار محتوای آنتوسیانین را ۲۱-۳۵٪ افزایش داد و با شرایط بهینه برای پایداری آنتوسیانین بر تغییر رنگ تأثیر گذاشت (Kovačević et al., 2016). این مطالعات نشان می‌دهد که نرخ جریان گاز و ویژگی‌های تصفیه به طور قابل‌توجهی بر غیرفعال‌سازی میکروبی و کیفیت آب تأثیر می‌گذارد و

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با داشتن شرایط مرزی جدول ۲ مقدار بهینه دما، شدت میدان الکتریکی پالسی و زمان اعمال میدان جهت غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو به ترتیب ۲/۴ l/min، ۴/۷۲ l/min و ۶۳/۴۶ است، که در این حالت سامانه پاششی-جت پلاسما منجر به  $\log ۱/۳۷۲$  غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی موجود در آب آلبالو می‌شود.

در پژوهش‌های دیگر، از تیمارهای غیرحرارتی دیگری با هدف غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی در آب آلبالو استفاده شده‌است. از جمله استفاده از امواج فراصوت، که در شرایط بهینه منجر به  $\log ۴/۱۱$  غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی شده‌است (Samani et al., 2013). همچنین از ترکیب روش حرارتی و غیرحرارتی به صورت ترکیب مایکروویو با امواج فراصوت با هدف غیرفعال‌سازی اشیرشیاکلی و ساکارومایسس سرویزیه استفاده شده‌است که علاوه بر اینکه هم‌چون روش مرسوم، بار میکروبی صفر شد، خواص کیفی بهتر حفظ شد (Samani et al., 2016). در پژوهشی دیگر اثر تیمار پلاسما سرد فشار اتمسفری بر کاهش باکتری اشیرشیاکلی و برخی از خواص کیفی آب آلبالو شامل رنگ و pH بررسی شد. در این پژوهش تأثیر ولتاژ (۱۰، ۱۵، ۲۰ kV)، بسامد (۲۰ kHz،

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

فرهاد جمالی هفشجانی: (تحقیق، گردآوری داده‌ها، نگارش - پیش‌نویس اولیه).

بهرام حسین‌زاده سامانی (روش کار، استاد راهنما، نگارش و ویرایش مقاله)

رحیم ابراهیمی (نگارش و ویرایش مقاله)

زهرا ایزدی (نگارش و ویرایش مقاله)

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است.

### منابع

- Aadil, R. M., Zeng, X. A., Han, Z., Sahar, A., Khalil, A. A., Rahman, U. U. & Mehmood, T. (2018). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and microbial quality of grapefruit juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13507. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13507>
- Arjunan, K. P., Obrusnik, A., Jones, B. T., Zajíčková, L. & Ptasinska, S. (2016). Effect of additive oxygen on the reactive species profile and microbicidal property of a helium atmospheric pressure plasma jet. *Plasma Processes and Polymers*, 13(11), 1089-1105. <https://doi.org/10.1002/ppap.201600058>
- Baik, K. Y., Jo, H., Ki, S. H., Kwon, G. C. & Cho, G. (2023). Synergistic effect of hydrogen peroxide and cold atmospheric pressure plasma-jet for microbial disinfection. *Applied Sciences*, 13(5), 3324. <https://doi.org/10.3390/app13053324>
- Choi, M. R., Liu, Q., Lee, S. Y., Jin, J. H., Ryu, S. & Kang, D. H. (2012). Inactivation of Escherichia coli O157: H7, Salmonella typhimurium and Listeria monocytogenes in apple juice with gaseous ozone. *Food microbiology*, 32(1), 191-195. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.03.002>
- Choudhary, R. & Bandla, S. (2012). Ultraviolet pasteurization for food industry. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 2(1), 12-15. <https://doi.org/10.5923/j.food.20120201.03>
- Deng, S., Cheng C., Ni, G., Meng, Y. & Chen, H. (2010). Bacillus subtilis devitalization mechanism of atmosphere pressure plasma jet. *Current Applied*

با در نظر گرفتن نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان بیان کرد که در سامانه میدان الکتریکی پالسی با افزایش دمای آب‌آلبالو، شدت میدان و همچنین زمان اعمال میدان الکتریکی پالسی، غیرفعال‌سازی باکتری‌های موجود در آب‌آلبالو، افزایش می‌یابد و اثر دما نسبت به شدت میدان الکتریکی و همچنین زمان اعمال میدان بیشتر است. با افزایش دمای آب‌آلبالو غیرفعال‌سازی باکتری‌ها بیشتر می‌شود که به دلیل افزایش نفوذپذیری غشای سلولی E. coli در دماهای بالاتر است. افزایش شدت میدان نیز منجر به افزایش میزان ایجاد حفره‌ها در غشای سلولی باکتری‌ها و در نتیجه تسریع غیرفعال‌سازی آن‌ها می‌شود. همچنین افزایش زمان اعمال میدان امکان تخریب بیش‌تری برای ریزاندامگان فراهم می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان آب‌میوه در سامانه پلاسما سرد اتمسفری به دلیل افزایش تماس آب‌میوه با جت پلاسما منجر به افزایش کارایی غیرفعال‌سازی باکتری E. coli می‌شود. در عین حال، نرخ جریان خیلی بالا باعث کاهش زمان تماس پلاسما با ریزاندامگان می‌شود، که در این حالت کارایی کاهش پیدا خواهد کرد. نرخ‌های بالای جریان گاز به دلیل تولید گونه‌های بیش‌تر از رادیکال‌های اکسیژن فعال (ROS) و سایر گونه‌های واکنشی موجب افزایش غیرفعال‌سازی باکتری E. coli می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد نرخ جریان گاز موجب کاهش زمان اقامت گونه‌های فعال در سامانه و در نتیجه کاهش کارایی کلی خواهد شد. همچنین افزایش نسبت آرگون به هوا، به دلیل افزایش تعداد گونه‌های فعال، بهبود کارایی پلاسما در غیرفعال‌سازی باکتری E. coli در پی خواهد داشت. نتایج طیف‌سنجی نوری نیز نشان داد که UV-C انتشار یافته در پلاسما تولید شده در این پژوهش بسیار ناچیز است.

### سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد بابت تأمین شرایط و هزینه تحقیق انجام شده تشکر می‌کند.

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

- evaluation of an automatic fruit-juice pasteurization system using microwave-ultrasonic waves. *Journal of food science and technology*, 53, 88-103. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2026-6>
- Hosseinzadeh Samani, B., Khoshtghaza, M., Minaee, S. & Abbasi, S. (2013). Effect of ultrasonic waves on pasteurization of sour cherry juice. *International Journal of Biosciences*, 3(12), 193-200. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.12.193-200>
- Jin, T.Z., & Zhang, H.Q. (2020). Food Safety Engineering Chapter 21. Pulsed Electric Fields for Pasteurization: Food Safety and Shelf Life. Springer Nature Switzerland. (pp 553-577). <https://doi.org/10.1007/9>
- Katiyo, W., Yang, R. & Zhao, W. (2017). Effects of combined pulsed electric fields and mild temperature pasteurization on microbial inactivation and physicochemical properties of cloudy red apple juice (*Malus pumila* Niedzwetzkyana (Dieck)). *Food Safety*, 37(4), e12369. <https://doi.org/10.1111/jfs.12369>
- Kayalvizhi, V., Pushpa, A. J. S., Sangeetha, G. & Antony, U. (2016). Effect of pulsed electric field (PEF) treatment on sugarcane juice. *Journal of food science and technology*, 53, 1371-1379. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2172-5>
- Korachi, M., Turan, Z., Şenturk, K., Şahin, F. & Aslan, N. (2009). An investigation into the biocidal effect of high voltage AC/DC atmospheric corona discharges on bacteria. *Journal of Electrostatics* 67, 678-685. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.03.002>
- Kotnik, T., Frey, W., Sack, M., Meglič, S. H., Peterka, M. & Miklavčič, D. (2015). Electroporation-based applications in biotechnology. *Trends in biotechnology*, 33(8), 480-488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.06.002>
- Kovačević, D. B., Putnik, P., Dragović-Uzelac, V., Pedisić, S., Jambrak, A. R. & Herceg, Z. (2016). Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice. *Food chemistry*, 190, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.099>
- Krishnaveni, S. (2023). Influence of electrical process parameters to inactivate microorganisms in orange juice by PEF technology. *Int J Agric Food Sci.*, 5(1), 126-132. <https://doi.org/10.33545/2664844X.2023.v5.i1b.131>
- Kwang-Hyun, P., & Won-Tae, J. (2006). Sterilization of bacteria, yeast, and bacterial endospores by atmospheric-pressure cold plasma using helium and oxygen. *Journal of Microbiology*, 44(3), 269-275.
- Lu, P., Cullen, P. J. & Ostrikov, K. (2016). Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications, Chapter 4. Atmospheric Pressure Non-thermal Plasma Sources, Academic Press, (pp. 83-116). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00004-4>
- Misra, N.N., Schlüter, O. & Cullen, P. J. (2016). Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and *Physics*, 10(4), 1164-1168. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.004>
- Dey, A., Rasane, P., Choudhury, A., Singh, J., Maisnam, D. & Rasane, P. (2016). Cold plasma processing: A review. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(4), 2980-2984. ISSN: 0974-2115
- Ding, T., Xu, E. & Liao, X. (2022). Inactivation of Bacteria by Cold Plasma. Applications of Cold Plasma in Food Safety, 47-73. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1827-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1827-7_3)
- El-Hag, A. H., Jayaram, S. H., Griffiths, M. W. & Dadarwal, R. (2008). Survivability of inoculated versus naturally grown bacteria in liquid foods under pulsed electric fields. In *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.89>
- Fernandez-Molina, J. J., Barbosa-Canovas, G. V. & Swanson, B. G. (2005). Skim milk processing by combining pulsed electric fields and thermal treatments. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29(5,6), 291-306. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2005.00029.x>
- Hodgins, A. M., Mittal, G. S. & Griffiths, M. W. (2002). Pasteurization of fresh orange juice using low-energy pulsed electrical field. *Journal of Food Science*, 67(6), 2294-2299. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09543.x>
- Hosseini, M., Hosseinzadeh Samani, B., Barba F. J. (2021). Design and characterisation of jet cold atmospheric pressure plasma and its effect on *Escherichia coli*, colour, pH, and bioactive compounds of sour cherry juice. *International Journal of Food Science & Technology*. 56(10), 4883-4892. <https://doi.org/10.1111/jfs.15220>
- Hosseini, M., Rostami, S. Hosseinzadeh Samani, B. & Lorigooini, Z. (2020). The effect of atmospheric pressure cold plasma on the inactivation of *Escherichia coli* in sour cherry juice and its qualitative properties. *Food Science & Nutrition* 8(2), 870-883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1364>
- Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, A., Khoshtaghaza, M. H., Behruzian, M. & Ansari Ardali, A. (2020). The investigation and optimization of two combined pasteurization methods of ultrasonic-pulse electric field and hydrodynamic-pulse electric field on sour cherry juice using RSM-TOPSIS. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), e14700. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14700>
- Hosseinzadeh Samani, B., Gudarzi, H., Rostami, S., Lorigooini, Z., Esmaili, Z. & Jamshidi-kia, F. (2018). Development and optimization of the new ultrasonic-infrared-vacuum dryer in drying *Kelussia odoratissima* and its comparison with conventional methods. *Industrial Crops & Products*, 123, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.053>
- Hosseinzadeh Samani, B., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S., Zareifouros, H., Eshtiaghi, M. N. & Rostami, S. (2016). Design, development and

- microbiology*, 65, 1537-1546. <https://doi.org/10.1007/s13213-014-0992-y>
- Unluturk, S. & Atilgan, M. R. (2015). Microbial safety and shelf life of UV-C treated freshly squeezed white grape juice. *Journal of food science*, 80(8), M1831-M1841. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12952>
- Yan, Z., Yin, L., Hao, C., Liu, K., & Qiu, J. (2021). Synergistic effect of pulsed electric fields and temperature on the inactivation of microorganisms. *AMB Express*, 11, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01206-8>
- Yeom, H. W., Streaker, C. B., Zhang, Q. H. & Min, D. B. (2000). Effects of pulsed electric fields on the activities of microorganisms and pectin methyl esterase in orange juice. *Journal of Food Science*, 65(8), 1359-1363. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10612.x>
- Yepez, X. V., Misra, N. N. & Keener, K. M. (2020). Nonthermal Plasma Technology. In: Demirci, A., Feng, H., Krishnamurthy, K. (eds) *Food Safety Engineering. Food Engineering Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42660-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42660-6_23)
- Zhao, W., Yang, R., Tang, Y. & Lu, R. (2007). Combined Effects of Heat and PEF on Microbial Inactivation and Quality of Liquid Egg Whites. *International Journal of Food Engineering*, 3(4). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1256>
- applications. Chapter 1. Plasma in Food and Agriculture. Academic Press. (pp. 1-16). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>
- Mohamed, M. E. A. & Amer Eissa, H. A (2012). Structure and function of food engineering. Chapter 11. Pulsed electric fields for food processing technology InTech. (pp. 275-301). <https://doi.org/10.5772/48678>
- Niemira, B. A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. *Annual review of food science and technology*, 3(1), 125-142. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101132>
- Panigrahi, C., Mishra, H. N. & De, S. (2020). Effect of ozonation parameters on nutritional and microbiological quality of sugarcane juice. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), e13542. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13542>
- Rems, L., & Miklavčič, D. (2016). Tutorial: Electroporation of cells in complex materials and tissue. *Journal of Applied Physics*, 119(20). <https://doi.org/10.1063/1.4949264>
- Timmermans, R. A. H., Groot, M. N., Nederhoff, A. L., Van Boekel, M. A. J. S., Matser, A. M. & Mastwijk, H. C. (2014). Pulsed electric field processing of different fruit juices: Impact of pH and temperature on inactivation of spoilage and pathogenic micro-organisms. *International journal of food microbiology*, 173, 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.12.022>
- Ulbin-Figlewicz, N., Jarmoluk, A. & Marycz, K. (2015). Antimicrobial activity of low-pressure plasma treatment against selected foodborne bacteria and meat microbiota. *Annals of*

