تحقیقات مهندسی صنایع غذایی/جلد ۲۵ / شماره ۸۰/ بهار و تابستان/۱۴۰۵/ ص ۶۳-۸۲

سایت مجله: https://fooder.areeo.ac.ir

نوع مقاله:مروری

کاربرد پلاسمای سرد در کنترل فرآیندهای فیزیولوژیکی و افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار

نادره تبریزی[1*] و شهین زمردی[2]

[1*]بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران .

[2]دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

چکیده

میوه‌های هسته‌دار مانند هلو، شلیل، زردآلو، آلو و گیلاس به دلیل ارزش غذایی و اقتصادی بالا، بازارپسندی گسترده و نقش مهم در امنیت غذایی جایگاهی ویژه در اقتصاد کشاورزی دارند. با این حال، این محصولات با چالش اساسی ماندگاری کوتاه‌مدت و فسادپذیری بالا در زنجیرهٔ پس از برداشت مواجه هستند. در سال‌های اخیر، پلاسمای سرد اتمسفری (CAP) به‌عنوان فناوری نوظهور و غیرحرارتی، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است. این فناوری علاوه بر توانایی شناخته‌شده در استریلیزاسیون سطحی و مهار پاتوژن‌ها در دمای پایین، می‌تواند به‌عنوان استرس‌زای غیرزیستی با مسیرهای فیزیولوژیک و متابولیک میوه‌ها برهمکنش داشته باشد. شواهد نشان می‌دهد که CAP می‌تواند فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند پلی‌فنل اکسیدازها و پراکسیدازها را تعدیل کند، متابولیسم ترکیبات فنلی را تحت تأثیر قرار دهد و تنظیم هورمون‌های رسیدگی، مانند اتیلن و اسید آبسزیک را تغییر دهد. این اثرها در نهایت منجر به تأخیر در نرم شدن بافت، تقویت پاسخ‌های دفاعی و بهبود کیفیت تغذیه‌ای می‌شود. این مقالهٔ مروری، با تمرکز بر واکنش‌های مولکولی و بیوشیمیایی میوه‌های هسته‌دار، چالش‌های کلیدی از جمله وابستگی به گونه و دوز مصرفی، محدودیت‌های مقیاس‌پذیری، ابهام‌های مقرراتی و شکاف‌های دانشی را در حوزهٔ ویژگی‌های حسی و پذیرش مصرف‌کننده بررسی می‌کند. علاوه بر این، در بارهٔ پتانسیل هم‌افزایی CAP با فناوری‌های ترکیبی مانند پوشش‌های خوراکی، بسته‌بندی فعال و اتمسفر کنترل‌شده بحث می‌شود و چشم‌انداز آینده‌ای ترسیم می‌گردد که در آن پلاسمای سرد نه صرفاً به‌عنوان ابزاری ضد میکروبی، بلکه راهکاری نوین و هوشمند برای مهندسی پس‌برداشت در راستای توسعهٔ پایدار ماندگاری و قابلیت فروش میوه‌های هسته‌دار مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای سرد اتمسفری، فیزیولوژی پس از برداشت، کیفیت میوه، ماندگاری، میوه‌های هسته‌دار

مقدمه

امنیت غذایی در قرن بیست‌ویکم به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین چالش‌های بشریت مطرح است. پیش‌بینی می‌شود جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ از ۹ میلیارد نفر عبور کند و در نتیجه تقاضا برای محصولات تازه و سالم به‌طور بی‌سابقه‌ای افزایش یابد (FAO, 2021). هم‌زمان، محدودیت منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی و افزایش ضایعات مواد غذایی فشار مضاعفی بر سیستم‌های تولید و توزیع وارد می‌سازد. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، نزدیک به ۴۵ درصد میوه‌ها و سبزی‌های تولیدی در جهان به‌دلیل فساد میکروبی، تغییرات فیزیولوژیک و ناکارآمدی زنجیرهٔ سرد در مراحل پس از برداشت از بین می‌رود (Kummu *et al.*, 2012). این اتلاف نه‌تنها منجر به هدررفت منابع اقتصادی می‌شود بلکه سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرهای منفی زیست‌محیطی دارد.

در میان محصولات باغی، میوه‌های هسته‌دار شامل هلو،

نگارنده مسئول: **Email :** nadereh_tabrizi84@yahoo.com

http://doi: 10.22092/fooder.2026.370471.1430

© 2026,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

شلیل، زردآلو، آلو و گیلاس اهمیت ویژه‌ای دارند. این گروه از میوه‌ها به دلیل دارا بودن ترکیبات فنلی، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و فیبرهای رژیمی ارزش غذایی و دارویی بالایی دارند (Vinholes *et al*., 2016). مصرف منظم میوه‌های هسته‌دار با کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی‌عروقی، دیابت نوع ۲ و برخی سرطان‌ها همراه است (Lara *et al*., 2020). علاوه بر مصرف تازه، این میوه‌ها در صنایع فرآوری مانند کنسروسازی، آبمیوه‌گیری، مرباسازی و تولید خشکبار مواد اولیه کلیدی هستند. با وجود اهمیت بالای تغذیه‌ای و اقتصادی، میوه‌های هسته‌دار با چالش جدی ماندگاری کوتاه پس از برداشت مواجه‌اند. میزان تنفس و تولید اتیلن این میوه‌ها بالاست که سبب تسریع رسیدگی و در نهایت نرم‌شدگی بیش‌ازحد و فساد می‌شود. از سوی دیگر، حساسیت بالای آنها به بیماری‌های قارچی، به‌ویژه *Monilinia fructicola* (عامل پوسیدگی قهوه‌ای) و *Botrytis cinerea* (عامل کپک خاکستری) منجر به کاهش شدید کیفیت در زنجیره توزیع می‌شود (Brecht *et al*., 2023). برای مثال، هلو در شرایط دمای محیط بیش از ۴ تا ۷ روز قابل نگهداری نیست و حتی در سردخانه نیز در معرض عارضه‌هایی مانند آسیب سرمایی و قهوه‌ای شدن داخلی قرار دارد. چنین محدودیت‌هایی موانعی جدی برای صادرات و تأمین بازارهای دوردست ایجاد می‌کند. به‌منظور افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار، تاکنون فناوری‌های گوناگونی به‌کار رفته است شامل نگهداری سردخانه‌ای، کنترل اتمسفری، بسته‌بندی اصلاح‌شده، پوشش‌های خوراکی و کاربرد مواد ضدقارچ شیمیایی. هرچند این فناوری‌ها تا حدی اثربخش بوده‌اند، اما محدودیت‌هایی نیز دارند و نگرانی‌های جدی نیز به آنها وارد است. استفادهٔ طولانی‌مدت از مواد شیمیایی موجب بروز مقاومت قارچی و ایجاد مخاطرات ایمنی برای مصرف‌کننده می‌شود (Droby & Wisniewski, 2019).

از طرف دیگر، فناوری‌های گرمایی سنتی می‌توانند موجب کاهش کیفیت حسی و تخریب ترکیبات زیست‌فعال حساس به دمای بالا مانند ویتامین C و آنتوسیانین‌ها شوند (Khojasteh *et al*., 2025). در نتیجه، نیاز فوری به فناوری‌های نوین، ایمن، غیرگرمایی و دوستدار محیط زیست احساس می‌شود. در دههٔ گذشته، فناوری‌های غیرگرمایی مانند پرتو فرابنفش، میدان الکتریکی پالسی، فشار هیدروستاتیک بالا و پلاسمای سرد (CP)[1] به‌عنوان گزینه‌هایی نویدبخش برای افزایش ماندگاری محصولات تازه مطرح شده‌اند (Safwa *et al*., 2024). در میان این فناوری‌ها، پلاسمای سرد به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود جایگاه ویژه‌ای یافته است. پلاسمای سرد، مخلوطی از یون‌ها، الکترون‌ها، فوتون‌های پرانرژی و گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن است که در دمای محیط تولید می‌شود. این ویژگی موجب می‌گردد تا CP بتواند میکروارگانیسم‌ها را غیرفعال کند بی‌آنکه دمای محصول افزایش یابد و کیفیت بافتی یا تغذیه‌ای آن دچار آسیب شود (Harikrishna *et al*., 2023).

تا چند سال پیش، نگاه پژوهشگران به پلاسمای سرد عمدتاً در سطح یک فناوری استریلیزاسیون سطحی خلاصه می‌شد. اما مطالعات اخیر افق‌های تازه‌ای را در این حوزه گشوده‌اند. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که CP می‌تواند علاوه بر کاهش بار میکروبی، بر مسیرهای فیزیولوژیک میوه اثر گذارد و فرایند رسیدگی، قهوه‌ای شدن و تخریب ترکیبات زیست‌فعال را کنترل کند. برای مثال، تیمار CP در هلو سبب کاهش فعالیت آنزیم‌های قهوه‌ای کننده و تأخیر در نرم‌شدگی می‌شود. ترکیب پلاسمای سرد با پوشش‌های خوراکی زیست‌تخریب‌پذیر اثر هم‌افزایی در حفظ کیفیت زردآلو نشان داده است. افزون بر این، چین و همکاران (Chen *et al*., 2024) در مطالعه‌ای نوین نشان دادند که گونه‌های فعال تولیدشده توسط CP قادرند مسیرهای سیگنالینگ دفاعی گیاه را تحریک کنند و به این ترتیب،

[1] Cold Plasma

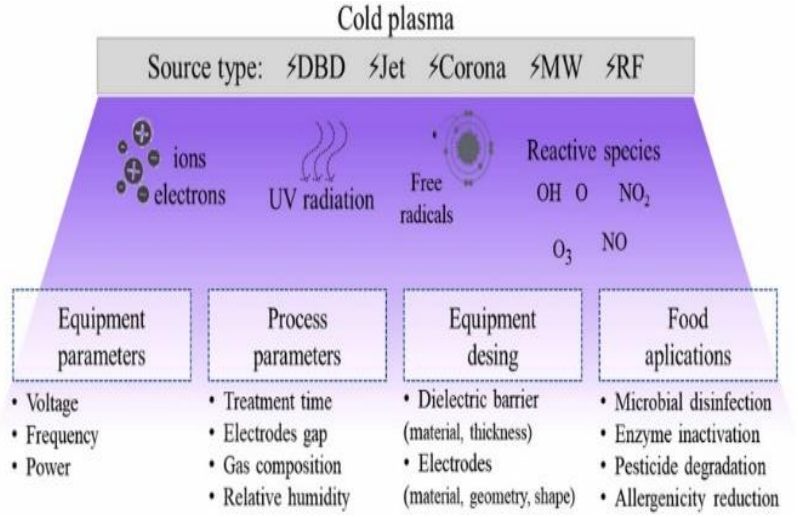
مقاومت ذاتی میوه در برابر آلودگی قارچی افزایش یابد. با وجود این پیشرفت‌ها، شکاف‌های دانشی متعددی همچنان وجود دارد. از جمله: استانداردنشدن شدت و مدت زمان تیمار CP، کمبود داده‌های طولانی‌مدت در بارهٔ اثر CP بر کیفیت حسی، محدودیت مطالعات در مقیاس صنعتی و نبود پژوهش‌های کافی دربارهٔ ترکیب پلاسما با دیگر فناوری‌های سبز. این شکاف‌ها نشان می‌دهد برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل پلاسما در صنعت میوه‌های هسته‌دار، نیاز به تحقیقات گسترده‌تر و یکپارچه وجود دارد (Zhang & Cheng, 2024).

هدف این مقالهٔ مروری، ارائهٔ تحلیلی جامع و انتقادی از پژوهش‌های یک دههٔ گذشته در بارهٔ کاربرد پلاسمای سرد در افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار است. در این مرور، نه‌تنها مکانیزم‌های اثر CP بر میکروارگانیسم‌ها و فیزیولوژی میوه بررسی می‌شود، بلکه مطالعات موردی روی گونه‌های مختلف میوه‌های هسته‌دار تحلیل می‌شود و شکاف‌های دانشی و مسیرهای آینده پژوهش ترسیم خواهد شد.

مبانی علمی پلاسمای سرد و مکانیزم‌های اثر آن بر میوه‌های هسته‌دار

پلاسمای سرد: ماهیت فیزیکی و شیمیایی

پلاسمای سرد از گاز یونیزه‌شده‌ای تشکیل شده که دمای کلی آن (معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس) باقی می‌ماند. این ویژگی کلیدی، پلاسمای سرد را برای کاربردهای حساس به دمای بالا مانند ضدعفونی کردن مواد غذایی و تجهیزات پزشکی، ایده‌آل می‌سازد (شکل ۱) (Laroque *et al.*, 2022).



شکل ۱- مکانیزم پلاسمای سرد (Laroque *et al.*, 2022).

Fig 1 - Cold plasma mechanism (Laroque *et al.*, 2022)

پلاسما، اغلب به‌عنوان حالت چهارم ماده توصیف می‌شود و حاصل برهم‌کنش انرژی الکتریکی یا الکترومغناطیسی با یک گاز است که منجر به یونیزاسیون و تشکیل محیطی حاوی ذرات باردار (الکترون‌ها و یون‌ها)، فوتون‌ها، گونه‌های فعال اکسیژن و گونه‌های فعال نیتروژن می‌شود (Graves, 2014). زمانی که این فرآیند در دماهای نزدیک به دمای محیط طی شود، به آن پلاسمای سرد اطلاق می‌شود. این ویژگی، CP را از روش‌های گرمایی سنتی متمایز می‌کند و امکان کاربرد آن را در مواد غذایی حساس به دمای بالا فراهم می‌آورد. روش‌های مختلفی برای تولید پلاسما وجود دارد که رایج‌ترین آن‌ها شامل تخلیهٔ سد دی‌الکتریک، جت پلاسمای اتمسفری و تخلیهٔ میکروویو است. هر یک از این فناوری‌ها، بسته به نوع گاز مورد استفاده (هوا، آرگون، هِلیُم، نیتروژن و اکسیژن) و پارامترهای عملیاتی (فرکانس، توان، ولتاژ و مدت زمان) گونه‌های فعال متفاوتی تولید می‌کنند و این موضوع در غیرفعال‌سازی میکروبی و تغییرات

فیزیولوژیکی میوه تأثیری مستقیم بر کارایی پلاسما دارد (Harikrishna *et al.*, 2023).

مکانیزم‌های غیرفعال‌سازی میکروبی توسط CP

مکانیزم تولید پلاسمای سرد به این صورت است که یک گاز خنثی (مانند هِلیم، آرگون، نیتروژن یا حتی هوا) در میدان الکتریکی قوی قرار می‌گیرد (شکل۲). این میدان الکتریکی به الکترون‌های آزاد انرژی می‌دهد و آن‌ها را شتاب می‌بخشد. این الکترون‌های پرانرژی با اتم‌ها و مولکول‌های خنثی گاز برخورد می‌کنند و موجب یونیزاسیون آن‌ها می‌شوند. در این فرایند الکترون‌ها به دمای بسیار بالایی می‌رسند (گاهی بیش از ۱۰۰۰۰ درجه کلوین). یون‌ها و ذرات خنثی، به دلیل جرم بسیار بالایشان، دمای پایین نزدیک به دمای محیط را حفظ می‌کنند. این اختلاف دما بین الکترون‌ها و ذرات سنگین‌تر، ویژگی اصلی پلاسمای سرد یا غیرتعادلی است. در نتیجهٔ این فرایند، مجموعه‌ای از گونه‌های فعال تولید می‌شود که مسئول اصلی خواص بیوسیدال (میکروب‌کشی) پلاسما هستند (Ramezan *et al.*, 2024; Tabares & Junkar, 2021). این گونه‌ها شامل گونه‌های اکسیژن فعال (ROS)[۲] مانند ازن(O_3) ، رادیکال هیدروکسیل (•OH)، اکسیژن اتمی (O) و یون سوپراکسید (O_2^-)، گونه‌های نیتروژن فعال (RNS)[۳]: مانند اکسید نیتریک (NO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و دیگر رادیکال‌ها، پرتو یونیزاسیون گاز تولید می‌شود و همچنین یون‌های باردار و میدان‌های الکتریکی محلی هستند.

اثر ضدمیکروبی پلاسمای سرد نتیجهٔ حمله‌ای چندجانبه و هم‌زمان به سلول میکروبی است که توسط گونه‌های فعال تولید شده صورت می‌پذیرد. این مکانیزم‌ها مقاومت میکروبی را بسیار دشوار می‌سازند. در ادامه جزئیات این فرایندها آمده است.

الف) تخریب غشای سلولی: این مکانیزم اصلی‌ترین و سریع‌ترین راه برای از بین بردن میکروارگانیسم‌هاست.

گونه‌های اکسیژن فعال، به ویژه رادیکال هیدروکسیل (•OH) و ازن (O_3)، بسیار واکنش‌پذیر هستند. این گونه‌ها به اسیدهای چرب غیراشباع در غشای لیپیدی سلول میکروبی حمله می‌کنند و موجب پراکسیداسیون لیپیدها می‌شوند. این فرایند ساختار غشا را تخریب می‌کند، سیال بودن آن را از بین می‌برد و منجر به نشت محتویات درون سلولی به بیرون و در نهایت مرگ سلول می‌شود (Kim & Chung, 2016).

گونه‌های نیتروژن فعال مانند NO و NO_2 می‌توانند با پروتئین‌های حیاتی موجود در غشای سلولی واکنش دهند و ساختار آن‌ها را تغییر دهند. این امر عملکرد کانال‌های یونی و پمپ‌های پروتئینی را مختل می‌کند و تعادل اسمزی سلول را بر هم می‌زند.

ب) آسیب‌زدن به اجزای داخلی سلول

اگر میکروارگانیسم بتواند در برابر آسیب اولیه به غشا مقاومت کند، گونه‌های فعال کوچک‌تر می‌توانند به داخل سیتوپلاسم میکروارگانیسم نفوذ کرده و اجزای حیاتی داخلی را هدف قرار دهند.

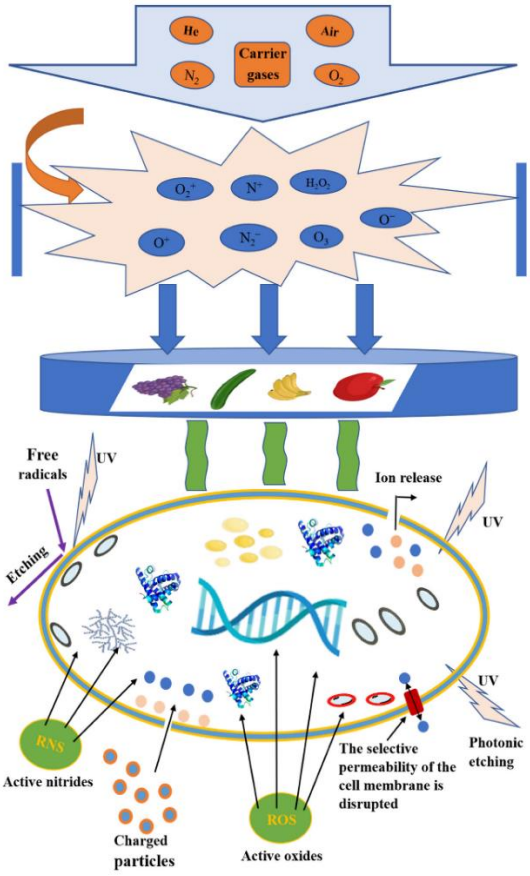
پرتو فرابنفش (UV) تولید شده در پلاسما، به ویژه در محدودهٔ UV-C، می‌تواند به‌طور مستقیم توسط اسیدهای نوکلئیک (DNA و RNA) جذب شود. این انرژی موجب ایجاد دایمرهای پیریمیدین (به خصوص تیمین) می‌شود و از همانندسازی و رونویسی صحیح DNA جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، برخی از گونه‌های فعال (ROS/RNS) نیز می‌توانند به بازهای نوکلئوتیدی قندهای موجود در ساختار DNA آسیب اکسیداتیو وارد کنند(Kim & Chung, 2016).

تخریب آنزیم‌ها و پروتئین‌ها: گونه‌های فعال پس از ورود به سیتوپلاسم می‌توانند پروتئین‌ها و آنزیم‌های حیاتی را اکسید کنند و ساختار سه‌بعدی آن‌ها را تغییر دهند (واسرشت شدن یا دناتوره شدن). این امر منجر به غیرفعال شدن مسیرهای متابولیک ضروری برای بقای سلول می‌شود. مطالعات

[2] Reactive Oxygen

[3] Nitrogen Species

مختلف اثربخشی این تکنولوژی را تأیید کرده‌اند. حساسیت بالای قارچ‌هایی مانند *Monilinia fructicola* و *Botrytis cinerea* به تیمار پلاسمای سرد نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالای این فناوری در کشاورزی و صنایع غذایی برای افزایش ماندگاری محصولات و کاهش ضایعات است.



شکل ۲- مکانیسم غیرفعال‌سازی میکروبی توسط پلاسمای سرد از طریق گونه‌های فعال (ROS/RNS)، تابش UV و اختلال در غشای سلولی (Zhang *et al.*, 2022).

Fig 2- Mechanism of microbial inactivation by cold plasma through reactive species (ROS/RNS), UV radiation, and cell membrane disruption (Zhang *et al.*, 2022).

اثرهای CP بر فیزیولوژی و بیوشیمی میوه‌ها

اثرگذاری این فناوری صرفاً به غیرفعال‌سازی میکروبی در سطح محصول محدود نمی‌شود، بلکه به عنوان محرک زیستی[4] عمل می‌کند و پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پیچیده‌ای را در بافت گیاهی القا خواهد کرد. این ویژگی، CP را به ابزاری برای بهبود هم‌زمان ایمنی و کیفیت ذاتی محصول تبدیل کرده است که آن را از روش‌های نگهداری سنتی متمایز می‌کند (Misra *et al.*, 2019; Yawut *et al.*, 2024). یکی از کلیدی‌ترین مکانیزم‌های تأثیر CP بر میوه‌ها، پدیدهٔ هورمسیس است. در این فرآیند، اعمال یک دوز کنترل‌شده از استرس اکسیداتیو، که توسط گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (ROS/RNS) تولید شده در پلاسما ایجاد می‌شود، به جای ایجاد آسیب، سیستم دفاعی درون‌زای گیاه را فعال می‌کند (Misra *et al.*, 2019; Perera *et al.*, 2022). این گونه‌های فعال به عنوان مولکول‌های پیام رسان سلولی عمل می‌کنند و آبشاری از

[4] Biostimulant

واکنش‌های متابولیکی را آغاز خواهند کرد. تحقیقات نشان داده است که این سیگنال‌ها می‌توانند به فعال‌سازی مسیر فنیل‌پروپانوئید منجر شوند که شاهراه اصلی سنتز متابولیت‌های ثانویه دفاعی در گیاهان است. این فعال‌سازی به افزایش بیان ژن‌ها و فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند فنیل‌آلانین آمونیالیاز (PAL) و کالکون سنتاز (CHS) می‌انجامد. نتیجهٔ بیوشیمیایی این فرآیند، افزایش تجمع ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و محافظتی مانند ترکیبات فنلی، فلاوونوئیدها و آنتوسیانین‌ها است. این ترکیبات نه تنها ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و ارزش تغذیه‌ای میوه را بهبود می‌بخشند، بلکه مقاومت آن را در برابر پاتوژن‌های پس از برداشت نیز تقویت می‌کنند. برای مثال، مطالعه روی زغال‌اخته نشان داد که تیمار CP با فعال‌سازی ژن‌های مسیر فنیل‌پروپانوئید به طور قابل توجهی مقدار آنتوسیانین و عمر انبارداری محصول را افزایش می‌دهد (Zhou *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024).

کنترل رسیدگی و نرم‌شدگی

کنترل فرآیند رسیدن و پیری برای افزایش ماندگاری میوه‌ها حیاتی است. پلاسمای سرد از دو طریق اصلی این فرآیندها را تعدیل می‌کند:

مهار بیوسنتز اتیلن: اتیلن، هورمون اصلی تنظیم‌کننده رسیدن در میوه‌های فرازگرا[5] است. گونه‌های فعال، به‌ویژه ROS، می‌توانند پیش‌ساز کلیدی اتیلن، یعنی ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid)، را اکسید و از تبدیل آن به اتیلن جلوگیری کنند. این مداخلهٔ مستقیم، سرعت فرآیند رسیدن را کاهش می‌دهد (Jia *et al.*, 2022).

حفظ یکپارچگی دیوارهٔ سلولی: نرم شدن بافت میوه ناشی از فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده دیوارهٔ سلولی، مانند پلی‌گالاکتوروناز[6] (PG) و پکتین متیل‌استراز (PME)[7]، است. تیمار CP می‌تواند فعالیت این آنزیم‌ها را مهار کند و به حفظ ساختار پکتینی و سفتی بافت میوه یاری رساند. پژوهش روی توت‌فرنگی‌های تازه‌برش‌خورده نشان داد که تیمار پلاسما با فعال کردن مسیرهای متابولیکی مرتبط با تقویت دیوارهٔ سلولی، به‌طور مؤثری سفتی بافت را در دورهٔ نگهداری حفظ می‌کند (Zhang & Cheng, 2024). نرم‌شدگی میوه‌های هسته‌دار عمدتاً ناشی از تجزیهٔ پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی (پکتین، همی‌سلولز و سلولز) توسط آنزیم‌هایی مانند PG و PMEاست. شواهد نشان می‌دهد که پلاسما می‌تواند فعالیت این آنزیم‌ها را کاهش دهد و در نتیجه روند نرم‌شدگی را کُند کند. برای نمونه، لی و همکاران (Li *et al.*, 2019) گزارش کردند که تیمار پلاسمای سرد بر آلو سبب کاهش معنی‌دار فعالیت PG و حفظ سفتی بافت تا ۱۰ روز نگهداری می‌شود.

کاهش قهوه‌ای‌شدگی آنزیمی در میوه‌ها توسط پلاسمای سرد: مکانیزم‌های مستقیم و غیرمستقیم

قهوه‌ای‌شدگی آنزیمی یکی از اصلی‌ترین دلایل افت کیفیت و کاهش بازارپسندی در بسیاری از میوه‌ها، به‌ویژه میوه‌های هسته‌دار مانند هلو و زردآلو پس از برداشت یا در حین فرآوری (مانند برش‌زدن) است. این پدیدهٔ نامطلوب عمدتاً بر اثر آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) کاتالیز می‌شود. این آنزیم در حضور اکسیژن، ترکیبات فنلی طبیعی موجود در میوه را به اُ-کینون‌ها (o-quinones) اکسید می‌کند که این کینون‌ها به سرعت پلیمریزه می‌شوند و رنگدانه‌های قهوه‌ای یا سیاه تولید می‌کنند. فناوری پلاسمای سرد (CP) از طریق چندین مکانیزم پیچیده و هم‌افزا، به طور مؤثری این فرآیند را مهار می‌کند. این مکانیزم‌ها عبارت‌اند از:

تأثیر مستقیم بر آنزیم پلی‌فنل اکسیداز (PPO)

گونه‌های فعال بسیار واکنش‌پذیر (ROS/RNS) که به‌واسطهٔ پلاسما تولید می‌شوند، می‌توانند به‌طور مستقیم با مولکول آنزیم PPO برهم‌کنش دهند و آن را غیرفعال کنند. این فرآیند از دو طریق اصلی رخ می‌دهد:

[5] Climacteric
[6] Polygalacturonase
[7] Pectin Methylesterase

۱-اکسیداسیون جایگاه فعال آنزیم: جایگاه فعال آنزیم PPO حاوی یون‌های مس (Cu^{+2}) است که برای فعالیت کاتالیتیکی آن ضروری هستند. گونه‌های فعال، به‌ویژه رادیکال‌های هیدروکسیل (•OH) و پراکسی نیتریت (-ONOO) می‌توانند اسیدهای آمینه کلیدی در این جایگاه (مانند هیستیدین) را اکسید کنند یا با یون‌های مس واکنش دهند. این تغییرات شیمیایی ساختار جایگاه فعال را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که سوبستراهای فنلی دیگر نمی‌توانند به درستی به آن متصل شوند و در نتیجه فعالیت آنزیمی به شدت کاهش می‌یابد (Huang, *et al*., 2025).

۲-تغییر ساختار سه‌بعدی (کونفورماسیون) آنزیم: پروتئین‌ها برای عملکرد صحیح خود به یک ساختار سه‌بعدی دقیق و پیچیده نیاز دارند. گونه‌های فعال پلاسما می‌توانند پیوندهای دی‌سولفیدی را بشکنند یا موجب اکسیداسیون زنجیره‌های جانبی اسیدهای آمینه در سراسر ساختار پروتئین شوند. این تغییرات منجر به باز شدن تاخوردگی‌های پروتئین[8] و تغییر در ساختار دوم و سوم آن می‌شود. در پژوهشی نشان داده شد که با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی مانند دورنگ‌نمایی دورانی[9]، این تغییرات کونفورماسیونی، ساختار کلی آنزیم PPO را به هم می‌ریزد و آن را به طور غیرقابل بازگشتی غیرفعال می‌کند (Laika *et al*., 2024).

تأثیر غیرمستقیم از طریق تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی میوه

علاوه بر هدف قرار دادن مستقیم آنزیم PPO، پلاسمای سرد می‌تواند با تقویت سیستم دفاعی طبیعی خود میوه به‌طور غیرمستقیم از قهوه‌ای‌شدگی جلوگیری کند.

همانطوری‌که پیش‌تر بحث شد، CP از طریق پدیدهٔ هورمسیس مسیرهای متابولیکی ثانویه گیاه را تحریک می‌کند. این امر منجر به افزایش سنتز و تجمع ترکیباتی مانند اسید آسکوربیک (ویتامین C)، گلوتاتیون و ترکیبات فنلی خاص می‌شود. این مولکول‌ها به دو روش عمل می‌کنند:

۱-عوامل کاهنده: آنتی‌اکسیدان‌ها می‌توانند اُ-کینون‌های تولید شده توسط PPO را مجدداً به ترکیبات فنلی بی‌رنگ بکاهند (احیا کنند) و از پلیمریزاسیون آن‌ها و تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای جلوگیری کنند.

۲-مهارکننده‌های طبیعی آنزیم PPO: برخی از ترکیبات فنلی که در پاسخ به تیمار پلاسما تولید می‌شوند می‌توانند به عنوان مهارکننده‌های رقابتی یا غیررقابتی برای خود آنزیم PPO عمل کنند. این مکانیزم دفاعی تقویت‌شده در مطالعه‌ای به تفصیل بررسی شده است. نتایج نشان داد تیمار پلاسما روی هلوهای برش‌خورده نه تنها فعالیت PPO را کاهش می‌دهد بلکه با افزایش قابل توجه مقدار اسید آسکوربیک و ترکیبات فنلی، یک سد بیوشیمیایی مؤثر در برابر فرآیند قهوه‌ای‌شدگی ایجاد می‌کند (He *et al*., 2025). بنابراین، پلاسمای سرد با رویکرد دوگانه حملهٔ مستقیم به آنزیم PPO و تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی میوه به‌طور مؤثری از قهوه‌ای‌شدگی آنزیمی جلوگیری کرده به حفظ کیفیت ظاهری و ارزش تغذیه‌ای محصول کمک شایانی می‌کند.

تحریک پاسخ‌های دفاعی ذاتی

یکی از یافته‌های نوین و بسیار مهم در مطالعات اخیر آن است که پلاسماهای سرد نه تنها تأثیر مستقیم بر غیرفعال‌سازی و نابودی میکروارگانیسم‌ها دارند، بلکه نقشی کلیدی در فعال‌سازی سیستم ایمنی ذاتی میوه‌ها ایفا می‌کنند. در واقع، ترکیبات فعال تولیدشده در اثر اعمال پلاسماهای سرد به‌عنوان سیگنال‌های شبه‌هورمونی عمل می‌کنند و می‌توانند مسیرهای پیچیدهٔ دفاعی گیاه را تحریک کنند. از مهم‌ترین این مسیرها، مسیرهای وابسته به اسیدهای سالیسیلیک و جاسمونیک هستند که نقش محوری در القای مقاومت در برابر تنش‌های زیستی دارند (Kumar *et al*., 2024). فعال‌سازی این مسیرها منجر به افزایش بیان ژن‌هایی می‌شود که در بیوسنتز ترکیبات ضدقارچی و

[8] Unfolding

[9] Circular Dichroism

متابولیت‌های ثانویه دخیل‌اند. این ترکیبات شامل فیتوالکسین‌ها، آنزیم‌های بازدارندهٔ رشد قارچ و پروتئین‌های مرتبط با پاسخ دفاعی هستند که در مجموع مقاومت میوه را در برابر عوامل بیماری‌زا تقویت می‌کنند (Liu, *et al.*, 2025; Fan *et al.*, 2025).

حفظ کیفیت تغذیه‌ای و حسی

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در به‌کارگیری فناوری‌های نوین فرآوری مواد غذایی، حفظ کیفیت تغذیه‌ای و ویژگی‌های حسی محصولات است. کیفیت تغذیه‌ای شامل حفظ ترکیبات زیست‌فعال مانند ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات فنلی می‌شود که نقش مهمی در سلامت انسان دارند. از سوی دیگر، ویژگی‌های حسی مانند رنگ، طعم، عطر و بافت نیز مستقیماً بر پذیرش محصول توسط مصرف‌کننده اثر می‌گذارند (Misra *et al.*, 2016). بر اساس مطالعات اخیر، فناوری پلاسمای سرد اگر در دوز و شرایط بهینه به کار رود، نه تنها کیفیت تغذیه‌ای را نمی‌کاهد، بلکه در برخی موارد حتی موجب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی میوه‌ها و سبزی‌ها نیز می‌گردد. دلیل این موضوع به فعال شدن برخی ترکیبات زیست‌فعال در اثر برخورد با گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن در پلاسما بازمی‌گردد (Yu *et al.*, 2022). برای مثال، در پژوهش‌هایی روی میوه‌ها نشان داده شده است که تیمار با پلاسما می‌تواند غلظت پلی‌فنل‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی را بهبود بخشد. این امر مزیتی مهم در مقایسه با روش‌های سنتی نگهداری است (Ramezan *et al.*, 2015). با این حال، اگر شدت یا زمان تیمار پلاسما بیش از حد باشد می‌تواند اثرهای معکوسی ایجاد کند. برخی گزارش‌ها نشان داده‌اند که اعمال بیش از حد CP می‌تواند منجر به تغییرات ناخواسته در رنگ، تولید طعم‌های ناخوشایند یا حتی آسیب‌دیدگی بافتی در محصولات تازه شود. بنابراین، تعیین دوز بهینه و تنظیم دقیق پارامترهای عملیاتی برای هر نوع میوه یا سبزی ضروری است تا هم کیفیت تغذیه‌ای و هم ویژگی‌های حسی در بالاترین سطح ممکن حفظ شود.

تأثیر پارامترهای عملیاتی بر کارایی CP

کارایی فناوری پلاسمای سرد به شدت تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی قرار دارد و تنظیم دقیق این عوامل شرط اصلی دستیابی به نتایج مطلوب در فرآوری محصولات تازه است. یکی از مهم‌ترین این پارامترها نوع گاز تغذیه‌ای مورد استفاده در تولید پلاسماست. گازهای بی‌اثر مانند آرگون یا نیتروژن اغلب برای ایجاد پلاسمای پایدار با حداقل اثرهای اکسیداتیو به کار می‌روند و بنابراین برای محصولاتی که حساسیت بالایی به اکسیداسیون دارند مناسب‌ترند. در مقابل، گازهایی مانند اکسیژن یا هوای محیط موجب تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن بیشتری می‌شوند که فعالیت ضدمیکروبی بسیار بالاتری دارند، اما این امر می‌تواند خطر تخریب ترکیبات حساس یا تغییرات نامطلوب را در ویژگی‌های حسی میوه نیز به همراه داشته باشد (Ranjan *et al.*, 2023). علاوه بر نوع گاز، مدت زمان تیمار نیز نقش حیاتی دارد. تیمار کوتاه ممکن است به اندازهٔ کافی برای کاهش بار میکروبی یا افزایش پایداری محصول مؤثر نباشد، در حالی که تیمار بیش از حد طولانی می‌تواند منجر به آسیب بافتی، کاهش سفتی بافت و تغییر رنگ در میوه شود. یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که حتی اختلاف‌های جزئی در زمان تیمار می‌توانند تفاوت‌های قابل توجهی در کیفیت نهایی محصول ایجاد کنند (Farooq *et al.*, 2023). توان و ولتاژ اعمال‌شده نیز از دیگر پارامترهای کلیدی هستند. افزایش توان منجر به تولید گونه‌های فعال بیشتر می‌شود که می‌تواند موجب بهبود اثر ضدمیکروبی و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شود. با این حال، این افزایش توان ممکن است موجب ایجاد حرارت موضعی و در نتیجه بروز استرس اکسیداتیو و تغییرات ناخواسته در ترکیبات زیست‌فعال شود. بنابراین، یافتن تعادل بین شدت پلاسما و پایداری کیفیت محصول ضروری است (Li *et al.*, 2025). عامل دیگری که نباید نادیده گرفته شود فاصلهٔ الکترود از سطح میوه است. هرچه فاصله کمتر باشد، انرژی پلاسما با شدت بیشتری به

سطح محصول منتقل می‌شود که می‌تواند اثر ضدمیکروبی بالاتری ایجاد کند، اما در عین حال خطر آسیب رساندن به ساختار بافتی نیز افزایش می‌یابد. رطوبت محیطی نیز نقش مهمی در انتقال انرژی و تشکیل گونه‌های فعال دارد. محیط‌های مرطوب‌تر معمولاً تولید گونه‌های واکنش‌پذیر بیشتری را تسهیل می‌کنند و این موضوع می‌تواند اثربخشی فرآیند را افزایش دهد، اما احتمال تغییرات ناخواسته در ویژگی‌های حسی محصول نیز بیشتر می‌شود (Harikrishna *et al*., 2023; Wu *et al*., 2023).

ترکیب CP با فناوری‌های مکمل

یکی از رویکردهای پرکاربرد، ترکیب CP با پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر مانند کیتوزان است. پوشش‌های کیتوزانی به‌خودی‌خود قادر به ایجاد لایه‌ای محافظتی روی سطح میوه هستند که از تبخیر رطوبت و نفوذ میکروارگانیسم‌ها جلوگیری می‌کند. هنگامی که این پوشش‌ها با تیمار CP همراه می‌شوند، پایداری میوه به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد زیرا پلاسما نه تنها بار میکروبی اولیه را کاهش می‌دهد، بلکه خواص ضدقارچی کیتوزان را نیز تقویت می‌کند. برای نمونه، پژوهشی در سال ۲۰۲۴ نشان داد که استفادهٔ همزمان از پلاسما و پوشش کیتوزان، توانست رشد قارچ *Monilinia fructicola* روی شلیل را به حداقل رساند و ماندگاری آن را تا بیش از دو هفته افزایش دهد (Akhavan-Mahdavi *et al*., 2023). علاوه بر پوشش‌های خوراکی، ترکیب CP با فناوری نگهداری در اتمسفر کنترل‌شده نیز مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری از طریق تنظیم غلظت گازهای اصلی مانند اکسیژن و دی‌اکسید کربن، سرعت متابولیسم و فرآیندهای تنفسی میوه را کاهش می‌دهد. زمانی که CP پیش از نگهداری به کار گرفته می‌شود، بار میکروبی سطح میوه به حداقل می‌رسد و در نتیجه اتمسفر کنترل‌شده می‌تواند کیفیت محصول را برای مدتی طولانی‌تر حفظ کند. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ نشان داد که ترکیب این دو فناوری می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای و ویژگی‌های حسی هلو را تا ۲۱ روز بدون تغییر قابل توجه حفظ کند، در حالی که استفادهٔ جداگانه از هر یک از فناوری‌ها نتایج ضعیف‌تری به همراه دارد. رویکرد دیگر، ترکیب پلاسما با فناوری پرتو فرابنفش (UV-C) است. پرتو UV-Cاثر مستقیم بر DNA میکروارگانیسم‌ها دارد و منجر به غیر فعال‌سازی آن‌ها می‌شود. با این حال، این فناوری به‌تنهایی ممکن است به دلیل نفوذ کم در بافت میوه محدودیت داشته باشد. به‌کارگیری CP در کنار UV-C سبب می‌شود گونه‌های فعال تولیدشده توسط پلاسما اثر ضدمیکروبی را تکمیل کنند و در نتیجه کاهش بار میکروبی با کارایی بالاتری صورت گیرد. نتایج یک پژوهش در سال ۲۰۲۴ نشان داد که ترکیب UV-C و پلاسما می‌تواند آلودگی قارچی در زردآلو را تا ۹۰ درصد کاهش دهد، در حالی که تاثیر استفاده مجزا از هر یک از آنها کمتر از ۶۰ درصد است (Neuenfeldt *et al*., 2023; Oliveira *et al*., 2025).

ادغام پلاسما با فناوری‌های غیرحرارتی دیگر مانند میدان‌های الکتریکی پالسی (PEF) نیز در حال بررسی است. PEF می‌تواند غشاهای سلولی میکروارگانیسم‌ها را تخریب و دسترسی گونه‌های فعال حاصل از CP را به ساختار داخلی میکروب‌ها آسان کند. تحقیقات تازه در سال ۲۰۲۵ نشان داده‌اند که این ترکیب برای افزایش ماندگاری و حفظ ارزش تغذیه‌ای گیلاس بسیار مؤثر است و توانسته کیفیت آنتی‌اکسیدانی آن را برای مدت طولانی‌تری حفظ کند(Jamali-Hafshejani *et al*., 2025).

کاربرد پلاسمای سرد در میوه‌های هسته‌دار

هلو و شلیل

هلو و شلیل نه تنها از نظر تجاری مهم‌ترین میوه‌های هسته‌دار هستند، بلکه از نظر حساسیت پس از برداشت نیز چالش‌های پیچیده‌ای دارند. این میوه‌ها پس از برداشت دچار تغییرات سریع بیوشیمیایی از جمله تجزیهٔ پکتین، کاهش سفتی بافت، تغییر در نسبت اسید به قند، قهوه‌ای‌شدگی داخلی، و حساسیت شدید به قارچ‌های بیماری‌زا

مانند *Monilinia fructicola* می‌شوند (Correa *et al.*, 2025; Lill *et al.*, 2011). در شرایط سردخانه‌ای معمولی (۵-۰ درجه سلسیوس)، هلو و شلیل نهایتاً بین ۷ تا ۱۰ روز کیفیت قابل‌قبول خود را حفظ می‌کنند و پس از آن دچار کاهش کیفیت حسی می‌شوند. همین محدودیت محققان را به سوی فناوری‌های نوین غیرگرمایی سوق داده است. یکی از نخستین شواهد تجربی مستند را مادرید و همکاران (Madrid *et al.*, 2024) و سومیاشری و همکاران (Sowmyashree *et al.*, 2021) ارائه داده‌اند. این محققان می‌گویند تیمار هلو با CP مبتنی بر دای‌الکتریک باریر می‌تواند بار قارچی *Monilinia fructicola* را بیش از ۹۰ درصد کاهش دهد. از نظر فیزیولوژیکی، این تیمار موجب حفظ مقدار کلروفیل و ترکیبات فنلی می‌شود و سرعت تنفس میوه را کند می‌کند. در مقابل، در گروه شاهد، قهوه‌ای‌شدگی داخلی و نرم‌شدگی شدید پس از ۱۰ روز انبارمانی مشاهده شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد پلاسما علاوه بر اثر ضدقارچی، احتمالاً مسیرهای متابولیک مرتبط با پیری سلولی را نیز تغییر می‌دهد (*Christaki et al.*, 2025; Q. Wu *et al.*, 2022).

در مطالعه‌ای دیگر، پریتو-سانتیاگو و همکاران ، (Prieto-Santiago *et al.*, 2025) ترکیب CP با پوشش کیتوزان را بررسی کردند. نتایجی که آنها به‌دست آوردند بسیار چشمگیر بود، میزان کاهش ویتامین C در میوه‌های تیمار شده تنها ۱۸ درصد بود، در حالی‌که در شاهد به بیش از ۴۵ درصد رسید. تیمار ترکیبی موجب سرکوب فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) و پراکسیداز (POD) شد و رنگ قرمز–نارنجی طبیعی شلیل را برای دو هفته حفظ کرد. این نتایج نشان می‌دهد که ادغام CP با دیگر فناوری‌های زیست‌فعال می‌تواند راهبردی پایدار برای افزایش ماندگاری باشد.

جدیدترین پژوهش‌ها نیز تمرکز بیشتری بر ترکیب CP با بسته‌بندی‌های هوشمند دارند (Ziuzina *et al.*, 2016). این محققان نشان دادند که استفاده از پلاسما همراه با بسته‌بندی فعال غنی‌شده با نانوذرات نقره و زئولیت می‌تواند ماندگاری هلو را از ۷ روز به بیش از ۲۰ روز افزایش دهد بی‌آنکه تغییری معنی‌دار در شاخص‌های عطری یا مقدار ویتامین C رخ دهد. این مطالعه از نظر صنعتی بسیار مهم است زیرا نشان می‌دهد پلاسمای سرد می‌تواند به‌عنوان مرحله‌ای پیش‌فرآوری، قبل از بسته‌بندی تجاری در خطوط تولید میوه‌های تازه ادغام شود.

در مجموع، پژوهش‌ها روی هلو و شلیل نشان می‌دهد CP می‌تواند به‌طور هم‌زمان کاهش بار میکروبی، کنترل نرم‌شدگی، حفظ کیفیت تغذیه‌ای و تا حدی بهبود فعالیت دفاعی درونی میوه را تضمین کند. با این حال، چالش اصلی این است که دوز بالای CP ممکن است موجب بروز لکه‌های سطحی اکسیداتیو شود، بنابراین یافتن توازن بین شدت و مدت تیمار هنوز به‌عنوان شکاف تحقیقاتی مطرح است.

زردآلو

زردآلو میوه‌ای بسیار حساس‌تر از هلو است و به دلیل بافت ظریف و ترکیبات فنلی فراوان، مستعد قهوه‌ای‌شدگی و نرم‌شدگی سریع است. به‌طور سنتی، استفاده از تیمارهای شیمیایی مانند SO_2 یا نگهداری در دمای پایین، تنها تا حدی در حفظ کیفیت این میوه موفق بوده است.

نخستین شواهد تجربی درباره اثر پلاسما بر زردآلو نشان داد که تیمار CP می‌تواند کاهش سفتی بافت زردآلو را به‌تعویق اندازد و میزان قهوه‌ای‌شدگی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد. پلاسما با ایجاد تغییرات در ترکیب پلی‌ساکاریدهای دیوارهٔ سلولی و مهار نسبی فعالیت آنزیم‌های قهوه‌ای‌کننده، سبب حفظ ظاهر زردآلو شده است. این پژوهش‌ها نشان دادند که پلاسما علاوه بر اثر ضدقارچی، می‌تواند مسیرهای دفاعی ذاتی زردآلو را نیز تحریک کند. بیان ژن‌های مرتبط با سنتز فلاوونوئیدها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پس از تیمار پلاسما افزایش می‌یابد. این بدان معناست که پلاسمای سرد

صرفاً فناوری استریل‌سازی سطحی نیست، بلکه نوعی «تنظیم‌کننده بیولوژیکی» نیز هست که می‌تواند واکنش‌های دفاعی میوه را فعال سازد.

اخیراً در مطالعه‌ای میدانی روی زردآلوی صادراتی نشان داده شد که تیمار پلاسمای سرد، در مقایسه با شاهد، می‌تواند ترکیبات آنتی‌اکسیدانی (مانند کاروتنوئیدها و پلی‌فنل‌ها) را تا ۲۵ درصد افزایش و بروز لکه‌های قهوه‌ای سطحی را کاهش دهد. با این حال، نویسندگان هشدار دادند که تیمار بیش از ۱۵ دقیقه موجب بروز تغییرات نامطلوب در ترکیبات قندی می‌شود و شیرینی میوه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (شکل ۳) (Annapure & Thirumdas, 2023; He *et al.*, 2025; Pan *et al.*, 2023).

در زردآلو، CP علاوه بر کنترل فساد می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای را نیز بهبود بخشد. اما شکاف دانشی مهم این است که هنوز مطالعاتی جامع دربارهٔ تأثیر بلندمدت CP بر پروفایل عطری و ترکیبات فرار زردآلو وجود ندارد، در حالی‌که این ترکیبات برای پذیرش بازار بسیار حیاتی‌اند.

میوه آلو

آلو یکی از میوه‌هایی است که تغییرات پس از برداشت آن به‌شدت تحت تأثیر آنزیم‌های نرم‌کنندهٔ دیوارهٔ سلولی قرار دارد. فعالیت بالای پلی‌گالاکتوروناز (PG) و پکتین متیل استراز (PME) منجر به کاهش سفتی و بروز قهوه‌ای‌شدگی داخلی می‌شود. مطالعه روی آلو نشان داده است تیمار CP موجب کاهش قابل‌توجه فعالیت PG و PME می‌شود و سفتی بافت تا ۱۰ روز بیشتر حفظ می‌گردد و از نظر میکروبی نیز بار سطحی آلو بیش از ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. ناچوا و همکاران (Nacheva *et al.*, 2024) یافته‌های مشابهی گزارش کردند با این تفاوت که آن‌ها متوجه شدند تیمار با دوز بالای CPمی‌تواند موجب آسیب پوستی شود. این یافته اهمیت بهینه‌سازی شدت و مدت تیمار را بیش از پیش برجسته می‌کند.

در مطالعه‌ای جدید، اثر CP روی ترکیبات فنلی آلو بررسی و نشان داده شد که تیمار پلاسما موجب افزایش سطح فلاوونوئیدها و آنتوسیانین‌ها می‌شود. این موضوع نشان‌دهندهٔ تحریک مسیرهای متابولیک ثانویه در پاسخ به استرس پلاسمای سرد است، مشابه همان چیزی که در زردآلو نیز گزارش شده بود (Zhang *et al.*, 2025). در مجموع، پلاسما در آلو توانسته است هم کنترل نرم‌شدگی و هم افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی را تضمین کند، اما هنوز اثر آن بر ویژگی‌های حسی (طعم و عطر) به‌خوبی مطالعه نشده است.

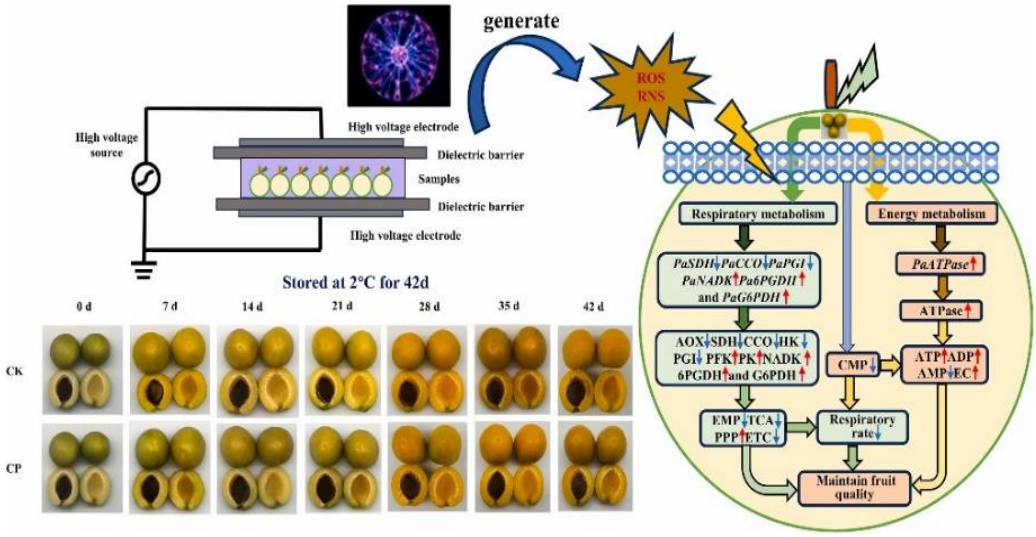
گیلاس و آلبالو

گیلاس و آلبالو به دلیل مقادیر بالای قندهای حل شونده و حساسیت شدید به قارچ‌ها، به‌ویژه *Botrytis cinerea*، کوتاه‌ترین ماندگاری‌ها را در میان میوه‌های هسته‌دار دارند. معمولاً دورهٔ نگهداری گیلاس و آلبالو کمتر از یک هفته است، مگر اینکه تیمارهای خاصی به کار گرفته شوند (Shen *et al.*, 2024). مطالعه روی گیلاس تازه نشان داده است که تیمار پلاسما می‌تواند بار میکروبی سطحی را بیش از ۹۰ درصد کاهش دهد بی آنکه تغییر قابل‌توجهی در رنگ، بریکس یا اسیدیته آن ایجاد کند (Hosseini et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگرنشان داده شده که پلاسما می‌تواند فعالیت آنزیم PPO در آلبالو را مهار کند و لکه‌های قهوه‌ای را تا دو هفته به‌طور معنی‌داری به‌تعویق اندازد. از نظر متابولیکی، میوه‌های تیمار شده مقدار آنتی‌اکسیدانی بالاتری دارند و شاخص‌های حسی (طعم و عطر) آن‌ها نیز قابل قبول باقی می‌ماند (Izmailov *et al.*, 2022). این نتایج به‌ویژه برای صادرات گیلاس بسیار مهم است زیرا CP می‌تواند جایگزین پایدار و غیرشیمیایی برای تیمارهای گوگردی یا کلرینه باشد. با این حال، همانند زردآلو، داده‌های جامع دربارهٔ اثر پلاسمای سرد بر ترکیبات عطری و قندهای گیلاس هنوز بسیار محدود است.

چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد پلاسمای سرد در افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار

چالش‌های به‌کارگیری پلاسمای سرد برای افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار ماهیتی چندبعدی دارد، یکی از مهم‌ترین آنها، ناهمگونی پاسخ میان گونه‌ها و ارقام مختلف است. برای مثال، هلو و شلیل معمولاً پس از تیمار با CP بهبود قابل‌توجهی در مقدار ترکیبات فنلی و کاهش سرعت نرم‌شدگی نشان می‌دهند، در حالی‌که آلو و زردآلو در برخی شرایط ممکن است دچار تغییرات رنگی ناخواسته یا بروز لکه‌های سطحی شوند (Qin *et al.*, 2025). اثر پلاسمای سرد به‌شدت وابسته به دوز است و تنظیم نادرست شدت یا زمان می‌تواند منجر به آسیب اکسیداتیو و افت کیفیت شود.

بررسی‌ها در بارهٔ تأثیر این فناوری بر ویژگی‌های عطری و حسی هنوز محدود است، در حالی‌که این ویژگی‌ها نقشی مهم در پذیرش توسط مصرف‌کننده دارند. در مقیاس صنعتی نیز چالش‌هایی مانند هزینهٔ انرژی، یکنواختی تیمار و طراحی تجهیزات متناسب با ویژگی‌های سطحی میوه مطرح است. علاوه بر این، نبود قوانین مشخص، نگرانی از تشکیل ترکیبات جانبی و ناشناخته بودن سازوکارهای مولکولی، از موانع جدی توسعه هستند (Pankaj *et al.*, 2018; Ercan & Soysal, 2023). ترکیب CP با فناوری‌های دیگر مانند پوشش‌های خوراکی یا بسته‌بندی فعال نتایج امیدوارکننده‌ای داشته است (Sortino *et al.*, 2020)، اما پذیرش توسط مصرف‌کننده همچنان عاملی کلیدی در موفقیت تجاری این فناوری است.



شکل ۳- مکانیسم‌های CP در به تاخیر انداختن پیری میوهٔ زردآلو در دورهٔ انبارداری از طریق تنظیم تنفس و متابولیسم انرژی (Zhang, *et al.*, 2025).

Fig 3 - Mechanisms of CP in delaying apricot fruit senescence during storage through regulation of respiration and energy metabolism (Zhang, *et al.*, 2025)

جدول ۱: مقایسهٔ کاربرد پلاسمای سرد در میوه‌های هسته‌دار

Table 1- Comparison of cold plasma application in stone fruits

نوع میوه Fruit type	نوع سیستم پلاسما Plasma system type	گاز مورد استفاده Gas used	توان / زمان Power/time	اثرهای فیزیولوژیکی و کیفی کلیدی Key physiological and qualitative effects	مراجع References
هلو Peach	تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD-CP) DBD-CP (Dielectric Barrier Discharge)	هوا Air	۲۰ وات/۵ دقیقه 20V/ 5 min	کاهش ۹۰٪ *Monilinia fructicola*، حفظ کلروفیل و فنل‌ها 90% reduction of *Monilinia fructicola*, chlorophyll and phenolics retention	Pan *et al*., 2018; Madrid *et al*., 2024
شلیل Nectarine	پوشش کیتوزان+DBD Chitosan coating +DBD	N_2	۲۵ وات/۷ دقیقه 25V/ 7 min	مهار PPO/POD، حفظ ویتامین C و رنگ Inhibits PPO/POD, preserves vitamin C and color	Prieto-Santiago *et al*., 2025
زردآلو Apricot	جت پلاسمای فشار اتمسفری (APPJ) APPJ (Atmospheric Pressure Plasma Jet)	آرگون+ اکسیژن (۹۵:۵) Ar + O_2 (95:5)	۱۸ وات/۱۵-۱۰ دقیقه 18V/ 10-15 min	کاهش ۴۰درصد قهوه‌ای‌شدگی، حفظ بافت و فنول‌ها، تحریک ژن‌های دفاعی 40%reduction in browning, preservation of texture and phenols, stimulation of defense genes	Annapure & Thirumdas, 2023; He *et al*., 2025
آلو Plum	DBD-CP	هوا Air	۲۲ وات/۸ دقیقه 22V/ 8 min	کاهش فعالیت PG وPME، حفظ سفتی ۱۰ روز بیشتر Reduce PG and PME, maintain firmness for 10 days longer	Nacheva et al., 2024; X. Zhang *et al*., 2025
گیلاس Cherry	پلاسمای سرد اتمسفری (CAP) CAP (Cold Atmospheric Plasma)	هوا Air	۲۰ وات/۴ دقیقه 20V/ 4 min	کاهش ۹۰ درصد بار میکروبی، حفظ رنگ و بریکس 90% Reduce microbial load, Retain color and brix	Hosseini *et al*., 2020; Shen et al., 2024
آلبالو Sour Cherry	جت پلاسمای فشار اتمسفری APPJ	اکسیژن O_2	۱۵ وات/۶ دقیقه 15V/ 6 min	مهار PPO، کاهش لکه‌های قهوه‌ای، حفظ آنتی‌اکسیدان‌ها Inhibit PPO, reduce brown spots, maintain antioxidants	Izmailov *et al*., 2022
هلو–بسته‌بندی فعال Peach – Active Packaging	CP + نانو زئولیت نقره CP + Nano Zeolite Ag	هوا Air	۲۵ وات/۱۵ دقیقه 25V/ 15 min	افزایش ماندگاری از ۷ به ۲۰ روز Increased shelf life from 7 to 20 days	Ziuzina *et al*., 2016
گیلاس صنعتی Industrial cherry	DBD Inline	هوا+ نیتروژن Air+ N_2	۲۴ وات/۶ دقیقه 24V/ 6 min	کاهش ضایعات صادراتی ۴۰درصد،ROI در ۱۸ ماه 40 % Reduced export waste, ROI in 18 months	Kim *et al*., 2024
زردآلو صادراتی Export Apricot	DBD-CP	آرگون Ar	۲۰ وات/۱۰ دقیقه 20V/ 10 min	افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی تا ۲۵ درصد 25% increased antioxidant compounds	He *et al*., 2025
آلو قرمز Red Plum	DBD-CP	هوا Air	۲۲ وات/۸ دقیقه 22V/ 8 min	افزایش فلاوونوئیدها و آنتوسیانین‌ها Increased flavonoids and anthocyanins	X. Zhang *et al*., 2025

سرمایه‌گذاری اولیه در تجهیزات تولید پلاسما (به‌ویژه منابع توان بالا و سیستم‌های گازدهی دقیق) بالاست، اما کاهش ضایعات میوه، حذف نیاز به مواد شیمیایی و افزایش عمر انباری می‌تواند در بلندمدت هزینه‌ها را جبران کند. مطالعات صنعتی مقدماتی در اروپا و چین نشان داده‌اند که هزینهٔ پردازش CP برای هر کیلوگرم میوه در خطوط نیمه‌صنعتی حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ دلار است (Paulino & Silveira, 2024). چالش اصلی در مقیاس صنعتی، مصرف انرژی و نیاز به یکنواختی تیمارهاست که با استفاده از سیستم‌های مدولار جریان پیوسته و ترکیب CP با

فناوری‌های کم‌هزینه‌تر مانند بسته‌بندی فعال می‌توان آن را کاهش داد. در مجموع، تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهد که CP در صورت استانداردسازی می‌تواند از نظر هزینه و پایداری محیطی با روش‌های شیمیایی و حرارتی رقابت‌پذیر باشد (Sasikumar *et al.*, 2025).

چشم‌انداز آینده و مسیرهای تحقیقاتی باز

چشم‌انداز آیندهٔ پژوهش‌ها در زمینهٔ استفاده از پلاسمای سرد برای افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار با چالش‌ها و شکاف‌های دانشی متعددی روبه‌روست. یکی از مهم‌ترین مشکلات، نبود استانداردسازی پروتکل‌هاست؛ تفاوت در نوع گاز، منبع پلاسما، مدت و شدت تیمار و شرایط نگهداری موجب می‌شود نتایج متناقض و دشواری در بازتولید یافته‌ها به‌دست آید (Hernández-Torres *et al.*, 2022). علاوه بر این، انتقال فناوری از مقیاس آزمایشگاهی به صنعتی هنوز تحقق نیافته و برای پردازش انبوه، طراحی سیستم‌های پیوسته و یکنواخت ضروری است. از نظر علمی، داده‌های مولکولی دربارهٔ مسیرهای بیوشیمیایی تحت تأثیر CP محدود است و رویکردهای اُمیکس می‌توانند سازوکار واقعی پاسخ میوه را آشکار سازند (Belay & James Caleb, 2022). کیفیت حسی و پذیرش توسط مصرف‌کننده کمتر بررسی شده است، درحالی‌که تغییر در ترکیبات عطری یا نگرش منفی بازار می‌تواند مانع تجاری‌سازی شود. آیندهٔ این فناوری احتمالاً در هم‌افزایی با دیگر روش‌ها مانند پوشش‌های خوراکی، بسته‌بندی فعال و اتمسفر اصلاح‌شده خواهد بود. در کنار این موضوع‌ها، ارزیابی‌های زیست‌محیطی و تحلیل چرخه عمر برای اثبات پایداری ادعا شدهٔ CP ضروری است و هم‌زمان باید چارچوب‌های قانونی و سیاست‌گذاری در سطح بین‌المللی تدوین شود تا مسیر تجاری‌سازی هموار گردد. نوآوری‌های فناورانه مانند میکروپلاسما، نانوپلاسما و ادغام CP با رباتیک و بینایی ماشین می‌توانند زمینه‌ساز توسعهٔ خطوط پردازش هوشمند و کارآمد در صنعت میوه باشند.

از دیدگاه ایمنی و مقرراتی، هنوز دربارهٔ ایمنی ترکیبات ثانویهٔ ناشی از گونه‌های فعال اکسیژنی و نیتروژنی (ROS/RNS) در مواد غذایی تیمارشده با پلاسمای سرد ارزیابی جامعی نشده است. برخی مطالعات مقدماتی نشان داده‌اند که غلظت این ترکیبات معمولاً پایین‌تر از حد مجاز تعیین‌شده توسط نهادهایی مانند FDA و EFSA است، اما برای تأیید نهایی، روی آوردن به آزمایش‌های سمّیت مزمن و تدوین دستورالعمل‌های رسمی الزامی است (Deng *et al.*, 2025). توجه هم‌زمان به کارایی فناوری و ایمنی مصرف‌کننده شرط اساسی برای پذیرش گسترده و قانونی‌سازی استفاده از CP در صنعت میوه‌های تازه است.

نتیجه گیری

پلاسمای سرد فناوری نوظهور غیرحرارتی است که چشم‌اندازی نوین در افزایش ماندگاری میوه‌های هسته‌دار فراهم آورده است. میوه‌های هسته دار با فیزیولوژی پیچیده و حساسیت بالای خود نه‌تنها به‌عنوان چالشی صنعتی مطرح هستند، بلکه بهترین مدل برای پیشبرد مرزهای دانش در این حوزه نیز محسوب می‌شوند. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که تیمار با پلاسما می‌تواند بار میکروبی را کاهش دهد، فرایند نرم‌شدگی و فساد را کُند کند و در برخی موارد حتی ترکیبات فنلی و مغذی را افزایش دهد، اما ناهمگنی پاسخ گونه‌ها، وابستگی شدید به دوز، محدودیت در مقیاس‌پذیری، ابهام در سازوکارهای مولکولی و نبود استانداردهای بین‌المللی همچنان از موانع کلیدی تجاری‌سازی هستند. برای غلبه بر این چالش‌ها، نقشهٔ راه آینده باید بر پایهٔ دوزیمتری دقیق، تحلیل‌های چند اومیکسی و تصویربرداری پیشرفته بنا شود تا روشن شود پلاسما چگونه مسیرهای هورمونی، متابولیکی و ژنتیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این رویکرد می‌تواند طراحی تیمارهای هوشمند را ممکن سازد، تیمارهایی که نه‌تنها ماندگاری میوه‌ها را از طریق کنترل میکروبی افزایش می‌دهند، بلکه با به‌تأخیر انداختن رسیدن، تقویت سیستم

دفاعی طبیعی و ارتقای ترکیبات مغذی، کیفیت حسی و تغذیه‌ای محصول را نیز بهبود می‌بخشند. از سوی دیگر، هم‌افزایی پلاسمای سرد با فناوری‌های نوین مانند پوشش‌های خوراکی زیست‌فعال، بسته‌بندی فعال و اتمسفر اصلاح‌شده، همراه با نوآوری‌های فناورانه مانند میکروپلاسما، نانوپلاسما و سیستم‌های رباتیک می‌تواند مسیر عملی‌سازی صنعتی این فناوری را هموار کند. در نهایت، تحقق ظرفیت کامل پلاسمای سرد نیازمند پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، ارزیابی جامع پایداری زیست‌محیطی، استانداردسازی بین‌المللی و سنجش نگرش مصرف‌کننده است تا این فناوری بتواند جایگاهی پایدار و تجاری در صنعت میوه‌های هسته‌دار پیدا کند.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

Akhavan-Mahdavi, S., Mirzazadeh, M., Alam, Z., & Solaimanimehr, S. (2023). The effect of chitosan coating combined with cold plasma on the quality and safety of pistachio during storage. *Food Science & Nutrition*, 11(7), 4296-4307.

Annapure, U. S., & Thirumdas, R. (2023). Cold plasma for food preservation. In book: Emerging Technologies in Food Preservation (pp. 50-74). DOI:10.1201/9781003147978-3

Belay, Z. A., & James Caleb, O. (2022). Role of integrated omics in unravelling fruit stress and defence responses during postharvest: A review. *Food Chemistry (Oxford)*, *5*, doi:10.1016/j.fochms.2022.100118.

Brecht, J. K., Ritenour, M. A., Sarkhosh, A., Olmstead, M., Chaparro, J. X., Bartz, J. A., & Van Sickle, J. (2023). Harvesting & postharvest handling of stonefruit in Florida 2023. *EDIS*, 2023 (2), doi:10.32473/edis-hs1459-2023

Christaki, S., Kyriakoudi, A., Zymvrakaki, E., Stratakos, A. C., & Mourtzinos, I. (2025). The combined effect of cold atmospheric plasma and ultrasounds on the sustainable valorization of peach peels. *LWT*, 225, doi:https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117894

Correa, E. C., Baltazar, P., Barreiro, P., Hernández-Sánchez, N., Lleó, L., Melado-Herreros, Á., & Diezma, B. (2025). Non-destructive textural quality assessment of peaches and nectarines using near-infrared spectroscopy integration time. *Applied Food Research*, 5, https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101202

Deng, S., Xiaowei, S., Dong, P., Wang, Y., Qian, J., Wang, J., & Raghavan, V. (2025). Safety assessment of cold plasma technology in food: From molecular modification to toxicological analysis. *Food Chemistry*, 495, doi:10.1016/j.foodchem.2025.146573

Droby, S., & Wisniewski, M. (2018). The fruit microbiome: A new frontier for postharvest biocontrol and postharvest biology. *Postharvest Biology and Technology*, *140*, 107-112.

Du, Y., Huang, X., Yuan, S., Yu, H., Guo, Y., Cheng, Y., & Yao, W. (2025). Cold plasma and honey synergistically inhibit polyphenol oxidase to enhance fresh-cut apple preservation. *Food Chemistry*, 468, doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142490

Du, Y., Liu, K., Yuan, S., Yu, H., Guo, Y., Cheng, Y., & Yao, W. (2025). Revealing cold plasma-mediated changes in wolfberry wax and related gene expression during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 222, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113390

Fan, J., Li, C., Wu, X., Lu, Y., Duan, Z., Cen, D., & Shen, Y. (2025). Mechanistic insights into the quality maintenance of postharvest Cili induced by stress from exogenous H_2O_2 through 'Physio-

Omic-CompBio' tripartite correlation. *Postharvest Biology and Technology, 228*, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio. 2025.113631

Farooq, S., Dar, A. H., Dash, K. K., Srivastava ,S., Pandey, V. K., Ayoub, W. S., & Kaur, M. (2023). Cold plasma treatment advancements in food processing and impact on the physiochemical characteristics of food products. *Food Sci Biotechnol, 32*(5), 621-638.

Graves, D. (2014). Graves DBLow temperature plasma biomedicine: a tutorial reviewa. *Physics of Plasmas, 21*, DOI:10.1063/1.4892534

Harikrishna, S., Anil, P. P., Shams, R., & Dash, K. K. (2023). Cold plasma as an emerging nonthermal technology for food processing: A comprehensive review. *Journal of Agriculture and Food Research, 14*, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100747

He, X., Sun, T., Zhang, W., Yang, W., Li, L., Cao, J., & Chen, G. (2025). Cold plasma treatment maintains antioxidant capacity and cell membrane integrity in apricot fruit by inducing reactive oxygen species scavenging systems. *Postharvest Biology & Technology*, 230, doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113815

He, X., Zhang, W ,.Sun, T., Yang, W., Li, L., Guo, M., & Chen, G. (2025). Cold plasma treatment maintains apricot fruit quality by regulating respiration and energy metabolism. *LWT, Food Science and Technology*, 227, https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117991

Hernández-Torres, C. J., Reyes-Acosta, Y. K., Chávez-González, M. L., Dávila-Medina, M. D., Kumar Verma, D., Martínez-Hernández, J. L., & Aguilar, C. N. (2022). Recent trends and technological development in plasma as an emerging and promising technology for food biosystems. *Saudi Journal of Biological Sciences, 29*(4), 1957-1980.

Hosseini, S. 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.

Izmailov, A., Khort, D., Filippov, R., Pishchalnikov, R. Y., Simakin, A. V., & Shogenov, Y. (2022). Improvement of winter graft techniques using cold plasma and plasma-treated solution on cherry cultures. *Applied Sciences, 12*(10), https://doi.org/10.3390/app12104953

Jamali-Hafshejani, F., Hosseinzadeh Samani, B., Taki, K., & Ghatrehsamani, S. (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), https://doi.org/10.1002/fsn3.70465

Jia, S., Zhang, N., Ji, H., Zhang, X., Dong, C., Yu, J., & Liang, L. (2022). Effects of Atmospheric cold plasma treatment on the storage quality and chlorophyll metabolism of postharvest tomato. *Foods, 11*(24). doi:10.3390/foods11244088

Khojasteh, S. K., Elmizadeh, A., Sarraf, M., & Dodange, S. (2025). Non-Thermal innovations in solid food processing: Eco-friendly alternatives to thermal methods. *Applied Food Research*, https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101256

Kim, S. J., & Chung, T. H. (2016). Cold atmospheric plasma jet-generated RONS and their selective effects on normal and carcinoma cells. *Scientific Reports, 6*(1), doi:10.1038/srep20332

Kummu, M., de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O., & Ward, P. J. (2012). Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. *Science of The Total Environment*, 438, 477-489.

Laika, J., Sabatucci, A., Sacchetti, G., Di Michele, A., Molina Hernandez, J. B., Ricci, A., & Neri, L. (2024). Cold atmospheric plasma inactivation of polyphenol oxidase: Focus on the protective and boosting effect of mono- and disaccharides. *Journal of Food Science*, 89(12), 9283-9298.

Lara, M. V., Bonghi, C., Famiani, F., Vizzotto, G., Walker, R .P., & Drincovich, M. F. (2020). Stone Fruit as biofactories of phytochemicals with potential roles in human nutrition and health. *Front Plant Science*, 11, doi:10.3389/fpls.2020.562252

Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering, 312*, https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748

Li, M., Li, X., Han, C., Ji, N., Jin, P., & Zheng, Y. (2019). Physiological and Metabolomic Analysis of Cold Plasma Treated Fresh-Cut Strawberries. *Journal Agriculture Food Chemistry, 67*(14), 4043-4053.

Li, Y., Huang, X., Yang, Y., Mulati, A., Hong, J., & Wang, J. (2025). The Effects of cold-plasma technology on the quality properties of fresh-cut produce: A review. *Foods*, 14 (2), https://doi.org/10.3390/foods14020149

Lill, R., Odonoghue, E., & King, G. (2011). Postharvest physiology of peaches and nectarines. In book (Vol. 11, pp. 413-452). https://doi.org/10.1002/9781118060841.ch10

Madrid, A., Silva, V., Reyes, C., Werner, E., Besoain ,X., Montenegro, I., & Díaz, K. (2024). Control of Peach brown rot disease produced by monilinia fructicola and monilinia laxa using benzylidene-cycloalkanones. *Journal of Fungi, 10*(9), https://doi.org/10.3390/jof10090609 .

Misra, N. N., Yepez, X., Xu, L., & Keener, K. (2019). In-package cold plasma technologies. *Journal of Food Engineering, 244*, 21-31.

Nacheva, L., Milusheva, S., Marinova, P., Dimitrova, N., & Benova, E. (2024). Cold Atmospheric plasma (cap) treatment of in vitro cultivated plum plantlets-A possible way to improve growth and inactivate plum Pox virus (PPV). *Processes, 12*(7), https://doi.org/10.3390/pr12071387

Neuenfeldt, N. H., Silva, L. P., Pessoa, R. S., & O Rocha, L. (2023). Cold plasma technology for controlling toxigenic fungi and mycotoxins in food. *Current Opinion in Food Science, 52*, https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101045

Oliveira, A. C. D. d., Ali, S., Corassin, C. H., Ullah, S., Pereira, K. N., Walsh, J. L., & Oliveira, C. A. F. (2025). Application of cold atmospheric plasma for decontamination of toxigenic fungi and mycotoxins: a systematic review. *Frontiers in Microbiology*, 15, doi:10.3389/fmicb.2024.1502915

Pan, Y., Li, T., Wu, C., Guo, S., Fan, G., Li, X., & Hua, X. (2023). Subcellular damages of pathogenic fungi combined with gene expression analysis reveals mechanisms that cold plasma controlling apricot disease. *Food Bioscience, 53*, https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102728

Paulino, R. S. F., & Silveira, J. L. (2024). Plasma gasification of biomedical waste: energetic and exergetic aspect. In book: Circular Economy on Energy and Natural Resources Industries (pp.211-238). DOI:10.1007/978-3-031-56284-6_12

Perera, K. Y., Prendeville, J., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2022). Cold Plasma technology in food packaging. *Coatings*, 12 (12), https://doi.org/10.3390/coatings12121896 .

Prieto-Santiago, V., Miranda, M., Aguiló-Aguayo, I., Teixidó, N., Ortiz-Solà, J., & Abadias, M. (2025). Antimicrobial Efficacy of nanochitosan and chitosan edible coatings: application for enhancing the safety of fresh-cut nectarines. *Coatings, 15*(3), DOI:10.3390/coatings15030296

Qin, Q., Wang, L., Wang, Q., Wang, R., Li, C., Qiao, Y & ,.Liu, H. (2025). Postharvest flavor quality changes and preservation strategies for peach fruits: A comprehensive review. *Plants (Basel), 14*(9). doi:10.3390/plants14091310

Ramezan, Y., Kamkari, A., Lashkari, A., Moradi, D., & Tabrizi, A. N. (2024). A review on mechanisms and impacts of cold plasma treatment as a non-thermal technology on food pigments. *Food Science & Nutrition, 12*(3), 1502-1527.

Ranjan, R., Gupta, A. K., Pandiselvam, R., Chauhan, A. K., Akhtar, S ,.Jha, A. K., & Preet, M. S. (2023). Plasma treatment: An alternative and sustainable green approach for decontamination of mycotoxin

in dried food products. *Journal of Agriculture and Food Research, 14*, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100867

Safwa, S. M., Ahmed, T., Talukder, S., Sarkar, A., & Rana, M. R. (2024). Applications of non-thermal technologies in food processing Industries-A review. *Journal of Agriculture and Food Research, 18*, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023100917

Sasikumar, R., T, S. K., Mangang, I. B., Kaviarasu, G., Kaushik, R., Mansingh, P., & Jaiswal, A. K. (2025). A comprehensive review on cold plasma applications in the food industry. *Sustainable Food Technology, 3*(5), 1251-1274.

Shen, C., Jiang, F., Shao, S., Wu, D., & Chen, K. (2024). The effect of plasma-activated ice slurry with both pre-cooling and antifungal activity on postharvest sweet cherry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 212, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112867

Sortino, G., Saletta, F., Puccio, S., Scuderi, D., Allegra, A., Inglese, P., & Farina, V. (2020). Extending the Shelf life of white peach fruit with 1-methylcyclopropene and aloe arborescens edible coating. *Agriculture, 10 (5)*, https://doi.org/10.3390/agriculture10050151

Sowmyashree, A., Sharma, R., G Rudra, S., & Grover, M. (2021). Layer-by-layer coating of hydrocolloids and mixed plant extract reduces fruit decay and improves postharvest life of nectarine fruits during cold storage. *Acta Physiologiae Plantarum, 43*, 112. doi:10.1007/s11738-021-03256-8.

Tabares, F. L., & Junkar, I. (2021). Cold Plasma systems and their application in surface treatments for medicine. *Molecules*, 26(7), https://doi.org/10.3390/molecules26071903

Vinholes, J., Gelain, D., & Vizzotto, M. (2016). Stone Fruits as a source of bioactive compounds. In book: Natural Bioactive Compounds from Fruits and Vegetables as Health Promoters: Part 1 (pp.110-142)

Wu, Q., Shen, C., Li, J., Wu, D., & Chen, K. (2022). Application of indirect plasma-processed air on microbial inactivation and quality of yellow peaches during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 79*, https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103044

Wu, Y., Cheng, J.-H., Keener, K. M., & Sun, D.-W. (2023). Inhibitory effects of dielectric barrier discharge cold plasma on pathogenic enzymes and anthracnose for mango postharvest preservation. *Postharvest Biology and Technology, 196*, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112181

Xu, L., Gao, Z., Li, L., & Guo, J. (2024). Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on anthocyanin metabolism in blueberries: A targeted metabonomic and transcriptomic analysis. *Postharvest Biology and Technology, 213*, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112963

Yawut, N., Mekwilai, T., Vichiansan, N., Braspaiboon, S., Leksakul, K., & Boonyawan, D. (2024). Cold plasma technology: Transforming food processing for safety and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research, 18*, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101383

Zhang, B., Tan, C., Zou, F., Sun, Y., Shang, N., & Wu, W. (2022). Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food: A review. *Foods*, 11(18), DOI: 10.3390/foods11182818

Zhang, C., & Cheng, J.-H. (2024). Assessing the effect of cold plasma on the softening of postharvest blueberries through reactive oxygen species metabolism using transcriptomic analysis. *Foods, 13*(7), https://doi.org/10.3390/foods13071132

Zhang, X., Zhang, W., Liu, Y., Yang, W., Cao, J., Guo, M., & Chen, G. (2025). Spermidine treatment delays postharvest senescence of prune (Prunus domestica L.) fruit by regulating reactive oxygen species and membrane lipid metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 228, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113670

Zhou, D., Sun, R., Zhu, W., Shi, Y., Ni, S., Wu, C., & Li, T. (2023). Impact of dielectric barrier discharge cold plasma on the quality and phenolic metabolism in blueberries based on metabonomic analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 197, https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112208

Ziuzina, D., Misra, N. N., Cullen, P. J., Keener, K. M., Mosnier, J. P., Vilaró, I., & Bourke, P. (2016). Demonstrating the potential of industrial scale in-package atmospheric cold plasma for decontamination of cherry tomatoes. *Plasma Medicine*, 6(3–4), 397–412.

Food Engineering Research/Vol.25/No. 80/ Spring& Summer 2026/P: 63-82

Journal Home page: https://fooder.areeo.ac.ir/

Review paper

Application of Cold Plasma in Controlling Physiological Processes and Extending Shelf Life of Stone Fruits

N. Tabrizi* and Sh. Zomorodi

***Corresponding Author:** Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran
Email: nadereh_tabrizi84@yahoo.com
Received:25 August 2025 **Accepted**: 26 February 2026
http://doi: 10.22092/fooder.2026.370471.1430

Abstract

Stone fruits such as peach, nectarine, apricot, plum, and cherry occupy a prominent position in the agricultural economy due to their high nutritional and economic value, broad consumer acceptance, and important role in food security. However, these commodities face major challenges related to short postharvest shelf life and high perishability throughout the supply chain. In recent years, cold atmospheric plasma (CAP) has attracted increasing attention as an emerging non-thermal technology. Beyond its well-established capability for low-temperature surface sterilization and pathogen inactivation, CAP can also act as an abiotic stressor that interacts with the physiological and metabolic pathways of fruits. Evidence indicates that CAP may modulate the activity of key enzymes such as polyphenol oxidases and peroxidases, influence the metabolism of phenolic compounds, and alter the regulation of ripening related hormones, including ethylene and abscisic acid. These effects ultimately contribute to delayed tissue softening, enhanced defense responses, and improved nutritional quality. This review focuses on the molecular and biochemical responses of stone fruits to CAP treatment and discusses critical challenges, including species and dose dependent effects, scalability limitations, regulatory uncertainties, and existing knowledge gaps regarding sensory attributes and consumer acceptance. In addition, the potential synergistic integration of CAP with complementary technologies such as edible coatings, active packaging, and controlled atmosphere storage is explored. Finally, future perspectives are presented in which cold atmospheric plasma is considered not merely as an antimicrobial tool, but as an innovative and intelligent postharvest engineering strategy for the sustainable extension of shelf life and marketability of stone fruits.

Keywords: Cold atmospheric plasma, Fruit Quality, Postharvest Physiology, Shelf life, Stone fruits

© 2026,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.