

Research Paper

Optimization of *Escherichia coli* reduction in sour cherry juice using a combination of a Venturi tube reactor and liquid phase plasma

Kimia Taki¹, Bahram Hosseinzadeh Samani^{1*}

¹Department of mechanical engineering of biosystem, Shahrood university, Shahrood, Iran.

Article history	Abstract
Submitted: 2025/11/13	Sour cherry juice, prized for its high antioxidant, phenolic, and natural pigment content, is a popular beverage that is highly susceptible to microbial spoilage. To assess microbial inactivation, a continuous-flow system was constructed comprising a sour cherry juice reservoir, a high-precision pump, an argon gas tank for plasma formation, and a custom-designed glass Venturi tube reactor. Plasma was generated in the liquid phase using injected argon gas under voltages ranging from 10 to 20 kV. Sour cherry juice was autoclaved at 121°C for 15 minutes to eliminate background microorganisms and then inoculated with <i>E. coli</i> cultured for 24 hours. Treatment parameters included voltage, flow rate (2–8 L/min), temperature (30–50°C), and time (1–5 min). Under optimized conditions voltage of 19.85 kV, flow rate of 3.52 L/min, temperature of 47.82°C, and treatment time of 4.42 min the hybrid system achieved a maximum <i>E. coli</i> reduction of 6.18 log cycles (99%). In addition to microbial inactivation, the hybrid system showed superior retention of phenolic compounds, anthocyanins, vitamin C, and color integrity, which are key quality markers in fruit juice processing. Energy demand remains a limiting factor, necessitating integration with energy-saving systems and optimization of plasma operating conditions.
Revised: 2025/11/15	
Accepted: 2025/12/05	
Published online: 2025/12/21	
Keywords: Sour cherry juice pasteurization, <i>Escherichia coli</i> , Plasma, liquid-phase plasma, Venturi tube, Cavitation phenomenon	
*Corresponding author email: b.hosseinzadehsamani@gmail.com ORCID:  0000-0002-8563-7080 	

How to cite this paper:

Taki, K and Hosseinzadeh Samani, B. (2025). Optimization of *Escherichia coli* reduction in sour cherry juice using a combination of a Venturi tube reactor and liquid phase plasma. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. 37: 59-72. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14804.743> (In Persian)



Authors retain, F. the copyright and full publishing rights. Published by [Shahrood University](https://www.shahrood.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.2026.14804.743>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Sour cherry juice, prized for its high antioxidant, phenolic, and natural pigment content, is a popular beverage that is highly susceptible to microbial spoilage. This vulnerability presents significant safety and shelf-life challenges for producers. Conventional thermal pasteurization, while effective in microbial inactivation, often degrades the nutritional and sensory quality of the product. As consumer demand grows for minimally processed beverages with preserved nutritional and functional characteristics, non-thermal processing methods have become increasingly important. Among them, liquid-phase plasma and hydrodynamic cavitation stand out due to their high microbial inactivation potential without substantial heat generation. However, few studies have examined their synergistic effects in fruit juice processing.

This study addresses this gap by designing and optimizing a novel hybrid system that combines a Venturi tube-based hydrodynamic cavitation reactor with liquid-phase plasma technology. The aim is to inactivate *Escherichia coli* (*E. coli*) in sour cherry juice while minimizing the degradation of heat-sensitive compounds. The core innovation lies in the concurrent use of physical (cavitation) and chemical (reactive species) stress mechanisms. By leveraging the strengths of both methods, the system aims to deliver high microbial inactivation with minimal impact on physicochemical quality. This study also investigates the relationships among voltage, flow rate, temperature, and treatment time in determining system effectiveness using Response Surface Methodology (RSM). The results have the potential to advance sustainable, non-thermal pasteurization technologies in the beverage industry.

Material and Methods

To assess microbial inactivation, a continuous-flow system was constructed comprising a sour cherry juice reservoir, a

high-precision pump, an argon gas tank for plasma formation, and a custom-designed glass Venturi tube reactor. The reactor featured a throat diameter of 3.14 mm, length of 17.69 mm, and convergence/divergence angles of 23° and 80.81°, respectively. Tungsten electrodes were used due to their high melting point (>3000°C). Plasma was generated in the liquid phase using injected argon gas under voltages ranging from 10 to 20 kV.

Sour cherry juice was autoclaved at 121°C for 15 minutes to eliminate background microorganisms and then inoculated with *E. coli* cultured for 24 hours. Treatment parameters included voltage, flow rate (2–8 L/min), temperature (30–50°C), and time (1–5 min). Microbial load was determined using the plate count method on MacConkey agar. Experiments were conducted in triplicate. RSM with a Box-Behnken design was employed for optimization.

Results and Discussion

Under optimized conditions voltage of 19.85 kV, flow rate of 3.52 L/min, temperature of 47.82°C, and treatment time of 4.42 min the hybrid system achieved a maximum *E. coli* reduction of 6.18 log cycles (99%). The regression model showed excellent predictive power with an R^2 value of 0.99, standard error of 0.059, and coefficient of variation of 2.10%. ANOVA revealed that treatment time and voltage were the most significant variables ($P < 0.1$), followed by temperature and flow rate. Significant interactions were found between several variables, and quadratic effects highlighted complex interdependencies.

Quality analyses compared untreated, thermally treated, and hybrid-treated samples. Total phenolic content (TPC) in untreated juice was 283.71 mg GAE/100 g, decreasing by 16.5% (to 237.11 mg GAE/100 g) with thermal treatment and 14.2% (to 243.51 mg GAE/100 g) with hybrid treatment. Total anthocyanin content (TAC) dropped from 241.23 mg C3G/L to 201.57 mg C3G/L (thermal) and 217.32 mg C3G/L (hybrid),

indicating better pigment retention with the non-thermal method.

Vitamin C content showed a significant difference: 41.94 mg/L in untreated samples declined to 19.62 mg/L (thermal, 53.2% loss) and 29.67 mg/L (hybrid, 29.3% loss). Color preservation, measured via spectrophotometry, indicated a lower color difference ($\Delta E = 2.52$) for the hybrid-treated juice compared to thermal treatment ($\Delta E = 3.86$), preserving the natural red hue more effectively.

The combination of reactive oxygen and nitrogen species from plasma ($\bullet\text{OH}$, ozone, peroxyxynitrite) and extreme pressure and temperature from cavitation synergistically enhanced microbial inactivation. The physical damage from bubble collapse complemented chemical attacks on cell membranes and DNA, improving penetration and efficacy.

Conclusions

This study demonstrates that integrating liquid-phase plasma and Venturi-induced hydrodynamic cavitation offers a powerful, non-thermal method for inactivating *E. coli* in sour cherry juice. The approach ensures microbial safety while preserving critical nutritional and sensory properties, outperforming traditional thermal treatments. The high accuracy of the RSM model validates its utility in predicting and optimizing treatment parameters for maximal efficacy.

In addition to microbial inactivation, the hybrid system showed superior retention of phenolic compounds, anthocyanins, vitamin C, and color integrity, which are key quality markers in fruit juice processing. Its scalability, however, requires further consideration. Energy demand remains a limiting factor, necessitating integration with energy-saving systems and optimization of plasma operating conditions.

Future work should focus on industrial-scale implementation, cost-benefit analysis, and application of this technology to other beverages with different physicochemical characteristics and microbial loads.

Ultimately, this dual non-thermal technology represents a sustainable and efficient alternative for producing high-quality, microbiologically safe fruit juices, with strong potential for commercial adoption.

Author Contributions

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Ethical Considerations

This study did not involve any human or animal participants. All microbiological procedures involving *Escherichia coli* were conducted under appropriate biosafety level 1 (BSL-1) conditions. The authors affirm that the study complies with ethical standards and no data fabrication, falsification, plagiarism, or research misconduct occurred during the research process.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper

Funding Statement

This work was supported by Research and Technology Council of Shahrekord University .



بهینه‌سازی کاهش آلودگی اشرشیاکلی در آب آلبالو با استفاده از ترکیب راکتور لوله و نتوری و پلاسمای فاز مایع

کیمیا تاکی^۱، بهرام حسین زاده سامانی^۱

گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱	آب آلبالو به دلیل دارا بودن ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، فنولی و رنگ‌دانه‌های طبیعی، در زمره نوشیدنی‌های پرطرفدار و حساس به فساد میکروبی قرار دارد. در این پژوهش، یک سامانه غیرحرارتی ترکیبی شامل راکتور هیدرودینامیکی لوله و نتوری و پلاسمای فاز مایع طراحی و بهینه‌سازی شد تا کارایی آن در غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی و حفظ کیفیت آب آلبالو بررسی شود. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب دو فناوری غیرحرارتی پلاسمای فاز مایع و راکتور لوله و نتوری با پتانسیل هم‌افزایی بالا است. به منظور ارزیابی اثر متغیرهای مستقل و لتاز، دبی، دما و زمان بر کاهش بار میکروبی آب آلبالو، از روش سطح پاسخ (RSM) و طراحی باکس-بنکن استفاده شد. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه (ولتاژ ۱۹/۸۵ کیلوولت، دبی ۳/۵۲ لیتر بر دقیقه، دمای ۴۷/۸۲ درجه سلسیوس و زمان ۴/۴۲ دقیقه)، بیشترین کاهش لگاریتمی اشرشیاکلی برابر با ۶/۱۸ دوره لگاریتمی حاصل شد. مدل آماری دارای ضریب تعیین ۰/۹۹ بود و زمان و ولتاژ، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حذف بار میکروبی شناخته شدند. بررسی خواص کیفی این محصول در مقایسه با نمونه تیمار نشده و نمونه تیمار شده با روش حرارتی نشان داد که این روش ترکیبی موجب کاهش بسیار اندک در ترکیبات حساس محصول شد؛ به‌گونه‌ای که آنتوسیانین کل، فنول کل و ویتامین C و همچنین شاخص‌های رنگی (L^* , a^* , b^*) در طی این فرآیند حفظ شدند. این نتایج نشان می‌دهند که سامانه ترکیبی پلاسمای فاز مایع-لوله و نتوری، یک روش مؤثر، غیرحرارتی و ایمن برای پاستوریزاسیون نوشیدنی‌های حساس است که ضمن حذف مؤثر میکروارگانیسم‌ها، خواص کیفی محصول را نیز حفظ می‌کند.
واژه‌های کلیدی: پاستوریزاسیون آب آلبالو، اشرشیاکلی، پلاسمای فاز مایع، لوله و نتوری، پدیده کاویتاسیون	
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.hosseinzadehsamani@gmail.com ORCID:  ۰۰۰۰-۰۰۰۲-۸۵۶۳-۷۰۸۰	
	

نحوه استناد به این مقاله:

تاکی، ک. و حسین زاده سامانی، ب. (۱۴۰۴). تعیین عملکرد یک سمپاش پشته مجهز به افشانک تی جت در محیط شبیه سازی شده آزمایشگاهی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۳۷: ۵۹-۷۲. شناسه دیجیتال:

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2026.14804.743>

مقدمه

آلودگی میکروبی آب‌میوه‌ها، به‌ویژه آلودگی به باکتری‌هایی نظیر اشرشیاکلی (*Escherichia coli*)، یکی از چالش‌های اصلی در صنایع غذایی است که می‌تواند سلامت مصرف‌کنندگان را به خطر اندازد و کیفیت محصول را کاهش دهد (Luksiene, 2021). آب آلبالو، به دلیل ارزش غذایی بالا و تقاضای گسترده در بازار، نیازمند روش‌های مؤثر برای حذف آلاینده‌های میکروبی است تا استانداردهای ایمنی و کیفیت آن رعایت شود (Jamali-Hafshejani et al., 2025). روش‌های سنتی مانند حرارت‌دهی و استفاده از مواد شیمیایی نگهدارنده، اگرچه مؤثر هستند، ممکن است به تغییرات نامطلوب در طعم، رنگ، و ارزش غذایی محصول منجر شوند. از این‌رو، توسعه روش‌های نوین غیرحرارتی که ضمن حفظ ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای محصول، قادر به حذف مؤثر میکروارگانیسم‌ها باشند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Samani et al., 2013).

یکی از فناوری‌های نوظهور در این حوزه، استفاده از راکتورهای لوله و انتوری است. این راکتورها با ایجاد جریان‌های متلاطم و کاویتاسیون هیدرودینامیکی، شرایطی را فراهم می‌کنند که می‌تواند به غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها کمک کند. کاویتاسیون هیدرودینامیکی از طریق تولید حباب‌های گازی و فروپاشی آن‌ها، فشار و دمای موضعی بالایی ایجاد می‌کند که می‌تواند ساختار سلولی میکروارگانیسم‌ها را تخریب کند. با این حال، کارایی این روش به‌تنهایی ممکن است برای دستیابی به سطح مطلوب کاهش آلودگی میکروبی کافی نباشد، به‌ویژه در مواردی که بار میکروبی اولیه بالا است (Crudo et al., 2014) (Sun et al., 2020).

برای غلبه بر این محدودیت، ترکیب راکتور لوله و انتوری با فناوری پلاسمای فاز مایع به‌عنوان یک رویکرد نوین مورد توجه قرار گرفته است. پلاسمای فاز مایع، که از تخلیه الکتریکی در محیط مایع ایجاد می‌شود، گونه‌های فعال شیمیایی مانند رادیکال‌های آزاد (مانند $\text{OH}\cdot$ و $\text{O}\cdot$) و گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS) تولید می‌کند. این گونه‌ها به دلیل خواص اکسیدکننده قوی، قادر به تخریب دیواره سلولی و DNA میکروارگانیسم‌ها هستند (Abbas et al., 2024). ترکیب این دو فناوری می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کند، مخزن آب آلبالو، پمپ، مخزن گاز آرگون، لوله و انتوری، الکتروود مثبت و منفی، اسیلوسکوپ، ترانسفورماتور جریان متناوب.

به‌طوری که کاویتاسیون هیدرودینامیکی تولیدشده توسط راکتور لوله و انتوری، نفوذپذیری گونه‌های فعال پلاسما را به سلول‌های میکروبی افزایش می‌دهد و کارایی فرآیند غیرفعال‌سازی را بهبود می‌بخشد (Shabbir et al., 2020) (Abramov et al., 2021).

بهینه‌سازی فرآیندهای ترکیبی از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا پارامترهایی مانند شدت جریان، زمان ماند در راکتور، pH محیط، و توان پلاسما می‌توانند بر کارایی حذف اشرشیاکلی و کیفیت نهایی آب آلبالو تأثیر بگذارند. بهینه‌سازی این پارامترها نه‌تنها به کاهش بار میکروبی به سطح ایمن کمک می‌کند، بلکه مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی را نیز به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، حفظ ویژگی‌های حسی و تغذیه‌ای آب آلبالو، مانند رنگ، طعم، و محتوای آنتی‌اکسیدانی، از اولویت‌های اصلی در این فرآیند است.

این مطالعه با هدف بررسی اثربخشی ترکیب راکتور لوله و انتوری و پلاسمای فاز مایع در کاهش آلودگی اشرشیاکلی در آب آلبالو و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی این فرآیند انجام شده است. در این راستا، تأثیر پارامترهای کلیدی بر کارایی فرآیند و کیفیت محصول مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم توسعه داده شده‌اند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش به توسعه فناوری‌های غیرحرارتی مؤثر و پایدار در صنایع غذایی کمک کند و راه را برای تولید محصولات ایمن‌تر و باکیفیت‌تر هموار سازد.

مواد و روش‌ها

طراحی سامانه ترکیبی پلاسمای فاز مایع-هیدرودینامیک لوله و انتوری

هدف این پژوهش طراحی و ساخت راکتور حفره‌زای هیدرودینامیک لوله و انتوری و تلفیق آن با روش پلاسمای فاز مایع برای ساخت یک سامانه‌ی پیوسته غیرحرارتی به منظور از بین بردن اشرشیاکلی موجود در آب آلبالو بود که مطابق شکل (۱)، این سامانه‌ی ترکیبی شامل اجزای زیر است:

به منظور تشکیل بهتر پلاسما در ورودی راکتور هیدرودینامیک یک مخزن گاز آرگون قرار گرفت تا گاز آرگون را به داخل مایع درون راکتور تزریق کند.

$$Q = \beta * Q_{Th} \quad (2)$$

$$Q_{Th} = A_{Th} * V_{Th} \quad (3)$$

که در این روابط، Q نرخ جریان واقعی، Q_{Th} نرخ جریان تئوری، A_{Th} مساحت سطح گلوگاه ونتوری و V_{Th} سرعت در گلوگاه ونتوری است.

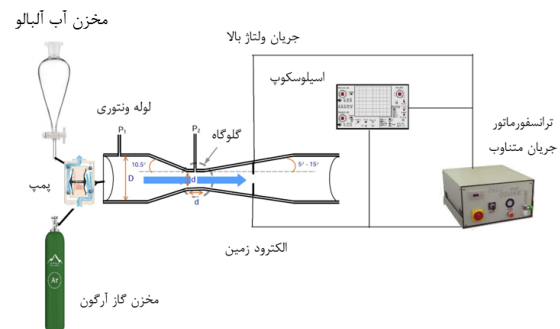
همچنین سرعت سیال در گلوگاه لوله ونتوری از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$V_{th} = \sqrt{(2 * \Delta p / \rho)} \quad (4)$$

که در این رابطه ρ دانسیته سیال است (Gogate, 2011). بر اساس معادلات داده شده، سیستم با ابعاد مشخصی از جمله قطر لوله ۲۰ میلی متر، قطر گلوگاه ۳/۱۴ میلی متر، طول گلوگاه ۱۷/۶۹ میلی متر زاویه همگرایی و واگرایی لوله به ترتیب ۲۳° و ۸۰/۸۱° طراحی شد. جنس این راکتور نیز شیشه در نظر گرفته شد.

سامانه پلاسمای فاز مایع

پلاسمای بعد چهارم ماده است و به یک گاز یونیزه شده که حاوی الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد، مقداری تشعشعات الکترومغناطیسی است، اطلاق می‌شود. برای تشکیل پلاسمای لازم است به یک گاز آنقدر انرژی داده شود که انرژی لازم برای غلبه بر انرژی پیوستگی الکترون‌ها در بیرونی‌ترین مدار ذرات تشکیل دهنده آن گاز تامین شود، در نهایت این الکترون‌ها جدا شده و یک گاز یونیزه شده به وجود می‌آید که پلاسمای نام دارد بنابراین برای ایجاد پلاسمای لازم است تا الکترون از اتم‌ها یا مولکول‌ها در حالت گاز جدا شود. همچنین برای تشکیل پلاسمای بایستی فرآیند شکست الکتریکی رخ دهد. معمولاً گازهایی مانند هوا، اکسیژن، آرگون و ازت می‌توانند توسط انواع تخلیه‌های الکتریکی به پلاسمای انرژی زیاد تبدیل شوند. بطور کلی پلاسمای هم در فاز گاز و هم در فاز مایع تشکیل می‌شود. با این حال رایج‌ترین روش برای تولید پلاسمای اعمال میدان الکتریکی به یک گاز خنثی است. اما نظر به اینکه تشکیل پلاسمای در فاز گاز با محدودیت‌هایی از قبیل عمق نفوذ و عمق اثر کم همراه است، تشکیل پلاسمای فاز مایع بخصوص در مباحث مربوط به صنایع غذایی کاربردهای فراوان دارد (Fina et al., 2024) (Misra et al., 2016).



شکل ۱- سامانه پاستوریزاسیون ترکیبی پلاسمای فاز مایع - لوله ونتوری

طراحی سامانه هیدرودینامیک لوله ونتوری

هندسه‌ی راکتور هیدرودینامیک لوله ونتوری از طراحی ساده با دو بخش همگرا (گلوگاه) و واگرا (دیفیوزر) تشکیل شده است. برطبق اصل برنولی سرعت سیال با عبور از این گلوگاه افزایش می‌یابد، در حالی که فشار استاتیکی آن در این مقطع کاهش می‌یابد. همچنین در قسمت واگرایی لوله ونتوری (دیفیوزر)، سرعت کاهش و فشار افزایش می‌یابد و پدیده حفره‌زایی (کاویتاسیون) هیدرودینامیکی از طریق همین افت فشار ناشی از این تغییرات سرعت جریان مایع در درون اتفاق می‌افتد. در واقع پدیده‌ی کاویتاسیون یا حفره‌زایی یک پدیده‌ی فیزیکی است که در آن فشار یک مایع کاهش می‌یابد و به فشار بخار آب اشباع نزدیک می‌شود و باعث تبخیر موضعی مایع می‌شود. در طی این واکنش در قسمت گلوگاه راکتور حباب‌هایی تشکیل می‌شود که با رسیدن این حباب‌ها به نقاط پرفشار که همان بخش واگرایی راکتور است، انفجار اتفاق می‌افتد و این انفجار منجر به آزاد شدن انرژی زیاد، ایجاد اختلاط و همزنی و همچنین درهم شکستن کلونی میکروارگانیسم‌ها در درون مایع می‌شود.

پارامترهای ساختاری مهم در طراحی و ساخت یک راکتور لوله‌ی ونتوری عبارتند از قطر لوله (D)، قطر گلوگاه (d)، زاویه ورودی (α)، طول گلوگاه (L_{th}) و زاویه خارجی (β). قطر لوله ابتدا و انتهای لوله از رابطه‌ی (۱) بدست آمد.

$$d = \sqrt{(4 * Q) / (\sqrt{\pi * \beta * \Delta P})} \quad (1)$$

در این رابطه، Q نرخ انتقال جریان سیال درون لوله ونتوری، β ضریب تخلیه، (از ۰/۶ تا ۰/۹۹) و ΔP افت فشار است.

همچنین با استفاده از روابط (۲) و (۳)، نرخ جریان انتقال واقعی و تئوری محاسبه می‌شود.

برای شمارش باکتری‌ها از روش شمارش پلیت استاندارد (زنده) استفاده شد و برای هر نمونه سه رقت به دست آمد و از هر رقت ۲۵۰ میکرولیتر بر روی محیط کشت مک کانکی آگار کشت داده شد (همه این مراحل زیر هود انجام شد). سپس به منظور رشد بهتر باکتری‌های اشرشیاکلی، پتری دیش‌های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد در انکوباتور قرار گرفتند. در نهایت تعداد کلنی‌ها در هر پلیت تعیین و باکتری‌های موجود در هر نمونه شمارش شد (Mortari et al., 2014).

ارزیابی خواص فیتوشیمیایی و کیفی آب آلبالو

در این بخش نیز اثر سامانه موردنظر بر خواص فیتوشیمیایی و کیفی آب آلبالو، با اندازه‌گیری محتوا فنول کل (TPC)، محتوا آنتوسیانین کل (TAC)، ویتامین C و رنگ نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش اندازه‌گیری محتوای فنولی کل (TPC)

محتوای فنولی کل (TPC) آب آلبالو با استفاده از روش فولین-سیوکالتیو تعیین شد. برای این منظور، ۰/۰۰۲۵ گرم از نمونه‌های آب آلبالو برداشته شد و با ۱ میلی‌لیتر متانول مخلوط گردید. سپس، مخلوط حاصل با آب مقطر به حجم ۲/۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله بعد، ۰/۲۵ میلی‌لیتر از محلول ۱۰ درصد واکنشگر فولین-سیوکالتیو به مخلوط اضافه شد و به خوبی هم زده شد تا کاملاً یکنواخت شود. پس از ۵ دقیقه، ۲ میلی‌لیتر محلول کربنات سدیم ۲۰ درصد (Na_2CO_3) به مخلوط افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در محیط تاریک قرار گرفتند. سپس، جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۷۶۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-1800 قرائت شد. با جایگذاری مقادیر جذب نوری در معادله کالیبراسیون، محتوای فنولی کل نمونه‌ها بر حسب میلی‌گرم معادل گالیک اسید (GAE) در ۱۰۰ گرم آب‌میوه محاسبه شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند.

تعیین محتوای آنتوسیانین کل (TAC)

محتوای آنتوسیانین کل (TAC) نمونه‌ها با استفاده از روش pH افتراقی و بر اساس آنتوسیانین غالب آلبالو (سیانیدین-۳-گلیکوزید) محاسبه شد (بلاندو و همکاران، ۲۰۰۴). برای این منظور، دو بافر شامل کلرید پتاسیم (KCl) با pH برابر یک و

در واقع برای ایجاد پلاسما در فاز مایع باید انرژی بطور مستقیم در محیط یک مایع اعمال شود. پلاسمای فاز مایع، انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندهای مولکولی را به طور مستقیم از طریق تخلیه الکتریکی با ولتاژ و فرکانس بالا به مایع واکنش دهنده اعمال می‌کند و یک کفلال پلاسمایی بین دو الکترود در محیط مایع بوجود می‌آورد. امروزه این روش برای ضدعفونی، سالم سازی، تخریب ترکیبات شیمیایی خطرناک، سنتز و تصفیه بسیار استفاده می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به عمق اثر زیاد و کوتاه بودن زمان آن اشاره کرد (Taki et al., 2025).

این سامانه شامل دو جفت الکترود هم محور است که به فاصله ی مشخص از هم در قسمت همگرا و واگرای لوله ونتوری قرار گرفته اند. با توجه به اینکه دمای ذوب تنگستن بیش از ۳۰۰۰ درجه سلسیوس است و با اتصال آن به ولتاژ بالا، ذوب نمی‌شود، جنس الکترودها از تنگستن انتخاب شده است. در هر جفت الکترود، یکی از الکترودها به منبع ولتاژ بالا متصل است و الکترود دیگر به الکترود زمین متصل است.

تهیه نمونه‌های میکروبی و آزمایشات میکروبی

برای انجام آزمایشات میکروبی از نمونه‌های آب آلبالو که با آگیری از آلبالوهای تازه، تهیه شده بودند، استفاده شد. در ابتدا به منظور حذف هر گونه آلودگی و به صفر رساندن بار میکروبی آب آلبالو، نمونه‌های آب آلبالو بطور کامل تحت اتوکلاو قرار گرفتند و به همین منظور نمونه‌ها در حدود ۱۵ دقیقه تحت دمای 121°C در فشار ۱۵ psi قرار گرفتند. سپس نمونه‌های استریل شده با *E. coli* که از آزمایشگاه دانشگاه شهرکرد تهیه شد و از ۲۴ ساعت قبل در محیط کشت مک کانکی کشت داده شد، آلوده شد، تا میزان کاهش رشد در هر نمونه از مراحل مورد نظر تعیین شود.

برای تهیه سوسپانسیون، چند کلونی از همین باکتری *E. coli* کشت شده به داخل یک لوله آزمایش استریل حاوی سرم فیزیولوژیکی (کلرید سدیم ۹ درصد) منتقل شد. سپس نمونه‌های آب آلبالو با افزودن حجم مناسبی از سوسپانسیون به داخل آن آلوده شدند (به ازای ۴۹۵ میلی لیتر آب آلبالو، ۵ میلی لیتر سوسپانسیون در نظر گرفته شد). یکی از نمونه‌ها به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد و بدون گذر از سامانه ساخته شده و تیمار پلاسما و برای شمارش میکروبی در نظر گرفته شد. دیگر نمونه‌ها نیز بعد از گذر از سامانه ساخته شده و تیمار پلاسما برای شمارش آماده شدند.

طعم و رنگ محصول است. رنگ آب آلبالو معمولاً حالتی بین قرمز تا قرمز تیره است.

تغییر رنگ نمونه‌ها با استفاده از روش اسپکتروفتومتری و بر اساس قانون بیر-لامبرت ارزیابی شد. طبق این قانون، هنگامی که نور تک‌رنگ از یک محلول رنگی عبور می‌کند، مقدار نور جذب‌شده یا عبوری از محلول به غلظت ماده مورد نظر و مسافت طی شده توسط نور در محلول (قطر لوله) وابسته است. در صورتی که مسیر عبور نور ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، جذب نوری صرفاً به غلظت محلول بستگی دارد (Hosseini et al., 2020). برای اندازه‌گیری تغییر رنگ نمونه‌ها، ابتدا نمودار کالیبراسیون رسم شد. به این منظور، شش حجم مختلف از نمونه اولیه به‌گونه‌ای رقیق شدند که جذب نوری آنها در محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ قرار گیرد، زیرا در این محدوده، تغییرات جذب نوری نسبت به غلظت نمونه‌ها برای دستگاه مورد استفاده خطی است. با توجه به رنگ قرمز نمونه‌ها، بیش‌ترین جذب نوری در طول موج ۵۰۴ نانومتر مشاهده شد. بنابراین، جذب نوری نمونه‌ها در این طول موج با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-1800 اندازه‌گیری و نمودار کالیبراسیون بر اساس حجم نمونه‌ها رسم شد. برای محاسبه غلظت نمونه‌ها، وزن آن‌ها تعیین و غلظت بر حسب میکروگرم بر میلی‌لیتر ($\mu\text{g/mL}$) جایگزین حجم شد تا نمودار نهایی کالیبراسیون حاصل شود. سپس، برای بررسی اثر پلاسما بر تغییر رنگ نمونه‌های تحت تیمار، جذب نوری آنها در طول موج ۵۰۴ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-1800 قرائت شد.

روش تحلیل، مدل‌سازی و بهینه‌سازی آزمایش

در این پژوهش با هدف بهینه‌سازی آزمایش از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده خواهد شد. روش سطح پاسخ به عنوان یک روش ساده و کارا شناخته می‌شود که قادر است با استفاده از مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری واکنش‌های شیمیایی را مدل‌سازی کند (Taki et al., 2023). این روش با معیار قرار دادن حدود بیشینه و کمینه مشخص شده برای هر متغیر و تعداد متغیرها یک ماتریس آزمایش تعیین می‌کند و بر این اساس تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمون را مشخص می‌کند. این روش برای زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد بسیار مناسب است. به منظور بدست آوردن مقدار بهینه از حل رابطه (۷) استفاده شد.

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ij} X_i^2 + \varepsilon \quad (7)$$

استات سدیم (NaAc) با pH استفاده شد. در هر آزمایش، ۱ تا ۵ میلی‌لیتر از نمونه‌های آب آلبالو در دو بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری ریخته شد. یکی از بالن‌ها با بافر کلرید پتاسیم و دیگری با بافر استات سدیم به حجم نهایی رسانده شد. پس از ۲۰ تا ۴۰ دقیقه، جذب نوری نمونه‌ها در طول موج‌های ۵۲۰ نانومتر و ۷۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-1800، یک‌بار با بافر کلرید پتاسیم ($\text{pH}=1$) و بار دیگر با بافر استات سدیم ($\text{pH}=4.5$) قرائت شد. محتوای آنتوسیانین کل با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد.

$$\text{TAC} = \frac{A \times \text{Mw} \times \text{DF} \times 10^3}{\varepsilon \times L} \quad (5)$$

در این رابطه، Mw جرم مولکولی سیانیدین - ۳ گلیکوزید، DF فاکتور رقت، ε جذب مولی سیانیدین - ۳، انتخاب شد و تاثیر پارامترهای مستقل بر شمارش میکروبی بررسی شد. گلیکوزید، L طول کووت و A میزان جذب می‌باشند. مقدار A از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}=1} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH}=4.5} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، A_{520} جذب در طول موج ۵۲۰ nm و A_{700} جذب در طول موج ۷۰۰ nm هستند) در این مرحله نیز تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد.

ویتامین C

ویتامین C نمونه‌ها که بیشتر اسید آسکوربیک نامیده می‌شود از روش تیتراسیون یدات پتاسیم تعیین شد. برای این کار ۱ ml از نمونه‌های آب آلبالو درون یک بالن با حجم ۲۵۰ ml ریخته شد. سپس ۱۵۰ ml آب مقطر، ۵ ml پتاسیم یدید 0.06 mol/l ، ۵ ml هیدروکلریک اسید 1 mol/l و ۱ ml محلول نشانگر نشاسته به بالن اضافه شد. در ادامه یدات پتاسیم 0.05 mol/l درون بالن تیترا شد. این کار تا زمانی انجام گرفت که رنگ محتویات داخل بالن تیره شد. سپس حجم تیترا شده یادداشت و بر اساس آن میزان اسید آسکوربیک نمونه‌ها محاسبه شد. غلظت ویتامین C بر حسب میلی گرم آسکوربیک اسید در ۱۰۰ ml نمونه‌ها بدست آمد. همه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند.

ارزیابی حسی

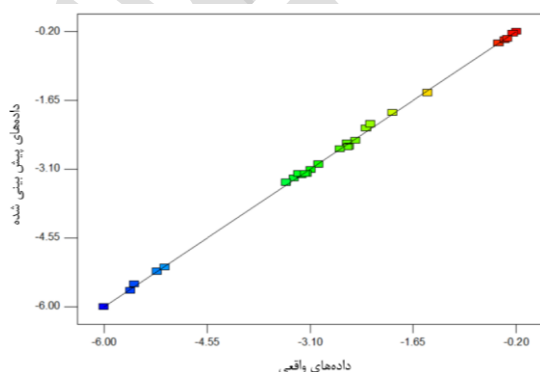
ارزیابی حسی که یکی از ویژگی‌های مهم حسی تلقی می‌شود علاوه بر تاثیرگذاری بر انتخاب مصرف کنندگان، نشانگر کیفیت محصولات آشامیدنی نیز هست. ارزیابی حسی آب آلبالو شامل

$$\begin{aligned} \text{Log}(N/N_0) = & -1.84652 + 0.84258 * \text{Voltage} - \\ & 0.16421 * \text{Flowrate} + -0.058833 * \text{Temperature} \\ & 1.49063 * \text{Time} - 0.074250 * \text{Voltage} * \text{Time} - \\ & 1.75000\text{E-}003 * \text{Flowrate} * \text{Temperature} - \\ & 0.013750 * \text{Flowrate} * \text{Time} - 6.25000\text{E} * \\ & \text{Temperature} * \text{Time} - 0.030733 * \text{Voltage}^2 + \\ & -9.07407\text{E-}003 * \text{Flow rate}^2 + 5.54167\text{E-}004 \\ & \text{Temperature}^2 + +0.37885 \text{Time}^2 \end{aligned} \quad (۸)$$

بر طبق این رابطه و ضرایب هرکدام از متغیرهای مستقل، می‌توان گفت قدر مطلق ضریب هرکدام از متغیرها که بزرگتر باشد، نشان‌دهنده تاثیرگذاری بیشتر آن متغیر بر متغیر وابسته آزمایش است. بنابراین با توجه به معادله کدبندی شده (۹)، متغیر ولتاژ، زمان، دما و دبی جریان به ترتیب بیشترین تاثیر را در از بین بردن و یا کاهش اشرشیاکلی دارند. همچنین ضرایب منفی این متغیرها نشان دهنده تاثیر کاهشی این متغیرها بر روی متغیر وابسته است. درواقع می‌توان گفت با افزایش هرکدام از این متغیرهای مستقل، میزان اشرشیاکلی کاهش می‌یابد.

$$\begin{aligned} \text{Log}(N/N_0) = & -3.19 - 1.51 * \text{Voltage} - 0.13 * \\ & \text{Flow rate} - 0.25 * \text{Temperature} - 1.30 * \text{Time} - \\ & 0.74 * \text{Voltage} * \text{Time} + 0.053 * \text{Flowrate} * \\ & \text{Temperature} - 0.082 * \text{Flowrate} * \text{Time} - 0.12 * \\ & \text{Time} * \text{Temperature} + -0.77 * \text{Voltage}^2 + 0.082 * \\ & \text{Flowrate}^2 + 0.055 * \text{Temperature}^2 + 1.52 * \text{Time}^2 \end{aligned} \quad (۹)$$

شکل (۲)، یکی از ابزارهای مهم در ارزیابی دقت مدل‌های آماری در روش منحنی را نشان می‌دهد. که این نمودار مقادیر واقعی بدست آمده از آزمایش را در برابر مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ترسیم می‌کند. توزیع داده‌ها در امتداد خط $y=x$ نشان‌دهنده تطابق مناسب داده‌های مدل با داده‌های واقعی و تجربی است.



شکل ۲- صحت سنجی داده‌های واقعی در مقابل داده‌های

مدل

که در آن β_0 ، β_i ، β_{ij} و β_{jz} : ضرایب ثابت، X_i و X_j : متغیرهای مستقل فرآیند، ε : خطای تصادفی. در این آزمایش از طرح باکس بنکن استفاده شد و سطوح انتخابی برای متغیرهای مستقل آزمایش مطابق جدول (۱) انتخاب شد.

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل در روش سطح پاسخ

متغیرهای مستقل	سطوح کدبندی		
	-۱	۰	+۱
ولتاژ (kV)	۱۰	۱۵	۲۰
دبی (l/min)	۲	۵	۸
دما (°C)	۳۰	۴۰	۵۰
زمان (min)	۱	۳	۵

نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور طراحی یک سامانه پاستوریزاسیون ترکیبی پلاسمای سرد-لوله و نتوری برای از بین بردن اشرشیاکلی آب آلبالو، چهار متغیر مستقل ولتاژ، دبی جریان، دما و زمان انجام فرآیند به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. به منظور بهینه سازی ابعاد راکتور از نرم افزار Design Expert و روش منحنی سطح پاسخ (RSM) استفاده شد.

اثر سامانه ترکیبی بر روی کاهش اشرشیاکلی آب آلبالو

در این قسمت اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر روی میزان کاهش باکتری اشرشیاکلی آب آلبالو بررسی شد. نتایج این تجزیه واریانس در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به این جدول ضریب معنا داری (P-Value) کمتر از ۰/۱ نشان دهنده معنی دار بودن فاکتورهای مدل است. بنابراین ولتاژ (A)، دبی جریان (B)، دما (C) و زمان (D) و حاصل ضرب زمان در دما ($D \times C$)، دبی جریان در دما ($B \times C$)، ولتاژ در زمان ($A \times D$) و دبی جریان در زمان ($D \times B$) و همچنین توان دوم ولتاژ (A^2)، توان دوم دبی جریان (B^2)، توان دوم دما (C^2) و توان دوم زمان (D^2) در سطح احتمال ۱۰٪ معنی دار هستند. باتوجه به تجزیه و تحلیل انجام شده دو معادله واقعی و کدبندی شده برای متغیر وابسته این آزمایش استخراج شد. رابطه (۸) رابطه واقعی برای متغیر وابسته آزمایش که میزان کاهش باکتری اشرشیاکلی را نشان می‌دهد، است.

مدل به دست آمده برای تعیین میزان کاهش اشرشیاکلی، یک مدل درجه دوم کامل که R^2 آن معادل ۰/۹۹۹۳، خطای استاندارد ۰/۰۵۹ و همچنین ضریب تغییرات ۲/۱۰٪ بود.

جدول ۲- تجزیه و تحلیل واریانس اثرات اصلی و متقابل

نام متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	Prob>F
مدل	۷۳/۰۴	۱۲	۶/۹	<۰/۰۰۰۱
ولتاژ	۲۷/۳۹	۱	۲۷/۳۹	<۰/۰۰۰۱
دبی جریان	۰/۲۲	۱	۰/۲۲	<۰/۰۰۰۱
دما	۰/۷۲	۱	۰/۷۲	<۰/۰۰۰۱
زمان	۲۰/۲۸	۱	۲۰/۲۸	<۰/۰۰۰۱
ولتاژ × زمان	۲/۲۱	۱	۲/۲۱	<۰/۰۰۰۱
دبی جریان × دما	۰/۰۱۱	۱	۰/۰۱۱	۰/۰۹۵۹
دما × زمان	۰/۰۶۳	۱	۰/۰۶۳	۰/۰۰۰۸
دبی جریان × زمان	۰/۰۲۷	۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۴۰
ولتاژ ^۲	۳/۱۵	۱	۳/۱۵	<۰/۰۰۰۱
دبی جریان ^۲	۰/۰۳۶	۱	۰/۰۳۶	۰/۰۰۶۳
دما ^۲	۰/۰۱۶	۱	۰/۰۱۶	۰/۰۴۷۲
زمان ^۲	۱۲/۲۵	۱	۱۲/۲۵	<۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۰/۰۴۸	۱۴	۰/۰۰۳۵	
عدم برازش	۰/۰۴۲	۱۲	۰/۰۰۳۴	۰/۶۰۰۵ ^{ns}
خطای خالص	۰/۰۰۶۸	۲	۰/۰۰۳۴	
کل	۷۳/۰۹	۲۶		

ns: غیر معنی دار

تأثیر ولتاژ و زمان انجام واکنش بر روی از بین بردن اشرشیاکلی

شکل (۳) کاهش باکتری اشرشیاکلی را تحت تأثیر فاکتور زمان انجام واکنش و ولتاژ سامانه پلاسما نشان می‌دهد. بر طبق این شکل مشخص است که شیب تغییرات ولتاژ بسیار تندتر از شیب تغییرات زمان انجام واکنش است. که البته ضرایب رابطه کدبندی شده (۹) نیز دلالت بر این موضوع دارد و نشان می‌دهد که تأثیرگذارترین پارامترها در کاهش اشرشیاکلی اول ولتاژ و سپس زمان انجام واکنش هستند. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با افزایش زمان از ۱ تا ۳ دقیقه، اشرشیاکلی کاهش یافته است و از مقدار ۰/۳۷- به ۳/۱۵- رسیده است. همانطور که شیب این نمودار و همچنین داده‌های حاصل از نمودار نشان می‌دهد. روند تغییرات و کاهش اشرشیاکلی در ۱ تا ۳ دقیقه نسبت به ۳ تا ۵ دقیقه بیشتر است. برطبق شکل با افزایش زمان از ۳ به ۵ دقیقه میزان اشرشیاکلی تنها ۰/۱۸ لوگ کاهش داشته است. درواقع مکانیزم اثر زمان ماند بیشتر پلاسما بر روی از بین بردن بار میکروبی نمونه‌های شیر به این صورت است که گونه‌های فعال تولید شده توسط پلاسما، مانند گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (RONS)، نقش مهمی در مختل کردن غشاهای

سلولی میکروبی و اجزای درون سلولی ایفا می‌کنند که منجر به مرگ سلولی می‌شود. اثربخشی این گونه‌ها با قرار گرفتن در معرض طولانی‌تر پلاسما افزایش می‌یابد بنابراین زمان ماند بیشتر می‌تواند یک عامل تأثیرگذار در فرآیند پاستوریزاسیون باشد (Li et al., 2021).

باتوجه به اینکه فرآیند پاستوریزاسیون در این پژوهش، در یک راکتور لوله و انتوری انجام می‌گیرد، بنابراین زمان ماند در این راکتور نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار در از بین بردن بار میکروبی نمونه‌های آب آلبالو خواهد بود. از طریق پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیکی در درون لوله، این کاهش بار میکروبی اتفاق می‌افتد. این فرآیند شامل تولید حباب‌هایی است که منفجر می‌شود و انرژی موضعی (محلی) شدید تولید می‌کنند و به طور موثر سلول‌های میکروبی را مختل می‌کنند. افزایش ولتاژ نیز تأثیر کاهشی بر روی باکتری اشرشیاکلی دارد. به اینصورت که با افزایش ولتاژ از ۱۰ تا ۲۰ کیلو ولت میزان اشرشیاکلی به اندازه ۳/۰۲ لوگ کاهش داشته است.

در پژوهشی که توسط (Tarabová et al., 2021) انجام شده است به منظور از بین بردن میکروارگانیسم‌ها از آب سیب فناوری پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که برطبق نتایج این پژوهش، مشخص می‌شود که غیرفعال سازی میکروبی با

است که تاثیر متغیر زمان بر روی کاهش اشرشیاکلی از تاثیر دبی جریان در این فرآیند بیشتر است. با افزایش دبی جریان از ۲ میلی لیتر تا ۸ میلی لیتر، میزان کاهش اشرشیاکلی به اندازه ۰/۳ لوگ کاهش داشته است. با توجه به شیب این نمودار می‌توان ادعا کرد تاثیر کلی دبی جریان بر روی کاهش باکتری اشرشیاکلی کم بوده است. افزایش دبی جریان، منجر به افزایش حباب‌های کاویتاسیون می‌شود که موجب افزایش انرژی جنبشی آشفتگی، تلاطم و اختلاط در درون لوله است اما عیبی که دارد این است که هرچه دبی جریان و سرعت بیشتر باشد، مدت زمانی که پلاسما فرصت دارد تا به نمونه‌های آب آلبالو نفوذ کند کاهش می‌یابد و درواقع افزایش دبی منجر به اعمال سریع پلاسما می‌شود به همین دلیل افزایش دبی تاثیر چندانی در از بین بردن میکروارگانیسم‌ها نداشته است.

در پژوهش (C.-P. Wang *et al.*, 2021) نیز به این موضوع اشاره شده است که رابطه بین سرعت جریان و زمان انجام واکنش بسیار مهم است. در حالی که دبی جریان بالاتر می‌تواند کاویتاسیون را افزایش دهد، اما ممکن است زمان ماند باکتری‌ها در میدان کاویتاسیون را نیز کاهش دهد و اگر به درستی متعادل نباشد، کارایی پاستوریزاسیون را کاهش می‌دهد. در پژوهش‌های دیگر نیز به این موضوع اشاره شده است که سرعت و دبی جریان محدود هستند و حدود مشخص باید داشته باشند که در آن کاویتاسیون به اندازه کافی برای از بین بردن سلول‌های میکروبی تاثیرگذار شود، درواقع نتایج نشان می‌دهد که دبی و سرعت جریان باید با زمان ماند هماهنگی مناسبی داشته باشد تا ضدعفونی و کاهش باکتری‌ها به طور مؤثر انجام شود (Taki, Samani, Izadi, Rostmai, & Nazai, 2025).

تاثیر دبی جریان و دما بر روی کاهش اشرشیاکلی آب آلبالو

همانطور که نمودار (۶) نشان می‌دهد و همچنین باتوجه به ضرایب رابطه کدبندی شده (۹)، تاثیر دما در مقایسه با تاثیر دبی جریان در از بین بردن اشرشیاکلی بیشتر است. یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن هر دو شرایط دما و دبی جریان را در طراحی استراتژی‌های مؤثر کاهش *E. coli* برای کاربردهای فرآوری مواد غذایی و ایمنی برجسته می‌کند. مطالعات اخیر تأثیر قابل توجه دما و دبی جریان را بر غیرفعال‌سازی

ولتاژ یا قدرت اعمال شده بالاتر و همچنین مدت زمان بیشتر افزایش می‌یابد. اثر غیرفعال سازی به اثر هم افزایی گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن با عمر کوتاه و طولانی (RONS) و آسیب دیواره سلول‌های میکروبی در سطوح مختلف به دلیل اثرات الکتریکی یا فیزیکی ناشی از پلاسما نسبت داده می‌شود.

تاثیر دما و زمان بر روی کاهش اشرشیاکلی آب آلبالو

باتوجه به شکل (۴)، زمان انجام واکنش و دمای واکنش نیز دو پارامتر بسیار تاثیرگذار در کاهش اشرشیاکلی هستند. باتوجه به شکل و شیب قسمت‌های مختلف نمودار مشخص است که تاثیر متغیر زمان در کاهش اشرشیاکلی موجود در نمونه‌های آب آلبالو بسیار بیشتر از دمای واکنش بوده است. با افزایش زمان واکنش از ۱ تا ۵ دقیقه میزان اشرشیاکلی ۲/۶ لوگ کاهش داشته است و با افزایش دما از ۳۰ تا ۵۰ درجه، میزان اشرشیاکلی ۰/۴۹ حدود ۱۷٪ کاهش داشته است. در پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که اعمال دمای خفیف قادر به اثرگذاری بر روی میکروارگانیسم‌ها و بار میکروبی مواد غذایی هست، اما بهتر است که این دمای خفیف با روش‌های غیرحرارتی دیگر ترکیب شود تا هم اثربخشی بهتری داشته باشد هم خواص کیفی و مواد مغذی محصول حفظ شود.

در پژوهشی که توسط فیما و همکاران ۲۰۲۴ انجام گرفته است، نشان داده شده است که حرارت ملایم به طور قابل توجهی اثر میکروب زدایی آب فعال شده با پلاسما (PAW) را در برابر باکتری *E. coli* افزایش می‌دهد. نشان داد که دمای ملایم سرعت واکنش تشکیل اسید پراکسی نیتروس را افزایش می‌دهد و منجر به تولید بیشتر رادیکال هیدروکسیل و بهبود حذف *E. coli* در آب میوه می‌شود. همچنین در پژوهشی دیگر که توسط (Dasan *et al.*, 2018) انجام گرفته است به بررسی فاکتور زمان ماند بر روی کاهش اشرشیاکلی پرداخته شده است که نتایج این پژوهش حاکی از آن بوده است که، هرچقدر مدت زمان اعمال پلاسما بر روی نمونه‌های آبمیوه بیشتر باشد، باکتری اشرشیاکلی بیشتری غیرفعال می‌شود.

تاثیر دبی جریان و زمان بر روی کاهش اشرشیاکلی آب آلبالو

مطابق شکل (۵) باتوجه به شیب دو بخش نمودار مشخص

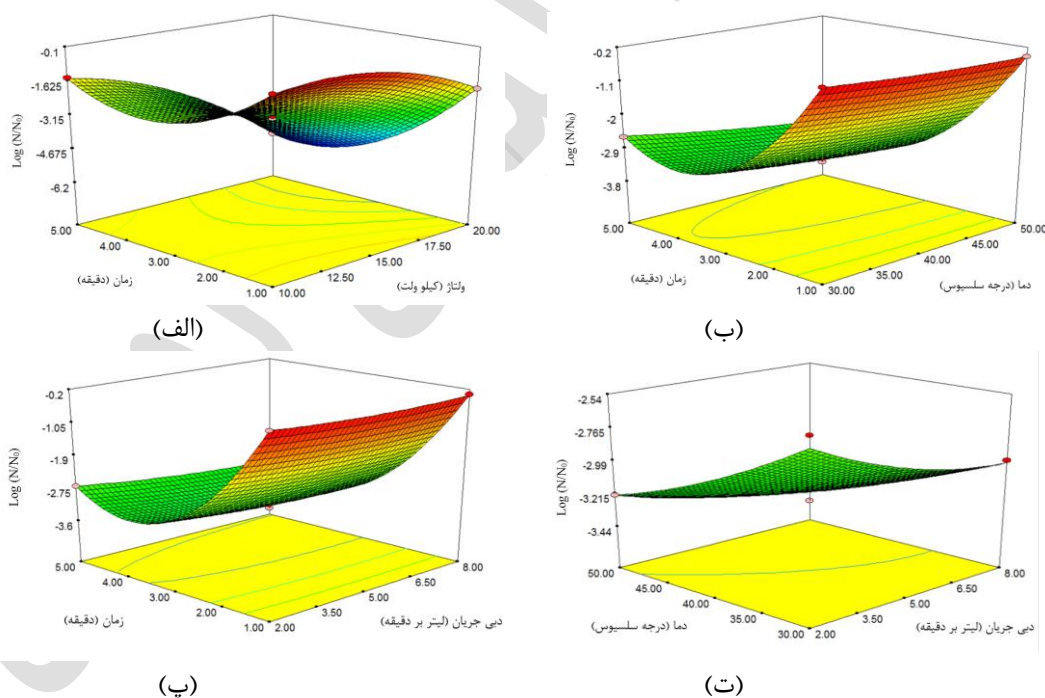
مبنا برای مقایسه در نظر گرفته شد. تیمار حرارتی این مقادیر را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد و به ترتیب به ۲۳۷/۱۱ میلی‌گرم گرم GAE/100 گرم (کاهش ۱۶/۵٪)، ۲۰۱/۵۷ میلی‌گرم گرم C3/L (کاهش ۱۶/۵٪) و ۱۹/۶۲ میلی‌گرم بر لیتر (کاهش ۵۳/۲٪) رساند. این کاهش چشمگیر، به‌ویژه در ویتامین C، به حساسیت حرارتی ترکیبات فنولیک و اسید اسکوربیک نسبت به دما مرتبط است. در مقابل، تیمار پلاسمای سرد کاهش ملایم‌تری را نشان داد، با TPC برابر ۲۴۳/۵۱ میلی‌گرم گرم GAE/100 گرم (کاهش ۱۴/۲٪)، TAC برابر ۲۱۷/۳۲ میلی‌گرم گرم C3/L (کاهش ۹/۹٪) و ویتامین C برابر ۲۹/۶۷ میلی‌گرم بر لیتر (کاهش ۲۹/۳٪). این نتایج حاکی از آن است که پلاسمای سرد، به‌عنوان یک فناوری غیرحرارتی، در مقایسه با تیمار حرارتی، ترکیبات زیست‌فعال را بهتر حفظ می‌کند، که به دلیل استفاده از گونه‌های واکنشی و تولید حرارت ناچیز است (Pankaj *et al.*, 2013).

اشرشیاکلی نشان داده‌اند. دماهای بالاتر و زمان‌های مواجهه طولانی‌تر عموماً منجر به افزایش کاهش میکروارگانیزم‌هایی نظیر اشرشیاکلی می‌شوند (H. Wang *et al.*, 2007).

نتایج حاصل از ارزیابی حسی

داده‌های ارائه‌شده در جدول (۳)، خواص کیفی آب آلبالو را تحت سه شرایط بدون تیمار، تیمار حرارتی و تیمار پلاسمای سرد-لوله و نتوری مقایسه می‌کند. این خواص شامل محتوای فنول کل (TPC)، محتوای آنتوسیانین کل (TAC)، محتوای ویتامین C است همچنین جدول (۴) تحت همان شرایط به بررسی پارامترهای رنگی (L^* ، a^* ، b^* و ΔE) می‌پردازد که برای ارزیابی کیفیت تغذیه‌ای و ظاهری آب‌میوه‌ها اهمیت دارند.

نمونه بدون تیمار بالاترین مقادیر TPC (۲۸۳.۷۱ میلی‌گرم گرم GAE/100 گرم)، TAC (۲۴۱/۲۳ میلی‌گرم گرم C3/L) و ویتامین C (۴۱/۹۴ میلی‌گرم بر لیتر) را نشان داد و به‌عنوان



شکل ۳- اثر متقابل (الف) ولتاژ و زمان، (ب) دما و زمان، (پ) دبی جریان و زمان و (ت) دبی جریان و دما بر کاهش اشرشیاکلی

ΔE ، که تفاوت رنگی کلی نسبت به نمونه بدون تیمار را نشان می‌دهد، در تیمار حرارتی (۳/۸۶) بیشتر از پلاسمای سرد-لوله و نتوری (۲/۵۲) بود، که بیانگر حفظ بهتر ویژگی‌های رنگی در تیمار پلاسمای سرد-لوله و نتوری است.

پارامترهای رنگی، نمونه بدون تیمار بالاترین روشنایی ($L^* = 34.50$) و شدت رنگ زرد ($b^* = 20.20$) را داشت. تیمار حرارتی و پلاسمای سرد به ترتیب L^* را به ۳۱/۲۰ و ۳۲/۷۰ کاهش دادند، که نشان‌دهنده تیره‌تر شدن آب آلبالو است. مقدار a^* (قرمزی) در هر دو تیمار تغییر ناچیزی داشت. مقدار

برای بررسی میزان انطباق شرایط بهینه به دست آمده توسط نرم افزار با شرایط آزمایشگاهی، متغیرهای مستقل با توجه به مقادیر بهینه انتخاب شد و آزمایشات تکرار شد. نتایج نشان داد اختلاف اندک بین مقدار بهینه نظری و مقدار بهینه بدست آمده در آزمایشگاه وجود دارد، که این امر صحت روش بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. جدول (۴) نشان‌دهنده نتایج بدست آمده در آزمایشگاه است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه نوآورانه متشکل از راکتور هیدرودینامیک لوله ونتوری و پلاسمای فاز مایع طراحی و بهینه‌سازی شد که توانست در شرایط بهینه (۱۹/۸۵ کیلو ولت، دبی جریان ۳/۵۲ لیتر بر دقیقه، دمای واکنش ۴۷/۸۲ درجه سلسیوس و زمان ۴/۴۲ دقیقه، باکتری اشرشیاکلی را در نمونه‌های آب آلبالو به اندازه ۶/۱۸ دوره لگاریتمی کاهش دهد. مدل آماری RSM با ضریب تعیین ۰/۹۹ نشان داد که این سامانه از دقت بالایی برخوردار است و متغیرهای زمان و ولتاژ بیشترین نقش را در فرآیند غیرفعال‌سازی داشتند. در بررسی خواص کیفی، کاهش فنول کل، آنتوسیانین، و ویتامین C به ترتیب ۱۶/۱۴٪، ۹۱/۹٪ و ۲۹/۲۵٪ بود که نشان‌دهنده تغییرات بسیار کم و نامحسوس خواص کیفی نمونه‌ها در طی فرآیند پاستوریزاسیون با سامانه ترکیبی پلاسمای فاز مایع-لوله ونتوری بود. همچنین تحلیل شاخص‌های رنگی نیز نشان دادند که در طی این فرآیند نیز تغییر معناداری نداشتند. بنابراین، این سامانه ترکیبی، راهکاری غیرحرارتی، ایمن و مؤثر برای پاستوریزاسیون نوشیدنی‌های حساس ارائه می‌دهد که ضمن حفظ کیفیت، کاهش بار میکروبی مطلوبی ایجاد می‌کند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

اصول اخلاقی

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

جدول ۳- خواص کیفی آب آلبالو بدون تیمار، تیمار شده حرارتی و تیمار شده با سامانه ترکیبی پلاسمای فاز مایع- لوله ونتوری

نمونه‌ها	محتوای فنول		ویتامین C (mg/L)
	کل (mg GAE/100 g)	آنتوسیانین (mg C3/L)	
بدون تیمار	۲۸۳/۷۱	۲۴۱/۲۳	۴۹/۹۴
تیمار شده حرارتی	۲۳۷/۱۱	۲۰۱/۵۷	۱۹/۶۲
تیمار شده سامانه ترکیبی	۲۴۳/۵۱	۲۱۷/۳۲	۲۹/۶۷

جدول ۴- شاخص‌های رنگی آب آلبالو بدون تیمار، تیمار شده حرارتی و تیمار شده با سامانه ترکیبی پلاسمای فاز مایع- لوله ونتوری

نمونه‌ها	شاخص رنگ			
	ΔE	L*	a*	b*
بدون تیمار	-	۳۴/۵۰	۵۱/۶۰	۲۰/۲۰
تیمار شده حرارتی	۳/۸۶	۳۱/۲۰	۴۹/۸۰	۱۹/۳۰
تیمار شده سامانه ترکیبی	۲/۵۲	۳۲/۷۰	۴۹/۸۷	۱۹/۸۱

به‌طور کلی، تیمار پلاسمای سرد با راکتور لوله ونتوری در مقایسه با تیمار حرارتی، تأثیر کمتری بر کیفیت تغذیه‌ای و رنگی آب آلبالو دارد. این فناوری غیرحرارتی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی نوین برای فرآوری آب‌میوه‌ها مورد توجه قرار گیرد، زیرا ترکیبات زیست‌فعال و ویژگی‌های ظاهری را بهتر حفظ می‌کند. با این حال، برای کاربرد صنعتی، بهینه‌سازی شرایط پلازما و مطالعات تکمیلی در مقیاس بزرگ‌تر ضروری است.

بهینه‌سازی آزمایش

هدف از این بهینه‌سازی کاهش میزان اشرشیاکلی موجود در آب آلبالو، توسط راکتور ترکیبی لوله ونتوری- پلاسمای سرد بود. برای این بهینه‌سازی ۴ متغیر مستقل، ولتاژ، دبی جریان، زمان و دمای انجام واکنش بود. که هر کدام تحت یک شرایط مرزی خاص، با سه سطح در این نرم افزار Design Expert تعریف شدند. نتایج این بهینه‌سازی نشان داد در شرایطی که ۱۹/۸۵ کیلو ولت، دبی جریان ۳/۵۲ لیتر بر دقیقه باشد و همچنین واکنش در دمای ۴۷/۸۲ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۴/۴۲ دقیقه انجام گرفته باشد، میزان کاهش اشرشیاکلی در حدود ۶/۱۸- لوگ است و نشان‌دهنده‌ی کاهش شدید این باکتری (۹۹.۹۹٪) در نمونه‌ی شیر تیمار شده است.

حمایت مالی

این کار با حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد انجام شده است.

منابع

- Luksiene, Z. (2021). Photosensitization: Principles and applications in food processing .
- Misra, N., et al. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 39-47 . <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.001>
- Mortari, A., et al. (2014). Recent sensing technologies for pathogen detection in milk: a review. *Biosensors and Bioelectronics*, 60, 8-21 . <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.03.063>
- Pankaj, S., et al. (2013). Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge .*Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 153-157 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.03.001> .
- Samani, B. H., et al. (2013). Effect of ultrasonic waves on pasteurization of sour cherry juice . <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.12.193-200>
- Shabbir, M. A., et al. (2020). Effect of non-thermal processing techniques on pathogenic and spoilage microorganisms of milk and milk products. *Food Science and Technology*, 41(2), 279-294 <https://doi.org/10.1590/fst.05820> .
- Sun, X., et al. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *Science of the Total Environment*, 737, 139606 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>
- Taki ,K., et al. (2023). Combination of oscillatory and hydrodynamic system for biodiesel production from sunflower oil. *Biofuels*, 14(3), 235-242 . <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2130510>
- Taki, K., et al. (2025). Non-thermal inactivation of Escherichia coli in milk using a Venturi tube reactor and liquid-phase plasma: A parametric optimization study. *International Dairy Journal*, 167, 106269 . <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106269>
- Tarabová, B., et al. (2021). Chemical and antimicrobial effects of air non-thermal plasma processing of fresh apple juice with focus on safety aspects. *Foods*. <https://doi.org/10.3390/foods10092055>
- Wang, C.-P., et al. (2021). Efficiency improvement of a flow-through water disinfection reactor using UV-C light emitting diodes. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101819 . <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101819>
- Wang, H., et al. (2007). Modeling of the effect of washing solution flow conditions on Escherichia coli O157: H7 population reduction on fruit surfaces. *Journal of food protection*, 70(11), 2533-2540 . <https://doi.org/10.4315/0362-028X-70.11.2533>
- Abbas, H. M., et al. (2024). Cold plasma technology: a sustainable approach to milk preservation by reducing pathogens and enhancing oxidative stability. *Sustainability*, 16(20), 8754 . <https://doi.org/10.3390/su16208754>
- Abramov, V. O., et al. (2021). Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105323 . <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105323>
- Crudo, D., et al. (2014). Process intensification in food industry: Hydrodynamic and acoustic cavitation for fresh milk treatment. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 25(1), 55-59 .
- Dasan, B. G., et al. (2018). Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of Escherichia coli and physicochemical properties of apple, orange, tomato juices, and sour cherry nectar. *Food and Bioprocess Technology*, 11(2), 334-343 . <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2014-0>
- Finia, B. L., et al. (2024). Innovative application of plasma-activated water in the inactivation of Escherichia coli: Temperature-dependent chemical processes leading to the synergistic microbicidal effect. *Food Control*, 163, 110530 . <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110530>
- Gogate, P. R. (2011). Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 996-1011 . <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
- Hosseini, S. M., et al. (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>
- Jamali-Hafshejani, F., et al. (2025). Design, Construction, and Evaluation of a Combined Atmospheric Cold Plasma-Pulsed Electric Field Spraying System for Pasteurization of Sour Cherry Juice. *Food Science & Nutrition*, 13(6), e70465 . <https://doi.org/10.1002/fsn3.70465>
- Li, H., et al. (2021). Plasma induced efficient removal of antibiotic-resistant Escherichia coli and antibiotic resistance genes, and inhibition of gene transfer by conjugation. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126465 . <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126465>