

## مروری بر فناوری پلاسمای سرد: مکانیسم، تأثیر بر خواص فیزیکوشیمیایی مواد غذایی و کاربردها آن در صنعت غذا

علی دادگر

کارشناسی، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

عادل حاجیان تیلکی

کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

### چکیده

پلاسمای سرد به عنوان یک روش نوین غیرحرارتی در فرآوری مواد غذایی نقش حیاتی در حفظ کیفیت محصولات ایفا می کند، بدون آنکه اثرات منفی حرارت بر ویژگی های تغذیه ای آن ها اعمال شود. این تکنیک با استفاده از مولکول های گازی فعال، میکروارگانیسم های آلوده کننده را غیرفعال کرده و آفت کش ها و آنزیم های مخرب کیفیت را تجزیه می کند. بهینه سازی ویژگی های سطحی محصولات و پارامترهای فرآیندی، شامل عوامل محیطی، پارامترهای فرآیند و عوامل ذاتی، می تواند به بازدهی بالاتری در استفاده از پلاسمای سرد منجر شود. با توجه به ماهیت غیرحرارتی این فناوری، ویژگی های فیزیکوشیمیایی، تغذیه ای و حسی مواد غذایی به میزان کمتری تحت تأثیر قرار می گیرند. با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتر برای بهینه سازی و کاهش اثرات منفی آن بر خصوصیات مختلف محصولات غذایی وجود دارد. پلاسمای سرد با طراحی تطبیق پذیر، اقتصادی و دوستدار محیط زیست، نسبت به روش های سنتی پتانسیل بالاتری دارد و می تواند به عنوان یک راهکار موثر برای افزایش ماندگاری و بهبود کیفیت مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر فرآوری پلاسمای سرد بر ویژگی های کیفی محصولات غذایی و نشان دادن تأثیر این فناوری بر کاهش نگرانی های میکروبیولوژیکی، همزمان با بهبود کیفیت محصولات حداقل فرآوری شده است. این مطالعه تلاش دارد تا با ارائه داده ها و نتایج به روز، اهمیت بهینه سازی فرآیندهای پلاسمای سرد را در حفظ و ارتقاء کیفیت مواد غذایی و کاربردهای آن در مواد غذایی را به وضوح روشن سازد.

**واژگان کلیدی:** پلاسمای سرد، کیفیت غذا، خصوصیات فیزیکوشیمیایی، فعالیت آنزیم، آلودگی زدایی

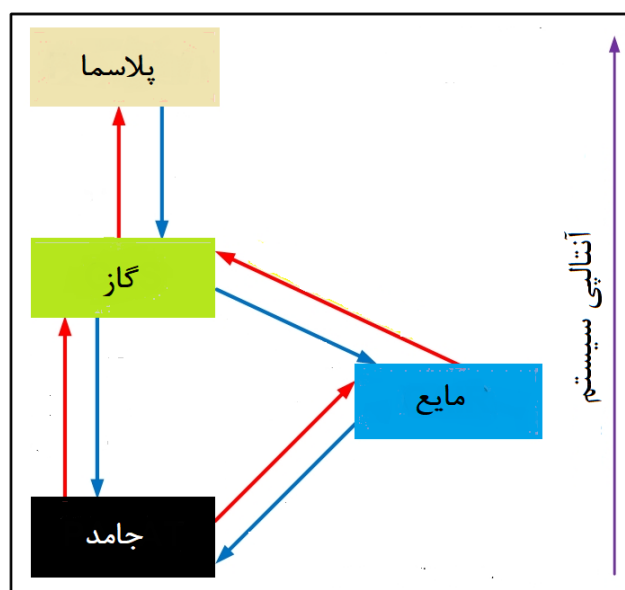
## مقدمه

فرایندهای حرارتی بیش از دو قرن است که برای فراوری مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و هنوز هم تکنیک اصلی در صنایع غذایی محسوب می‌شوند. با این حال، این روش‌ها می‌توانند منجر به کاهش کیفیت تغذیه‌ای و تغییرات نامطلوب در خواص ارگانولپتیکی مانند تغییر رنگ و بو و تخریب بافت شوند (Pandiselvam et al., 2017). از این رو، در صنعت غذا همواره تلاش می‌شود تا از تکنولوژی‌های جدید و به‌روزتری استفاده شود که سلامت و کیفیت مواد غذایی را تضمین کنند. یکی از این تکنولوژی‌های نوین، روش‌های غیرحرارتی است که در دمای اتاق یا کمتر از دمای مورد نیاز برای از بین بردن میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند و تأثیرات منفی حرارت بر پارامترهای تغذیه‌ای و کیفیتی را به حداقل می‌رسانند این روش‌ها شامل استفاده از فشار بالا، میدان‌های الکتریکی پالسی، نور ماوراء بنفش و پلاسما سرد هستند (Stranska et al., 2023; Singh et al., 2022; Tiwari et al. 2009). پلاسما سرد یکی از این روش‌های غیرحرارتی است که به عنوان روشی موثر برای حذف آلودگی و افزایش ماندگاری مواد غذایی شناخته شده است. این تکنولوژی نه تنها مصرف انرژی پایینی دارد و میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌های خاص را هدف قرار می‌دهد، بلکه باقیمانده سمی برجای نمی‌گذارد و به همین دلیل روشی ایمن و سازگار با محیط زیست است (Ucar et al., 2021; Rao et al., 2023). علاوه بر این، پلاسما سرد در حفظ عطر و طعم طبیعی غذاها و افزایش ایمنی میکروبیولوژیکی بدون کاهش قابل توجه کیفیت ماده غذایی موثر است. این فناوری به دلیل واکنش‌پذیری بالا و ماهیت ترمودینامیکی غیرتعادلی‌اش، توانسته جایگاه ویژه‌ای در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، مواد غذایی، بسته‌بندی و داروسازی پیدا کند. این ویژگی‌ها، پلاسما سرد را به یک تکنولوژی مناسب برای اقلام حساس به گرما تبدیل کرده است (Farooq et al., 2023). هدف از این بررسی، ارائه شرح مختصری از مکانیزم عملکرد فناوری پلاسما سرد، ارزیابی تأثیرات آن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محصولات غذایی مختلف و بیان کاربردهای آن در صنعت غذا است.

## مکانیزم فناوری پلاسما

پلاسما که به عنوان حالت چهارم ماده شناخته می‌شود (Kong and Shama., 2014)، ویژگی‌ها و خصوصیات منحصر به فردی دارد که آن را از حالات جامد، مایع، و گاز متمایز می‌کند (شکل ۱). این حالت از ماده از گازهای جزئی یا کاملاً یونیزه شده تشکیل شده است و شامل فوتون‌ها، یون‌ها، الکترون‌های آزاد، و اتم‌های برانگیخته یا در حالت پایه می‌باشد (Farooq et al., 2023; Pankaj et al., 2018). پلاسما به دلیل تعادل تعداد بارهای مثبت و منفی، از نظر بار خالص خنثی است. با این حال، حضور ذرات باردار آزاد در پلاسما موجب می‌شود که هدایت الکتریکی آن بسیار بالا باشد و حتی در این زمینه از فلزاتی مانند طلا و مس نیز پیشی می‌گیرد. این خاصیت هدایت الکتریکی بالا ناشی از وجود ذرات باردار آزاد است که تحت تأثیر میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و با اتم‌ها و مولکول‌های موجود در گاز یا سطح الکترودها برخورد می‌کنند. این برخوردها باعث تولید ذرات باردار جدیدی می‌شوند. در این فرآیند، یک زنجیره‌ی بهمنی از ذرات باردار شکل می‌گیرد که در نهایت به تعادل می‌رسد و یک پلاسما پایدار ایجاد می‌کند (Niemira, 2014). این حالت از ماده با انرژی‌دهی به یک گاز خنثی در فشارها و دماهای مختلف ایجاد می‌شود و بر اساس شرایط تولید، به دو دسته‌ی پلاسما حرارتی (Thermal plasma, TP) و غیرحرارتی (Non-thermal plasma, NTP) طبقه‌بندی می‌گردد (Misra et al., 2011). برای ایجاد پلاسما حرارتی، به فشارهای بالا (۱۰۵ پاسکال) و توان تا ۵۰ مگاوات نیاز است. در این شرایط، تعادل حرارتی میان الکترون‌ها و گونه‌های سنگین‌تر به دلیل دمای همگن گاز برقرار می‌شود (Scholtz et al., 2015). در مقابل، پلاسما غیرحرارتی که به عنوان پلاسما غیرتعادلی نیز شناخته می‌شود، در فشارها و توان‌های پایین‌تر و بدون تعادل ترمودینامیکی موضعی تولید می‌گردد. در این حالت، انرژی داده شده باعث تجزیه گاز به تعداد زیادی گونه‌های فعال می‌شود که تحت واکنش‌هایی مانند تحریک، تحریک‌زدایی و یونیزاسیون قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان گفت در پلاسما حرارتی، همه گونه‌ها در یک تعادل ترمودینامیکی قرار دارند (به عنوان مثال، در پلاسما قوس، دمای الکترون‌ها تقریباً برابر با دمای گونه‌های سنگین‌تر و در حدود ۱۰۰۰۰ کلوین است). در صورتی که در پلاسما غیر حرارتی، دمای گونه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد و معمولاً دمای الکترون‌ها بسیار بیشتر از دمای گونه‌های سنگین‌تر است (Pankaj et al., 2018). به پلاسما غیرحرارتی پلاسما سرد می‌گویند که از آن در صنعت غذا استفاده می‌شود زیرا امکان

فراوری مواد غذایی در دماهای پایین را فراهم می‌کند. تکنیک مورد استفاده برای تولید پلاسما سرد بر مسیر کاربرد و همچنین کمیت و ترکیب گونه‌های واکنش‌پذیر تأثیر می‌گذارد. بنابراین، شناسایی مسیرهای تکنولوژیکی برای تشکیل پلاسما، شامل مسیریایی که تحت فشار اتمسفری یا کمتر عمل می‌کنند، بسیار حائز اهمیت است (Ekezie et al., 2017). برخی از روش‌های متداول برای ایجاد پلاسما سرد شامل تخلیه قوس لغزشی، فرکانس‌های رادیویی، تخلیه مانع دی‌الکتریک، تخلیه درخشش کرونا، پلاسما القایی، پلاسما ناشی از میکروویو و تخلیه درخشش اتمسفری می‌باشند. در این فرآیندها، الکترون‌های پلاسما عمده انرژی الکتریکی را جذب می‌کنند. بسته به شرایط فشار، پلاسما را می‌توان به سه دسته پرفشار، فشار اتمسفر و پلاسما کم فشار نیز طبقه بندی کرد. در پلاسما فشار اتمسفر، پلاسما در فشار اتمسفر معمولی تولید می‌شود و نیاز به محفظه‌های واکنش پرهزینه برای حفظ فشار را از بین می‌برد (Pankaj et al., 2018).

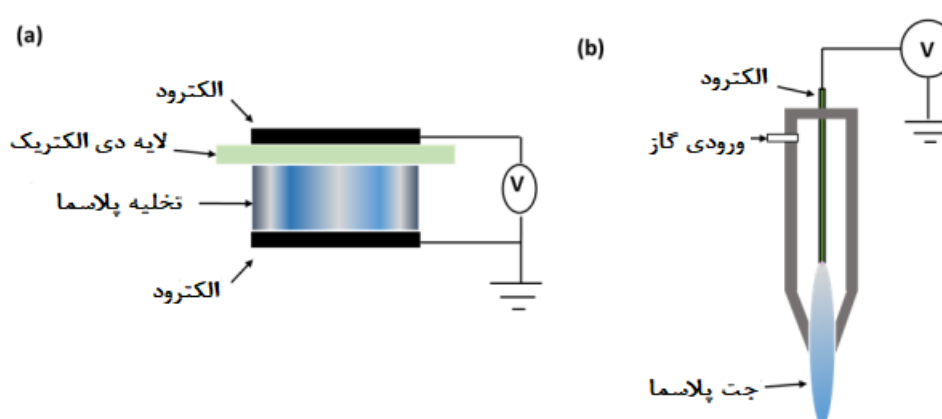


شکل ۱- نمودار تغییر انتالی جامد مایع گاز انتالی

### پلاسما تولید شده در فشار اتمسفر یافته‌ها

توسعه‌های اخیر در مهندسی پلاسما، به تولید پلاسما در فشارهای اتمسفری منجر شده است. از جمله فناوری‌های پلاسمایی که در این شرایط عمل می‌کنند می‌توان به تخلیه تاج، پلاسما فرکانس رادیویی (RF)، تخلیه قوس سرخوردن (GAD) و تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) اشاره کرد. روشی از فناوری پلاسما سرد است که با اعمال تخلیه الکتریکی با ولتاژ بالا بین دو الکتروود توسط یک مانع دی‌الکتریک، میدان پلاسما ایجاد می‌شود (شکل ۲). این سیستم با سادگی عملیاتی، سرعت جریان گاز کم، قابلیت استفاده از گازهای مختلف و انعطاف پذیری در طراحی الکتروودها شناخته می‌شود. همچنین، به دلیل نیاز به ولتاژهای بالای ۱۰ کیلوولت، اقدامات ایمنی حائز اهمیت است (Ekezie et al., 2017; Farooq et al., 2023). دستگاه‌های جت پلاسما از دو الکتروود متحدالمرکز تشکیل شده‌اند که در آن الکتروود داخلی معمولاً به یک توان فرکانس رادیویی با فرکانس بالا متصل می‌شود و باعث یونیزه شدن گاز کار می‌شود که از نازل خارج می‌شود و ظاهری «جت مانند» می‌دهد (شکل ۲) (Pankaj et al., 2018). روش تخلیه قوس سرخوردن (GAD) در راکتور جوی با استفاده از الکتروودهای فلزی واگرا و با تفاوت ولتاژ بالا (حدود ۹ کیلوولت) و جریان نسبتاً بالا (۱۰۰ میلی‌آمپر) تولید می‌شود. در این روش، هوای مرطوب وارد شکاف تخلیه بین الکتروودها می‌شود و قوس در ناحیه باریکی بین الکتروودها ایجاد می‌شود که گاز ورودی آن را دور می‌کند. این تکنولوژی می‌تواند پلاسما حرارتی و غیرحرارتی را تولید کند و مناسب برای تیمارهای سطحی و مایع است، همچنین در تجزیه آلاینده‌های شیمیایی مانند اجزای آلی، پسماندهای صنعتی، حلال‌های موجود در آب

و ضدآلودگی باکتریایی استفاده می‌شود (Scholtz et al., 2015). همچنین، پلاسمای فرکانس رادیویی (RF) نیز با استفاده از میدان الکترومغناطیسی ضربانی که توسط سیم پیچ یا الکترودهای خارجی نگهداری می‌شود، تولید می‌شود. این نوع پلازما مشابه امواج مایکروویو است و می‌تواند در فرکانس‌های مختلف از هرتز تا مگاهرتز عمل کند (Ekezie et al., 2017). پلاسمای غیرحرارتی توسط پلاسمای مایکروویو (MP) تعریف می‌شود که توسط امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های حدود ۱۰۰ مگاهرتز تولید می‌شود. این پلازما بدون الکترون عمل می‌کند که باعث سادگی عملیاتی و اشتعال آسان در هوا می‌شود. پلاسمای مایکروویو با استفاده از تابش مایکروویو، گاز فرآیند را یونیزه و گرما ایجاد می‌کند و به عنوان یک روش کم هزینه و ساده برای کاربردهای تصفیه سطحی، تمیز کردن میکروبی و از بین بردن رسوبات الکتریکی استفاده می‌شود (Surowsky et al., 2014).



شکل ۲- شکل شماتیک (a) تخلیه مانع دی الکتریک. (b) سیستم جت پلازما

## تأثیر پلاسمای سرد بر خصوصیات فیزیکیوشیمیایی مواد غذایی

عوامل متعددی از جمله ظاهر، بافت، مزه و ارزش غذایی بر کیفیت مواد غذایی تازه برش خورده تأثیر می‌گذارند (Pankaj et al., 2018). مصرف کنندگان بر اساس ظاهر و تازگی میوه‌ها و سبزیجات درباره کیفیت آن‌ها قضاوت می‌کنند. در فرآیند پلاسمای سرد، محصولات غذایی در معرض یک میدان الکتریکی قوی و انواع گونه‌های فعال گازی قرار می‌گیرند. به دلیل وجود گونه‌های واکنش پذیر، پلاسمای سرد می‌تواند تقریباً با تمام اجزای غذا تعامل کند و ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی مانند گلوکز، pH، ویتامین‌ها، سرعت تنفس و آنتوسیانین، و همچنین ویژگی‌های ارگانولپتیک مانند طعم، رنگ و بافت محصولات باغبانی تازه را تغییر دهد (Pankaj et al., 2018; Muhammad et al., 2018). بنابراین، پژوهش درباره چگونگی تأثیر پلاسمای سرد بر جنبه‌های کیفی مواد غذایی، اهمیت فراوانی دارد. تأثیر پلاسمای سرد بر کیفیت چندین محصول غذایی در جدول ۱ خلاصه شده است.

## جدول ۱- تأثیر فراوری پلاسمای سرد بر پارامترهای کیفی محصولات غذایی

نمونه	منبع تولید پلاسما	مشاهده کیفیت
آب پرتقال (Xu et al., 2017)	تخلیه سد دی الکتریک، هوا/MA65 (۶۵٪ اکسیژن، ۳۰٪ دی اکسید کربن، ۵٪ نیتروژن)، ۹۰ کیلوولت، ۳۰-۱۲۰ ثانیه	<ul style="list-style-type: none"> <li>عدم تغییر قابل توجه در بریکس یا pH.</li> <li>Vit.C به میزان ۲۲٪ در هوا کاهش می یابد.</li> <li>فعالیت PME ۷۴٪ در هوا و ۸۲٪ در MA65 کاهش یافت.</li> <li>حداکثر اختلاف رنگ کل کمتر از ۱.۲ است.</li> <li>کاهش تا ۵ log10 از <i>Salmonella enterica</i></li> </ul>
آب انگور سفید (Pankaj et al., 2017)	تخلیه سد دی الکتریک، ۶۰ هرتز، ۸۰ کیلوولت، ۱-۴ دقیقه، هوا	<ul style="list-style-type: none"> <li>عدم تغییر قابل توجه در pH، اسیدیته و هدایت الکتریکی آب میوه.</li> <li>افزایش قهوه ای شدن غیر آنزیمی با حداقل تفاوت رنگ کل.</li> <li>کاهش فنل کل، کل فلاونوئیدها، مهار رادیکال های آزاد DPPH و ظرفیت آنتی اکسیدانی</li> <li>افزایش در کل محتوای فلاونول</li> <li>کاهش ۷.۴ log10 CFU/mL در <i>Saccharomyces cerevisiae</i> در ۸۰ کیلوولت به مدت ۴ دقیقه</li> </ul>
کیوی (Ramazzina et al., 2015)	تخلیه سد دی الکتریک ۱۵۰ کیلو ولت، ۱۰-۲۰ دقیقه	<ul style="list-style-type: none"> <li>بهبود حفظ رنگ و کاهش تشکیل ناحیه تیره در طول ذخیره سازی</li> <li>عدم تغییر قابل توجه در رنگ، سختی، ویتامین C و فعالیت آنتی اکسیدانی</li> <li>تیمار طولانی تر باعث افزایش محتوای جامد محلول می شود</li> <li>کاهش ۱۵ درصدی کلروفیل a در روز صفر بدون تفاوت در روز چهارم</li> </ul>
زغال اخته (Saragapani et al., 2017a, b, c)	تخلیه سد دی الکتریک، ۵۰ هرتز، ۸۰-۶۰ کیلوولت، ۵-۰ دقیقه، هوا	<ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش سفتی، فنل کل، فلاونوئید و آنتوسیانین در اثر تیمار طولانی مدت پلاسمای سرد در سطح ولتاژ بالاتر</li> <li>افزایش قابل توجه در کل جامدات محلول</li> <li>عدم تغییر قابل توجه در اسیدیته و رنگ (به جز تیره شدن میوه در ۸۰ کیلوولت به مدت ۵ دقیقه)</li> </ul>
جوانه تربچه (Oh et al., 2017)	پلاسما مایکروبیو، ۲.۴۵ گیگاهرتز، ۹۰۰ وات، ۶۶۹ پاسکال، ۱ تا ۲۰ دقیقه، نیتروژن، ۱ لیتر در دقیقه	<ul style="list-style-type: none"> <li>عدم تغییر رنگ، فعالیت آب، غلظت اسید اسکوربیک و فعالیت آنتی اکسیدانی</li> <li>میزان رطوبت کمتر در طول ذخیره سازی</li> <li>کاهش ۲.۶ log10 در <i>Salmonella typhimurium</i></li> <li>کاهش ۰.۸ log10 در کل هوازی مزوفیل</li> </ul>

### ۱- تأثیر تیمار با پلاسمای سرد بر رنگ

رنگ غذا به طور قابل توجهی بر نحوه درک و پذیرش مصرف کنندگان از محصولات غذایی تأثیر می گذارد. رنگدانه ها (طبیعی یا مصنوعی) و یا واکنش های شیمیایی (غیر آنزیمی یا آنزیمی) از عوامل اصلی تعیین کننده رنگ غذا هستند. هرگونه تغییر نامطلوب در رنگ مواد غذایی در نتیجه فرآوری، می تواند به مانعی عمده برای پذیرش مصرف کنندگان تبدیل شود. تحقیقات نشان داده اند که تیمارهای پلاسمای سرد، بسته به شدت اعمال، تأثیرات متفاوتی بر رنگ میوه ها و سبزیجات تازه دارند. استفاده از پلاسمای سرد بر روی توت فرنگی، کیوی، سیب، گوجه فرنگی گیلانی، کاهو و هویج منجر به کاهش قابل توجهی در رنگ آنها نشد (Bermúdez-Aguirre et al., 2016; Misra et al., 2014a; 2014b; Niemira, 2008; Ramazzina et al., 2015; Ziuza et al., 2016). چندین مطالعه تغییرات جزئی رنگ را پس از تیمار با پلاسمای سرد مشاهده کردند (Wang et al., 2012; Misra et al., 2014a; 2014b). در آزمایشات انجام شده روی زغال اخته، مدت زمان طولانی تر تیمار منجر به به از دست

دادن رنگ شد (Sarangapani et al., 2017a; 2017b; 2017c). همچنین، پس از فراوری با پلاسمای سرد، تغییرات رنگ کلی در آبمیوه‌ها به حداقل رسید و با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نبود (Xu et al., 2017). طبق گزارش امینی و همکاران (۲۰۱۷)، کیفیت زعفران نیز با افزایش ولتاژ ورودی و همچنین با افزودن اکسیژن به محیط کاری کاهش یافت (Amini et al., 2017). برخی تحقیقات نشان می‌دهند که تغییرات رنگ ممکن است به دلیل تجزیه جزئی رنگدانه‌ها از جمله آنتوسیانین‌ها یا کلروفیل‌ها باشد. به‌طور کلی، فراوری پلاسمای سرد تأثیر کمی بر رنگ غذا در دوره‌های تیمار کوتاه‌مدت دارد. نوع محصول (جامد یا مایع، کامل یا برش‌خورده)، پارامترهای فراوری پلاسما (قدرت، زمان، گاز کاری، ولتاژ ورودی) و شرایط ذخیره‌سازی همگی بر رنگ نهایی محصول تأثیرگذار هستند. روش پلاسمای سرد همچنین نشان داده است که می‌تواند جلوه‌های رنگی جذابی را در بسیاری از محصولات غذایی ایجاد کند. مطالعات متعددی این اثرات را تأیید کرده‌اند. به عنوان مثال، تیرومداس و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند که تیمار پلاسما باعث افزایش روشنایی و شاخص سفیدی برنج قهوه‌ای شد (Thirumdas et al., 2016). در آزمایش دیگری، یانگ و همکاران (۲۰۱۷) از پلاسمای سرد برای ایجاد رنگ قرمز در گوشت خوک بدون افزودن نیتريت سدیم استفاده کردند (Yong et al., 2017). آن‌ها موفق به ایجاد رنگ قرمزی قابل مقایسه با استفاده از شرایط خاص فراوری پلاسما بدون نیاز به افزودنی‌های مصنوعی نیتريت شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که پلاسمای سرد نه تنها می‌تواند تأثیرات محدودی بر رنگ محصولات غذایی در کوتاه‌مدت داشته باشد، بلکه قادر است جلوه‌های رنگی مطلوبی را نیز ایجاد کند. به این ترتیب، می‌توان از این روش به عنوان یک فناوری نوین و مؤثر در حفظ و بهبود رنگ مواد غذایی بهره برد.

## ۲- تأثیر تیمار با پلاسمای سرد بر بافت

محصولات غذایی پس از تیمار با پلاسمای سرد بافت خود را حفظ می‌کنند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پس از فراوری با پلاسمای سرد، تفاوت معنی‌داری در بافت میوه‌ها و سبزیجات تازه از جمله توت‌فرنگی، خربزه، سیب و گوجه‌فرنگی گیلان مشاهده نشده است (Misra et al., 2014a; 2014b; Niemira et al., 2008; Tappi et al., 2016; Ziuzina et al., 2016). سارانگاپانی و همکاران ۲۰۱۷ و لاکومبه و همکاران (۲۰۱۷) کاهش فرم و نرمی را در زغال‌اخته پس از فراوری با پلاسمای سرد مشاهده کردند (Sarangapani et al., 2017a; 2017b; 2017c; Lacombe et al., 2017). این نرم شدن به آسیب مکانیکی ناشی از سرعت بالای هوای جت پلاسما و افزایش دما در طول فراوری مرتبط بود. مطالعه‌ای بر روی فراوری پلاسمای سرد توت‌فرنگی در بسته‌بندی‌های جوی اصلاح‌شده نشان داد که محیط با محتوای اکسیژن بالا (۶۵٪ اکسیژن + ۱۶٪ نیتروژن + ۱۹٪ دی اکسید کربن) به حفظ فرم بهتر نسبت به محیط غنی از نیتروژن (۹۰٪ نیتروژن + ۱۰٪ دی اکسید کربن) کمک می‌کند (Misra et al., 2014a; 2014b). بر اساس این مطالعه، گاز پلاسما تأثیر قابل توجهی بر سختی محصولات تصفیه‌شده دارد. حفظ بافت در شرایط اکسیژن بالا افزایش می‌یابد و همچنین فراوری ازن نیز نتایج مشابهی نشان داده است (Runguang, 2011). فرض بر این است که حفظ فرم بهتر به دلیل کاهش سرعت رسیدن به عنوان پاسخ استرس به محیط اکسیژن بالا است. تیمار پلاسمای سرد منجر به کاهش سختی و بهبود قابلیت جویدن حبوبات و غلات شده است (Sarangapani et al., 2016). این یافته‌ها نشان می‌دهند که محصولات تیمار شده با پلاسما به زمان کمتری برای خیساندن و پخت نیاز دارند. میسرا و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که تیمار با پلاسمای سرد منجر به افزایش مدول الاستیک، اوج انتگرال، مدول ویسکوز و همچنین قدرت خمیر می‌شود (Misra et al., 2015). آن‌ها همچنین تأثیر پلاسمای سرد بر ساختار ثانویه چهار پروتئین را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این تکنیک قابلیت‌های منحصربه‌فردی برای سفارشی‌سازی ویژگی‌های ویسکوالاستیک در فراوری اجزای غذایی دارد. این تحقیقات نشان‌دهنده قابلیت بالای تکنیک پلاسمای سرد در بهبود و حفظ ویژگی‌های بافتی مواد غذایی است.

### ۳- تأثیر تیمار پلاسماي سرد بر pH و اسیديته

pH و اسیديته از جمله ویژگی‌های کلیدی هستند که در اکثر غذاهای فرآوری شده به دقت کنترل می‌شوند، زیرا هرگونه تغییر قابل توجه می‌تواند بر مزه، بافت و پایداری نگهداری محصولات تأثیر منفی بگذارد. از سوی دیگر، میوه‌ها و سبزیجات تازه به دلیل تغییرات در فرآیندهای تولید، تنوع گونه‌ای، شرایط محیطی و سایر متغیرها دارای اختلاف‌های قابل توجهی هستند. تیمار پلاسماي سرد بر pH محصولات غذایی تأثیر می‌گذارد (Almeida et al., 2015). رابطه رطوبت با گازهای فعال پلاسما در کنجاله منبع اصلی تغییرات pH و اسیديته پس از تیمار با پلاسما بوده است. فعل و انفعالات گونه‌های پلاسما با آب‌های سطحی اجزای اسیدی را تنها در سطح مواد غذایی جامد تولید می‌کند، اما تأثیرات بر مواد غذایی مایع برجسته‌تر است. به گفته اوهمیچن و همکاران (۲۰۱۰)، علت اسیدی شدن در تیمارهای پلاسماي هوا، تولید اسید نیتریک توسط گونه‌های نیترژن فعال مانند NO است. با این حال، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تیمارهای پلاسماي سرد هیچ تأثیری بر pH مواد غذایی با ظرفیت بافر ندارند (Pankaj et al., 2017; Xu et al., 2017). این نتایج نشان می‌دهند که عواملی مانند فعالیت بیولوژیکی سلول‌های زنده، ظرفیت بافر، یا احتمال خروج مایع از سلول‌های آسیب‌دیده روی سطح می‌توانند تأثیر پلاسما بر pH ماتریس‌های غذایی پیچیده را تعدیل کنند. به این ترتیب، تأثیر تیمار پلاسماي سرد بر pH و اسیديته محصولات غذایی به نوع ماده غذایی، شرایط فرآوری و ویژگی‌های خاص محصول بستگی دارد.

### ۴- تأثیر تیمار پلاسماي سرد بر پروتئین‌ها و آنزیم‌های موجود در ماتریکس مواد غذایی

پژوهشگران متعددی به تحلیل تأثیر تیمار پلاسماي سرد بر پروتئین‌ها و آنزیم‌های موجود در ماتریکس مواد غذایی پرداخته‌اند که تأثیر آن بر آنزیم‌های مهم غذایی در جدول ۲ نشان داده شده است. دناتوره شدن پروتئین توسط پلاسماي سرد می‌تواند به واسطه تعامل گونه‌های فعال پلاسما با اسیدهای آمینه (Li et al., 2014) و همچنین از دست دادن ساختار ثانویه ناشی از کاهش مارپیچ‌های آلفا و ورقه‌های بتا ایجاد شود (Segat et al., 2016). نوع پروتئین، نوع آنزیم، نوع پلاسما، گاز واکنشی، حجم نمونه، پارامترهای فرآوری و محیط آنزیمی همگی می‌توانند بر دناتوره شدن پروتئین و مهار آنزیم توسط پلاسماي سرد تأثیرگذار هستند. آتری و همکاران (۲۰۱۵) اظهار داشته‌اند که اگرچه غیرفعال‌سازی آنزیم می‌تواند ابزار مفیدی برای فرآوری مواد غذایی باشد، اما چالش‌های متعددی از جمله بهبود شرایط فرآوری، افزایش دانش درباره مکانیسم‌های غیرفعال‌سازی، و تأثیر محافظتی بر ترکیبات مختلف غذایی باید مورد توجه قرار گیرد. آلبرتوس و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر پلاسماي سرد بر پروتئین‌های ماهیچه‌ای ماهی خال‌مخالی تازه (fresh mackerel) را بررسی کردند و دریافتند که پلاسماي سرد باعث کاهش آب تثبیت شده در شبکه میوفیبریلار می‌شود (Albertos et al., 2017). در مطالعه‌ای بر روی آرد گندم نیز مشخص شد که گروه‌های سولفیدریل تحت تأثیر اکسیداسیون قرار گرفته و پیوندهای دی‌سولفیدی تشکیل می‌شوند، که این تغییرات به نوبه خود بر ویژگی‌های ساختاری و عملکردی پروتئین تأثیرگذار هستند (Farooq et al., 2023).

جدول ۲- اثر تیمارهای پلاسما بر عدم فعالیت آنزیمی میوه‌ها و سبزیجات

محصول	آنزیم	منبع تولید پلاسما	نتایج
قارچ ( <i>Agaricus bisporus</i> ) (Xu et al., 2017)	سوپراکسید دیسموتاز	جت پلاسما ، ۱۸ کیلو ولت، ۱۰ کیلوهرتز، ۹۸٪ آرگون + ۲٪ اکسیژن، ۵ لیتر در دقیقه	فعالیت SOD در قارچ تیمار شده با پلاسما در طول نگهداری بیشتر بود.
سیب‌های تازه بریده شده (Tappi et al., 2016)	پلی فنل اکسیداز	تخلیه سد دی الکتریک، ۱۵۰ وات، ۱۵+۱۵، ۳۰+۳۰ دقیقه، هوا، ۱.۵ متر بر ثانیه	کاهش قابل توجه در قهوه‌ای شدن سطحی اما نه متناسب با زمان تیمار. اثرات متغیر بر فعالیت PPO اثر کاملاً



وابسته به رقم بود.			
فعالیت باقیمانده پس از تیمار ۱۵+۱۵ و ۳۰+۳۰ دقیقه به ترتیب ۹۱٪ و ۸۲٪ بود.	تخلیه سد دی الکتریک، ۱۵ کیلوولت، ۱۲.۵ کیلوهرتز، ۱۵+۱۵، ۳۰+۳۰ دقیقه، هوا	پراکسیداز	خریزه تازه برش خورده (Tappi et al., 2016)
کاهش خطی فعالیت با زمان تیمار. فعالیت باقیمانده ۸۸٪، ۶۸٪، ۴۲٪ پس از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه تیمار.	تخلیه سد دی الکتریک، ۱۵ کیلو ولت، ۱۲.۷ کیلوهرتز، ۱۰ تا ۳۰ دقیقه، هوا، ۱.۵ متر بر ثانیه	پلی فنل اکسیداز	سیب های تازه بریده شده (Tappi et al., 2014)

##### ۵- تاثیر تیمار با پلاسمای سرد بر کربوهیدرات ها

کربوهیدرات ها به طور قابل توجهی بر حفظ کیفیت محصولات غذایی مختلف تأثیر می گذارند. در مطالعه ای توسط رودریگز و همکاران (۲۰۱۷)، تمام قندهای کاهنده از جمله فروکتوز، گلوکز و ساکارز غیر احیاکننده با فرآیند پلاسمای سرد در آب سیب بادام هندی تجزیه شدند. آنها همچنین نشان دادند که محتوای ساکارز پس از قرار گرفتن طولانی مدت در معرض پلاسمای سرد افزایش یافته است که این افزایش به تجزیه الیگوساکاریدهای پلیمریزه نسبت داده شد (Rodríguez et al., 2017). در پژوهش دیگری، آلمیدا و همکاران (۲۰۱۵)، پس از تیمار آب پرتقال پری بیوتیک با پلاسمای سرد، افزایش مشابهی در ساکارز، کاهش در فروکتوز و تجزیه الیگوساکاریدهای با سطح پلیمریزاسیون بالا مشاهده کردند. براساس تحقیقات روش اولیه تجزیه از نولیز است که منجر به شکستن پیوندهای گلیکوزیدی، دپلیمریزاسیون ماکرومولکول ها و همچنین اکسیداسیون گروه های عاملی برای تولید کربونیل و کربوکسیل، هیدروپراکسیدها، لاکتون ها یا CO<sub>2</sub> می شود (Almeida et al., 2015). تأثیر تیمار پلاسمای سرد بر پلی ساکاریدها در حبوبات و غلات بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. تیرومداس و همکاران (۲۰۱۶) کاهش زمان جوش برنج قهوه ای را کشف کردند که نشان دهنده وجود گروه های عملکردی قطبی در بین دانه های نشاسته است. آنها همچنین مشاهده کردند که سطح ژلاتینه شدن پس از فراوری پلاسما افزایش یافت (Thirumdas et al., 2016). آن ها در مطالعه ای بر روی نشاسته برنج کاهش در دمای چسباندن، دمای ژلاتینه شدن، محتوای آمیلوز، تمایل به رتروگراسیون و همچنین میزان هیدرولیز را کشف کردند. در مجموع، تیمار پلاسمای سرد باعث پلیمریزاسیون و اتصال عرضی نشاسته شد و بر خواص عملکردی، ساختاری و همچنین رئولوژیکی آن تأثیر گذاشت.

##### ۶- تاثیر تیمار با پلاسمای سرد بر ویتامین ها

حساسیت ویتامین ها به تکنیک های مختلف فرآوری برای حفظ خواص تغذیه ای محصولات غذایی بسیار حائز است. در حالی که برخی از ویتامین ها نظیر پیریدوکسین (B6)، ریبوفلاوین (B2) و بیوتین نسبتاً پایدار هستند، سایر ویتامین ها از جمله ویتامین های A، C، E و همچنین تیامین (B1) پایداری کمتری دارند (Dionisio et al., 2009). تحقیقات گسترده ای بر روی تأثیر فرآوری پلاسمای سرد بر پایداری ویتامین C (اسید اسکوربیک) متمرکز شده اند. نتایج نشان داده اند که فرآوری پلاسمای سرد بر میوه ها و سبزیجات خام تغییرات قابل توجهی در میزان اسید اسکوربیک ایجاد نمی کند. به عنوان مثال، هیچ تأثیر قابل توجهی بر اسید اسکوربیک در کاهو، کیوی و جوانه های ترپچه مشاهده نشده است (Ramazzina et al., 2015; Oh et al., 2017). وقتی اسید اسکوربیک تحت تأثیر پلاسما قرار می گیرد، به طور قابل توجهی تخریب نمی شود و تنها خسارات ناچیزی گزارش شده است. از سوی دیگر، برخی تحقیقات نشان داده اند که محتوای ویتامین C در میوه های تازه و آب میوه ها به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. ولتاژ و مدت زمان قرار گرفتن در معرض پلاسما دو عامل کلیدی هستند که تعیین می کنند پلاسما چقدر بر ویتامین C تأثیر می گذارد. ولتاژهای بالا (۸۰ کیلو ولت) ممکن است میزان ویتامین C را افزایش دهند، اما فقط زمانی که برای مدت کوتاهی (۵ دقیقه) استفاده شوند. در حالی که حتی پس از طولانی شدن زمان قرار گرفتن در معرض، کاهش ولتاژ اعمال شده (۲۰-۲۵ کیلو ولت) باعث بهبود میزان ویتامین C (۱۵ تا ۳۰ دقیقه) می شود. مطالعات اندکی به بررسی اثرات پلاسمای سرد بر روی ویتامین های A، B، D و K پرداخته اند و مکانیسم های اصلی همچنان



ناشناخته باقی مانده است. استفاده از پلاسماي تخليه درخشندگی در دوزهای کم (زمان  $\times$  توان پلاسما) منجر به افزایش محتوای پرو-ویتامین A شده است، اما در دوزهای بالاتر تخریب این پرو ویتامین مشاهده شده است. همچنین، سطوح ویتامینهای B3 و B6 طبق گزارشها افزایش یافته‌اند، اما در دوزهای بالاتر هیچ تخریبی مشاهده نشد (Fernandes and Rodrigues, 2021). پس از فراوری پلاسمایی میوه‌ها و سبزیجات خرد شده نیز مقدار اسکوربیک تا ۴ درصد کاهش یافت (Wang et al., 2012). سطوح اسید اسکوربیک در آب پرتقال و آب سیب بادام هندی پس از تیمار پلاسمای سرد کاهش یافت (Xu et al., 2017; Rodríguez et al., 2017). تخریب اسید اسکوربیک در طول فراوری ممکن است به برهمکنش با ازن و سایر گونه‌های اکسید کننده پلاسما نسبت داده شود. تخریب اسید اسکوربیک بسته به نوع نمونه (کامل یا خرد شده)، دوره نگهداری و نوع گاز پلاسما متفاوت است. با این حال، مطالعات بیشتری در مورد تاثیر پلاسمای سرد بر ویتامین‌های مختلف در محصولات غذایی و فرایند تجزیه آنها ضروری است.

#### ۷- تاثیر تیمار با پلاسمای سرد بر لیپیدها

اکسیداسیون لیپیدها در محصولات گوشتی به دلیل تغییرات نامطلوب در رنگ، طعم، بو و ماندگاری، چالشی اساسی محسوب می‌شود. لادیکوس و همکاران (۱۹۹۰) اکسیداسیون لیپیدها را فرآیندی پیچیده و شامل واکنش‌های زنجیره‌ای رادیکال آزاد توصیف کرده‌اند که منجر به تولید پراکسیدهای آسیل چرب و سایر محصولات اکسیداسیون می‌شود. به منظور ارزیابی اکسیداسیون لیپیدها، ترکیبات واکنش دهنده اسید تیوباربیتوریک (TBARS) و مقدار پراکسید (PV) به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به پیچیدگی فرآیند اکسیداسیون لیپیدها، بررسی اثرات این فرآیند بر لیپیدهای موجود در مواد غذایی گوشتی ضروری است (Ladikos et al., 1990). چوی و همکاران (۲۰۱۶) هیچ تأثیر معناداری از فراوری پلاسمای سرد بر اکسیداسیون لیپیدها در گوشت تازه و منجمد خوک، گوشت گاو و گوشت خام خوک مشاهده نکردند (Choi et al., 2016). با این حال، جاسنا و همکاران (۲۰۱۵) بهبود در اکسیداسیون لیپیدها را پس از تیمار ۱۰ دقیقه‌ای گوشت تازه خوک و گاو گزارش کردند (Jayasena et al., 2015). در مقابل، افزایش اکسیداسیون لیپیدها در گوشت خوک پس از قرار گرفتن در معرض گاز پلاسما حاوی اکسیژن مشاهده شد. تحقیقات آلبرتوس و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که تیمار پلاسمای سرد به طور قابل توجهی اکسیداسیون لیپیدها را در نوارهای ماهی خال مخالی تازه افزایش می‌دهد (Albertos et al., 2017). آنها افزایش مقدار پراکسید از ۶.۸۹ به ۳۷.۵۷ meq اکسیژن فعال/کیلوگرم لیپید و افزایش دی‌ان‌ها از ۱.۴۲ به ۵.۵۶ میلی‌مول هیدروپراکسید بر کیلوگرم پس از فراوری پلاسما در ۸۰ کیلو ولت به مدت ۵ دقیقه گزارش کردند. همچنین کاهش سطوح اسید اولئیک (C18:1، n-9) یا ایکوزاپنتانوئیک اسید (C20:5، n-3) پس از فراوری پلاسما مشاهده شد. سارنگاپانی و همکاران (۲۰۱۷) طی مطالعات مختلفی نشان دادند که اکسیداسیون لیپیدهای پلاسمای سرد می‌تواند منجر به تولید آلدئیدها (هگزanal، پنتنال، اوزونیدها، نونanal، یا نونال)، اسیدهای کربوکسیلیک (نانانوئیک اسید، ۹-اکسونانوئیک اسید، اکتانوئیک اسید) و هیدروپراکسیدها (۹- و ۱۳-هیدروپراکسی-اکتادکادینویل گلیسرول) در ماتریس‌های چربی گوشت گاو و لبنیات شود (Sarangapani et al., 2017a; 2017b; 2017c). با توجه به تعداد محدود تحقیقات پیرامون تأثیر پلاسمای سرد بر لیپیدها در غذاهای مختلف، مدت زمان تیمار و نوع گاز پلاسما به عنوان عوامل کلیدی مؤثر بر اکسیداسیون لیپیدها شناسایی شده‌اند. ییز و کینر (۲۰۱۶) عملکرد منحصر به فردی برای تیمار پلاسمای سرد گزارش کردند که نشان می‌دهد پلاسمای هیدروژنی می‌تواند بدون تولید اسیدهای چرب ترانس، روغن سویا را تا حدی هیدروژنه کند (Yepez and Keener., 2016). کنیک‌های پلاسمای سرد نسبت به روش‌های هیدروژناسیون معمولی مزایای متمایزی دارند، زیرا می‌توانند در دمای محیط و فشار اتمسفر و بدون نیاز به کاتالیزور انجام شوند. این روش اگرچه به عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای هیدروژناسیون کاتالیستی استاندارد مطرح است، اما به مطالعات بیشتری جهت بهبود فرآیند تصفیه و ارزیابی عملکرد روغن نیمه‌هیدروژنه تولید شده از پلاسمای سرد نیاز است.

#### ۸- تأثیر تیمار با پلاسمای سرد بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی

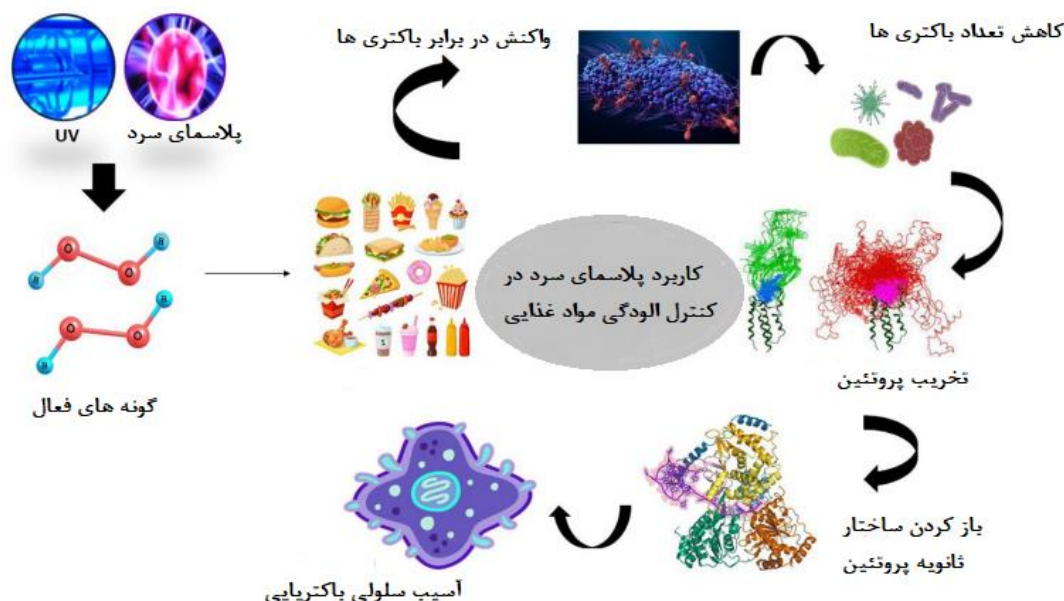
فعالیت آنتی‌اکسیدانی مواد غذایی به‌طور عمده مرتبط با حضور فلاونوئیدها، پلی‌فنول‌ها و فلاونول‌های مختلف آن است که نقش اساسی در ویژگی‌های کیفی محصولات غذایی ایفا می‌کنند. خواص ردوکس ترکیبات فنلی، از جمله توانایی آنها در خنثی‌سازی اکسیژن تک‌اتمی

و کلاته کردن فلزات واسطه، احتمالاً مسئول اثرات آنتی اکسیدانی آنهاست (Hajian-Tilaki et al., 2024). روش‌های ارزیابی فعالیت آنتی اکسیدانی نظیر ظرفیت جذب رادیکال اکسیژن (ORAC)، فعالیت مهار رادیکال ۳-اتیل بنزوتیازولین-۶-سولفونیک اسید (ABTS)، توانایی احیاکنندگی آهن در سنجش پلاسما (FRAP) و فعالیت مهار ۲،۲ دی فنیل-۱-پیکریل-هیدرازیل (DPPH) به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. تأثیر تیمار با پلاسما سرد بر محتوای فنل کل مواد غذایی نتایج متنوعی را نشان داده است. کاهش محتوای فنل کل در آب انگور سفید و آب پرتقال گزارش شده است (Pankaj et al., 2017; Grzegorzewski et al., 2017). در مقابل، افزایش قابل توجهی در فنل‌های آب سیب بادم هندی با زغال‌اخته مشاهده شد (Sarangapani et al., 2016). همچنین در مطالعه‌ای هیچ تغییر قابل توجهی در محتوای فنل سیب گزارش نشده است (Ramazzina et al., 2016). این تفاوت‌ها نشان‌دهنده نیاز به تحقیقات بیشتر برای درک دقیق اثرات مولکولی پلاسما سرد بر پلی‌فنول‌ها است. برخی از مطالعات پس از تیمار با پلاسما سرد هیچ تغییر قابل توجهی در قابلیت آنتی اکسیدانی جوانه تربچه، کیوی و کاسنی قرمز مشاهده نکردند (Oh et al., 2017; Ramazzina et al., 2015; Kim et al., 2017)، در صورتی که کاهش قابلیت آنتی اکسیدانی در آب انگور سفید، سیب و آب سیب بادم هندی پس از تیمار طولانی مدت با پلاسما سرد گزارش شده است (Pankaj et al., 2017; Rodríguez et al., 2017). آلمیدا و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که تیمار با پلاسما غیرمستقیم هیچ اثر قابل توجهی بر قابلیت آنتی اکسیدانی آب پرتقال پری بیوتیک نداشت، اما تیمار با پلاسما مستقیم موجب کاهش آن شد (Almeida et al., 2015). این مطالعات نشان می‌دهند که اثرات پلاسما سرد بر فعالیت آنتی اکسیدانی مواد غذایی به عواملی نظیر نوع ماده غذایی، روش قرارگیری در معرض، منبع تولید پلاسما و پارامترهای فرآیندی بستگی دارد. پلاسما سرد به عنوان یک روش غیرحرارتی و نوآورانه در فرآوری مواد غذایی پتانسیل بالایی دارد. اختلافات موجود در نتایج مطالعات ضرورت انجام تحقیقات برای درک تعاملات بین گونه‌های واکنش پذیر پلاسما و اجزای غذایی را برجسته می‌سازد. همچنین، به منظور کاهش اثرات نامطلوب بر کیفیت مواد غذایی نظیر اکسیداسیون سریع لیپیدها، از دست رفتن ویتامین‌ها و تغییرات در خواص حسی، بهینه‌سازی فرآیند ضروری است. تسلط کامل بر مکانیزم‌های عمل و کنترل دقیق ویژگی‌های کیفی برای بهره‌برداری کامل از فناوری پلاسما سرد در مقیاس تجاری الزامی است.

## کاربردهای پلاسما سرد در فرآوری مواد غذایی

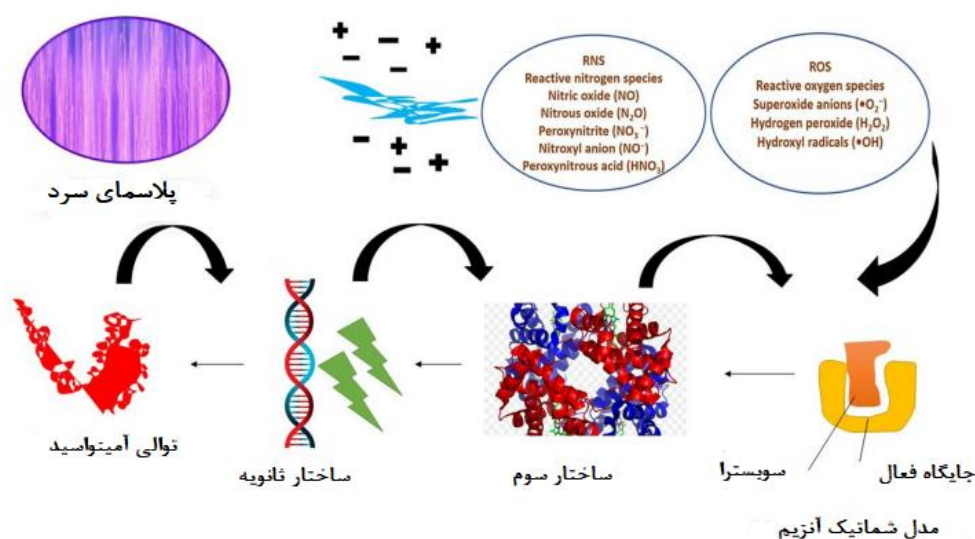
### ۱- اثر غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها بر روی سطوح میوه و سبزیجات

پلاسما سرد به دلیل توانایی ایجاد یک محیط یونیزه و فعال، که با استفاده از یک منبع انرژی در شرایط دما و فشار معین حفظ می‌شود، برای فرآوری مواد حساس به گرما مانند میوه‌های تازه، مایعات و بافت‌های زیستی زنده بسیار مناسب است (Anbarasan et al., 2022). در سال‌های اخیر شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی (MD) تاثیر گونه‌های فعال مختلف را بر اجزای دیواره سلولی باکتری‌ها و همچنین اندوتوکسین‌ها مشخص کرده‌اند (Neyts et al., 2015; Yusupov et al., 2012). مکانیسم آلودگی‌زدایی پلاسما سرد در فرآوری مواد غذایی در شکل ۳ نشان داده شده است (Farooq et al., 2023).



شکل ۳- مکانیسم آلودگی زدایی پلاسمای سرد در فرآوری مواد غذایی

بیشترین کاربرد پلاسمای سرد در صنایع غذایی به دلیل واکنش های متنوع آن با گونه های فعال اکسیژن (Reactive Oxygen Species, ROS) و گونه های فعال نیتروژن (Reactive Nitrogen Species, RNS) است. این واکنش ها شامل رادیکال های هیدروکسیل (OH)، سوپراکسید ( $O_2^-$ )، اتم های اکسیژن برانگیخته، اکسید نیتروژن (NO)، آب اکسیژنه ( $H_2O_2$ ) و ازن ( $O_3$ ) می باشد (Niemira, 2014). این گونه های فعال نقش مهمی در غیرفعال سازی میکروارگانیسم ها بر روی سطوح میوه ها و سبزیجات ایفا می کنند، بدون اینکه به کیفیت و تازگی این محصولات آسیب برسانند. تاثیرات این گونه های فعال اکسیژن و نیتروژن بر پلاسمای سرد در شکل ۴ نشان داده شده است (Farooq et al., 2023).



شکل ۴- تاثیر ROS و RNS بر پلاسمای سرد

بر اساس مطالعات، پلاسمای سرد یکی از موثرترین راهکارها برای غیرفعال کردن بسیاری از باکتری‌های مضر موجود در مواد غذایی است. پلاسمای سرد باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی را به روش‌های مختلفی غیرفعال می‌کند (Han et al., 2016). نشان داده شده است که باکتری‌های گرم مثبت مانند استافیلوکوکوس اورئوس اغلب از طریق اختلال درون سلولی و آسیب به دیواره سلولی غیرفعال می‌شوند، در حالی که باکتری‌های گرم منفی مانند اشریشیا کلی عمدتاً از طریق جهش‌های DNA و نشت سلولی از بین می‌روند. اثربخشی تیمار پلاسما برای انواع مواد غذایی و گونه‌های میکروبی در مطالعات مختلف ثابت شده است (Athukorala et al., 2009; Min et al., 2017). عوامل مختلفی مانند نوع بستر و ویژگی‌های میکروارگانیسم هدف، کارایی پلاسما را تعیین می‌کنند. استفاده از پلاسمای سرد در مواد غذایی مانند گوجه فرنگی گیلانی (Misra et al., 2014a)، سیب (Bußler et al., 2017)، کیوی (Ramazzina et al., 2015)، خربزه (Tappi et al., 2016)، برگ کاهو (Min et al., 2017)، زغال اخته (Sarangapani et al., 2016)، و برگ کاسنی (Pasquali et al., 2016) گزارش شده است که باعث افزایش ماندگاری آن‌ها می‌شود. این فناوری به ویژه برای مواد غذایی حساس به حرارت مفید است زیرا دمای آن نزدیک به دمای محیط است. کاربردهای مختلف فناوری پلاسمای سرد برای حفظ یا بهبود کیفیت و ایمنی میوه‌ها و سبزیجات در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- کاربرد پلاسمای سرد بر روی میکروارگانیسم‌های میوه‌ها و سبزیجات مختلف

مواد غذایی	منبع تولید پلاسما	میکروارگانیسم‌ها	یافته‌های اصلی
توت فرنگی تازه و اسفناج (Ziuzina et al., 2020)	پلاسمای سرد اتمسفری، ۹۰۰ وات، ۵، ۷، ۱۰، ۱۳، ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۷ دقیقه از ۰، ۱۰۰ کیلو ولت	<i>E. coli</i> <i>L. innocua</i>	کاهش $\log_{10}$ CFU/ml با تیمار مداوم علیه <i>L. innocua</i> تلقیح شده روی توت فرنگی به دست آمد.
کیفیت آب زغال اخته (Hou et al., 2019)	جت پلاسمای سرد، ۱۰۰۰ هرتز، ۲، ۴، ۶ دقیقه، آرگون (Ar) و اکسیژن ( $O_2$ ) ۱۱ کیلوولت ۱ لیتر	<i>Bacillus spp.</i>	افزایش طول مدت تیمار و غلظت $O_2$ منجر به افزایش قابل توجهی در مرگ باسیلوس شد. تیمار CP به میزان قابل توجهی غلظت فنولیک‌ها را در مقایسه با عملیات حرارتی افزایش داد و همچنین به آب زغال اخته کمک کرد رنگ طبیعی خود را حفظ کند.
تکه‌های سیب از انواع مختلف (Pink Lady, Fuji, Red Delicious, Modi) (Tappi et al., 2019)	پلاسمای سرد، ۱۵۰ وات ۳۰ و ۶۰ دقیقه ۱۵۰ وات	<i>E. coli</i>	کاهش قابل توجه قهوه‌ای شدن سطحی در همه ارقام مشاهده شد اما نه دائماً متناسب با زمان تیمار. پارامترهای بافتی تنها در سیب رد دلشیز تحت تأثیر تیمارهای پلاسما قرار گرفتند
گوجه فرنگی (Prasad et al., 2017)	پلاسمای سرد اتمسفری، ۵۰ هرتز، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، ۱۵ و ۶۰ کیلو ولت	<i>E. coli</i>	بیشترین کاهش شش $\log$ CFU mL <sup>-1</sup> در جمعیت <i>E. coli</i> پس از ۱۵ دقیقه تیمار در ۶۰ کیلو ولت به دست آمد که تا مدت زمان ذخیره سازی ۴۸ ساعت ادامه داشت.
کاهو رومی (Bulk romain lettuce) (Min et al., 2016)	پلاسمای سرد اتمسفری، صفر و ۲۴۰۰ هرتز، ۱۰ دقیقه هوای اتمسفری ۴۲.۶ کیلو ولت	<i>E. coli</i>	کاهش بیشتر ( $\log$ CFU/g ۱.۱) کاهو) در لایه بالایی مشاهده شد، اما تکان دادن ظرف یکنواختی مهار را افزایش داد. این تیمار تغییر قابل توجهی در مورفولوژی سطح، رنگ، سرعت تنفس یا کاهش وزن نمونه‌ها ایجاد نکرد.
بادام زمینی (Devi et al., 2017)	پلاسمای سرد، ۱۳.۵۶ مگاهرتز ۴۰ و ۶۰ وات در صفر تا ۳۰ دقیقه هوای اتمسفری ۱۵۰۰ و ۱۹۵۰ ولت	<i>A. fustus and A. parasiticus</i>	نتایج نشان داد که غشای اسپور قارچی به دلیل الکتروپوراسیون (electroporation) و اچینگ (etching) ناشی از گونه‌های فعال پلاسما به طور کامل تخریب شد. در نمونه‌های تیمار شده با پلاسما به مدت ۱۵ دقیقه در توان ۴۰ وات و ۱۲ دقیقه در توان ۶۰ وات،

به ترتیب بیش از ۷۰٪ و ۹۰٪ کاهش در محتوای آفلاتوکسین B1 مشاهده گردید.			
هیچ تغییر معناداری در Brix یا pH مشاهده نشد، مقدار ویتامین C در هوا ۲۲٪ کاهش یافته است، فعالیت PME در هوا به میزان ۷۴٪ و در MA65 ۸۲٪ کاهش یافته است. حداکثر اختلاف رنگ کل کمتر از ۱.۲ است.	<i>Salmonella enterica</i>	air/MA65 DBD (با ترکیب ۶۵٪ اکسیژن، ۳۰٪ دی اکسید کربن و ۵٪ نیتروژن)، با ولتاژ ۹۰ کیلوولت و زمان تیمار بین ۳۰ تا ۱۲۰ ثانیه.	آب پرتقال (Xu et al., 2017)

## ۲- تاثیر تیمار پلاسما بر عدم فعالیت آنزیمی میوه ها و سبزیجات

آنزیم های اندوژنیک می توانند به فرآیند قهوه ای شدن میوه ها و سبزیجات کمک کنند (Tappi et al., 2016; Han et al., 2019). استفاده از پلاسمای سرد به عنوان یک روش مؤثر برای غیرفعال سازی این آنزیم ها به منظور کاهش قهوه ای شدن مورد توجه قرار گرفته است. هان و همکاران (۲۰۱۹)، پراکسیداز ترب کوهی (HPR) را با استفاده از یک جت پلاسمای تحت فشار اتمسفر تیمار کرد و مشاهده کرد که تغییر ساختار و تغییر شکل ریزساختار آنزیم باعث کاهش فعالیت باقی مانده HRP به حدود ۱۷٪ شد (Han et al., 2019). بوسلر و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بهره گیری از مشعل پلاسمای مایکروویو، به غیرفعال سازی مؤثر فعالیت آنزیم های پراکسیداز (POD) و پلی فنل اکسیداز (PPO) در سیب زمینی و سیب تازه برش خورده پرداختند. فعالیت PPO در بافت سیب تازه و سیب زمینی پس از ۱۰ دقیقه تیمار به ترتیب حدود ۶۲٪ و ۷۷٪ کاهش یافت. همچنین، فعالیت POD در این نمونه ها به ترتیب حدود ۶۵٪ و ۸۹٪ کاهش نشان داد (Bußler et al., 2017). تاپی و همکاران (۲۰۱۴) از DBD برای تیمار سیب های تازه برش خورده به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه استفاده کردند و مشاهده کردند که با افزایش مدت زمان تیمار، توانایی باقی مانده PPO به صورت خطی تا حدود ۴۲٪ کاهش می یابد. در تحقیق دیگری، تاپی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که خربزه تازه برش خورده پس از تیمار با پلاسما، کاهش قابل توجهی در فعالیت آنزیم های پلی متیل استراز (PME) و پراکسیداز (POD) داشت (Tappi et al., 2016).

## ۳- کینیتیک غیر فعال سازی فناوری پلاسما

فناوری پلاسما روشی مؤثر جهت کنترل واکنش های قهوه ای شدن نامطلوب در مواد غذایی تازه بریده شده و خشک است که باعث برای افزایش طول عمر و کیفیت حسی و تغذیه ای محصولات می شود (Mir et al., 2016; Tappi et al., 2016). فعالیت آنزیمی میوه های تازه پس از برش، با استفاده از پلاسما، قابل مهار است و این فرایند تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی قرار دارد. مدل سازی کینیتیکی پیش بینی کننده یکی از ابزارهای قدرتمند و موثر در تعیین شرایط بهینه فرآوری است که به منظور دستیابی به سطح مطلوب غیرفعال سازی میکروبیولوژیکی یا آنزیمی جهت تضمین ایمنی و پایداری محصولات غذایی به کار می رود. مدل کینیتیک اولیه (First-order kinetics)، که معمولاً برای توضیح غیرفعال سازی آنزیم ها تحت تأثیر گرما استفاده می شود (معادله ۱) (Anthon and Barrett, 2002)، توانسته است در مطالعات مختلفی از جمله استفاده از تکنیک های غیرحرارتی مانند PEF (Giner et al., 2000)، HPP (Terefe et al., 2010)، نور ماوراءبنفش (Neves et al., 2012) و التراسونیک (Cruz et al. 2006) با موفقیت کاربرد داشته باشد.

$$-k_t = A_t/A_0$$

(معادله ۱)

در معادله فوق  $A_0$  فعالیت آنزیمی اولیه است،  $A_t$  فعالیت در زمان  $t$  (s) و  $k$  ( $s^{-1}$ ) ثابت سرعت غیرفعال سازی است.

اما برای غیرفعال سازی پراکسیداز توسط پلاسما سرد، مشاهده شده است که رویکرد کینیتیک اولیه موثر نیست و غیرفعال سازی به صورت یک معادله لجستیک سیگموئیدال اتفاق می افتد (معادله ۲).



$$A = (100 - A_{\min}) / (1 + (t/t_{50})^p) + A_{\min} \quad (\text{معادله ۲})$$

در معادله فوق  $t_{50}$  زمانی است که در آن نیمی از فعالیت پیک اتفاق می‌افتد،  $A_{\min} (\geq 0)$  حداقل مقداری است که تابع لجستیک می‌تواند به دست آورد و  $p$  توان است.

مطالعات نشان داده است که غیرفعال‌سازی پراکسیداز توسط پلاسما در توت‌فرنگی به‌صورت سیگموئیدال رخ می‌دهد (Misra, 2014b). با توجه نتایج گزارش شده توسط (Pankaj et al., 2013; Surowsky et al., 2014)، وقوع اشکال مختلف آنزیم پس از تیمارهای گسترده را می‌توان به وجود انواع متعددی از آنزیم نسبت داد که به احتمالاً ناشی از تجمع مونومرها به اشکال پیچیده‌تر با مقاومت بیشتر در برابر پلاسما سرد است. داده‌های غیرفعال‌سازی برای آلکالین فسفاتاز به بهترین نحو توسط مدل ویبول (Weibull) توضیح داده می‌شوند، در حالی که مدل‌های سیگموئیدی عموماً توضیح مناسبی برای غیرفعال‌سازی PPO و POD ارائه کرده‌اند (Segat et al., 2016). بر اساس گفته‌های لیو و همکاران (۲۰۱۶)، ساختار مولکولی آنزیم، انتقال جرم بین فاز گازی و مایع و همچنین محیط اطراف آنزیم (مانند بافر یا ماتریکس سلولی) از عوامل اصلی تأثیرگذار بر غیرفعال‌سازی آنزیم هستند (Liu et al., 2016). دانشمندان علوم غذایی معمولاً از مدل‌های کینتیکی و تجربی استفاده می‌کنند، اما این مدل‌ها تصویر واضحی از فرآیندهای بنیادی ارائه نمی‌دهند. شبیه‌سازی‌های داکینگ مولکولی می‌تواند برای بررسی فعالیت گونه‌های واکنشی مهم بر روی آنزیم‌های غذایی، تعاملات مولکولی آن‌ها و تأثیرات محیط ماتریکس غذایی مفید باشد (Ali et al., 2016).

#### ۴- پلاسمای سرد برای تخریب سموم و آفت‌کش‌ها

در حال حاضر پلاسمای سرد به عنوان یک ابزار امیدوارکننده برای تجزیه مواد شیمیایی سمی موجود در مواد غذایی مورد توجه قرار می‌گیرد. این مواد شامل گواتروژن‌ها، مهارکننده‌ها، ساپونین‌ها، تربپسین و لکترین‌ها می‌باشند، که بطور طبیعی در برخی از مواد غذایی وجود دارند. همچنین، سمومی نظیر مایکوتوکسین‌ها، مختل‌کننده‌های غدد درون‌ریز، و آفت‌کش‌ها نیز در سیستم‌های مختلف غذا و آب یافت می‌شوند که می‌توانند برای سلامت و ایمنی مصرف‌کننده‌ها خطرناک باشند. پلاسمای سرد با استفاده از تولید رادیکال‌های اکسیژنی و نیتروژنی، به ویژه ROS (رادیکال‌های اکسیژنی فعال) و RNS (رادیکال‌های نیتروژنی فعال)، قادر به تجزیه و حذف این مواد مضر است. به عنوان مثال این فناوری می‌تواند بقایای آفت‌کش‌ها را از روی سطوح مختلف غذاها و سبزیجات حذف یا کاهش دهد (Pandiselvam et al., 2022; Sarangapani et al., 2016). کارایی فرآیند تجزیه پلاسمای سرد در نابودی مایکوتوکسین‌ها و آفت‌کش‌ها، به شدت به غلظت گونه‌های واکنشی و نوع تولید پلاسما وابسته است. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که غذاهای مختلف با استفاده از روش پلاسمای سرد با موفقیت از بقایای آفت‌کش‌ها پاک‌سازی شده‌اند (Misra et al., 2014a; 2014b; Sarangapani et al., 2017a; 2017b; 2017c; Misra, 2015). مدت زمان نوردهی (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ ثانیه)، فاصله (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ سانتی‌متر)، قدرت تخلیه از مرکز سیم پیچ القایی، (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ وات) و سطوح آفت‌کش‌های ارگانوفسفره همگی بر کارایی تجزیه تأثیر دارند. تحقیقات نشان داده‌اند که حشره‌کش‌های حاوی ارگانوفسفره ممکن است به ترکیبات کم‌ضررتری نسبت به مولکول اولیه حشره‌کش تجزیه شوند که این موضوع می‌تواند برای بهبود سلامتی عمومی بسیار مفید باشد. باکتری‌های گرم منفی مانند استرپتوکوکوس، مخمرها و کپک‌ها از میکروارگانیسم‌های مولد فساد در شیر شناخته شده‌اند.

#### ۵- میکروب زدایی شیر توسط پلاسمای سرد

باکتری‌های گرم منفی مانند استرپتوکوکوس، مخمرها و کپک‌ها از میکروارگانیسم‌های مولد فساد در شیر شناخته شده‌اند. فرآیندهای حرارتی مانند پاستوریزاسیون و استریلیزاسیون در حال حاضر برای کنترل این میکروارگانیسم‌ها در صنعت استفاده می‌شوند. با این حال، این روش‌ها علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، نمی‌توانند به طور کامل بار میکروبی شیر را از بین ببرند. علاوه بر این، این فرآیندها منجر به تغییرات در ساختار و خواص آروماتیک شیر می‌شوند. به عنوان مثال، در شیر پاستوریزه، ویتامین C و B1 (تیامین) تا حدود ۱۰-



۲۵٪ از بین می‌روند و ویتامین B2 (ریبوفلاوین) نیز جزئیاً کاهش می‌یابد. همچنین، تیمارهای حرارتی تأثیر چشمگیری بر طعم شیر دارند، مانند افزایش طعم پختگی به دلیل آزاد شدن گروه‌های سولفیدریل. استرلیزاسیون نیز باعث کاهش ارزش بیولوژیکی پروتئین شیر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پلاسمای سرد برای نابودی میکروارگانیسم‌های شیر، بهتر از فرآیندهای حرارتی است. پلاسمای حاصل از ترکیب گازهای اکسیژن و نیتروژن با گاز حامل هلیوم، بهبود قابل توجهی در اثر آنتی باکتریال دارد که نسبت به پلاسمای هلیوم خالص یا ترکیبات دیگر دیده شده است. ترکیب این گازها در پلاسمای طیف گسترده‌تری از رادیکال‌های آزاد را تولید می‌کند که منجر به افزایش کارایی در نابودی میکروارگانیسم‌ها می‌شود (نیکمرام، ۱۳۹۱).

## ۵- آلودگی زدایی سطحی از تخم مرغ

تنوع گونه‌های سالمونلا در تخم مرغ به عنوان یک خطر پتانسیلی برای مصرف‌کنندگان شناخته شده است. منابع علمی مختلف، راهکارهای غیرحرارتی متعددی را برای آلودگی زدایی از پوسته تخم مرغ پیشنهاد می‌دهند. این راهکارها شامل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) نظیر تکنولوژی پالس‌های نوری، استفاده از ازن، اشعه ماورابنفش، و الکترولیز آب با pH اسیدی شده می‌شوند (Fuhrmann et al., 2010). این روش‌ها به دلیل ناتوانی تکنیک‌های سنتی در پاکسازی موثر سطوح پوسته تخم مرغ مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از پرکاربردترین روش‌های غیرحرارتی برای آلودگی زدایی از سطوح پوسته تخم مرغ، استفاده از پلاسمای تخلیه سد مقاومتی (Resistive Barrier Discharge, RBD) است. این روش منجر به کاهش ۲.۲ تا ۲.۵ سیکل لگاریتمی از تعداد سالمونلا انتریتیدیس (*Salmonella enteritidis*) پس از ۶۰ تا ۹۰ دقیقه تیمار در شرایط رطوبت نسبی ۳۵٪ روی پوسته تخم مرغ شده است (Ragni et al., 2010).

## منابع

- Pandiselvam R, Sunoj S, Manikantan MR, Kothakota A, Hebbar KB (2017). Application and kinetics of ozone in food preservation. *Ozone: Science & Engineering*. 39(2), 115–126.
- Stranska M, Prusova N, Behner A, Dzuman Z, Lazarek M, Tobolkova A, Chrpova J, Hajslova J (2023). Influence of pulsed electric field treatment on the fate of Fusarium and Alternaria mycotoxins present in malting barley. *Food Control*. 145: 109440.
- Singh H, Blennow A, Gupta AD, Kaur P, Dhillon B, Sodhi NS, Dubey PK (2022). Pulsed light, pulsed electric field and cold plasma modification of starches: technological advancements & effects on functional properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 16: 1–18.
- Tiwari BK, O'Donnell CP, Cullen PJ (2009). Effect of non-thermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices. *Trends Food Sci Technol*. 20(3–4):137–145.
- Ucar Y, Ceylan Z, Durmus M, Tomar O, Cetinkaya T (2021). Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. *Trends in Food Science & Technology*. 114: 355–371.
- Rao, W., Li, Y., Dhaliwal, H., Feng, M., Xiang, Q., Roopesh, M. S., ... & Du, L. (2023). The application of cold plasma technology in low-moisture foods. *Food Engineering Reviews*. 15(1), 86-112
- Farooq S, Dar AH, Dash KK, Srivastava S, Pandey VK, Ayoub WS, ... & Kaur M (2023). Cold plasma treatment advancements in food processing and impact on the physicochemical characteristics of food products. *Food Science and Biotechnology*, 32(5), 621-638.
- Kong MG & Shama G (2014). Cold Atmospheric Gas Plasmas (Encyclopedia of Food Microbiology Second Edition).
- Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: a review. *Foods*. 7, 4.
- Niemira BA (2014). Decontamination of foods by cold plasma. In: *Emerging technologies for food processing* (pp. 327-333). Academic Press.
- Misra NN, Tiwari BK, Raghavarao KSM, & Cullen PJ (2011). Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Engineering Reviews*, 3, 159-170.
- Scholtz V, Pazlarova J, Souskova H, Khun J, & Julak J (2015). Nonthermal plasma—A tool for decontamination and disinfection. *Biotechnology Advances*, 33(6), 1108–1119.
- Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., & Cheng, J. H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in Food Science & Technology*. 69, 46–58.

- Surowsky, B., Froehling, A., Gottschalk, N., Schlüter, O., & Knorr, D. (2014). Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: Inactivation kinetics and mechanisms. *International Journal of Food Microbiology*. 174, 63–71.
- Muhammad, A. I., Xiang, Q., Liao, X., Liu, D., & Ding, T. (2018). Understanding the impact of nonthermal plasma on food constituents and microstructure - a review. *Food and Bioprocess Technology*. 11, 463–486.
- Xu, L., Garner, A. L., Tao, B., & Keener, K. M. (2017). Microbial inactivation and quality changes in orange juice treated by high voltage atmospheric cold plasma. *Food and Bioprocess Technology*. 10, 1–33.
- Pankaj, S. K., Wan, Z., Colonna, W., & Keener, K. M. (2017). Effect of high voltage atmospheric cold plasma on white grape juice quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 97, 4016–4021.
- Ramazzina, I., Berardinelli, A., Rizzi, F., Tappi, S., Ragni, L., Sacchetti, G., & Rocculi, P. (2015). Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwi fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 107, 55–65.
- Sarangapani, C., O'Toole, G., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2017a). Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 44, 235–241.
- Sarangapani, C., Ryan Keogh, D., Dunne, J., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2017b). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food Chemistry*. 235, 324–333.
- Sarangapani, C., Yamuna Devi, R. Y., Thirumdas, R., Trimukhe, A. M., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017c). Physico-chemical properties of low pressure plasma treated black gram. *LWT – Food Science and Technology*. 79, 102–110.
- Oh, Y. J., Song, A. Y., & Min, S. C. (2017). Inhibition of *Salmonella typhimurium* on radish sprouts using nitrogen-cold plasma. *International Journal of Food Microbiology*. 249, 66–71.
- Bermúdez-Aguirre, D., Corradini, M. G., Candoğan, K., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2016). High pressure processing in combination with high temperature and other preservation factors. In *High Pressure Processing of Food: Principles, Technology and Applications* (pp. 193–215).
- Misra, N. N., Keener, K. M., Bourke, P., Mosnier, J. P., & Cullen, P. J. (2014a). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 118, 177–182.
- Misra, N. N., Patil, S., Moiseev, T., Bourke, P., Mosnier, J. P., Keener, K. M., & Cullen, P. J. (2014b). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries. *Journal of Food Engineering*. 125, 131–138.
- Niemira, B. A., & Sites, J. (2008). Cold plasma inactivates *Salmonella Stanley* and *Escherichia coli* O157: H7 inoculated on golden delicious apples. *Journal of Food Protection*, 71(7), 1357–1365.
- Ziuzina, D., Misra, N. N., Cullen, P. J., Keener, K., Mosnier, J. P., Vilaró, I., Gaston, E., & Bourke, P. (2016). Demonstrating the potential of industrial scale in-package atmospheric cold plasma for decontamination of cherry tomatoes. *Plasma Medicine*, 6, 397–412.
- Wang, R., Nian, W., Wu, H., Feng, H., Zhang, K., Zhang, J., Zhu, W., Becker, K., & Fang, J. (2012). Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: inactivation and physicochemical properties evaluation. *European Physical Journal D*, 66, 1–7.
- Amini, M., Ghoranneviss, M., & Abdijadid, S. (2017). Effect of cold plasma on crocin esters and volatile compounds of saffron. *Food Chemistry*, 235, 290–293.
- Thirumdas, R., Saragapani, C., Ajinkya, M. T., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2016). Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 53–60.
- Yong, H. I., Lee, S. H., Kim, S. Y., Park, S., Park, J., Choe, W., & Jo, C. (2017). Color development, physicochemical properties, and microbiological safety of pork jerky processed with atmospheric pressure plasma. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 53, 78–84.
- Tappi, S., Gozzi, G., Vannini, L., Berardinelli, A., Romani, S., Ragni, L., & Rocculi, P. (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 33, 225–233.
- Lacombe, A., Niemira, B. A., Gurtler, J. B., Sites, J., Boyd, G., Kingsley, D. H., & Chen, H. (2017). Nonthermal inactivation of norovirus surrogates on blueberries using atmospheric cold plasma. *Food Microbiology*. 63, 1–5.
- Runguang, Z. (2011). Effect of ozone treatment on the quality of strawberry fruit during storage. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 7, 19–22.
- Almeida, F. D. L., Cavalcante, R. S., Cullen, P. J., Frias, J. M., Bourke, P., Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2015). Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 127–135.
- Li, Y., Kojtari, A., Friedman, G., Brooks, A. D., Fridman, A., & Ji, H. F. (2014). Decomposition of L-valine under nonthermal dielectric barrier discharge plasma. *Journal of Physical Chemistry B*, 118, 1612–1620.
- Segat, A., Misra, N. N., Cullen, P. J., & Innocente, N. (2016). Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase. *Food and Bioprocess Processing*. 98, 181–188.

- Albertos, I., Martín-Diana, A. B., Cullen, P. J., Tiwari, B. K., Ojha, S. K., Bourke, P., Álvarez, C., & Rico, D. (2017). Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel (*Scomber scombrus*) fillets. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, 117–122.
- Tappi, S., Berardinelli, A., Ragni, L., Dalla Rosa, M., Guarnieri, A., & Rocculi, P. (2014). Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 21, 114–122.
- Rodríguez, Ó., Gomes, W. F., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2017). Effect of indirect cold plasma treatment on cashew apple juice (*Anacardium occidentale* L.). *LWT*, 84, 457–463.
- Dionísio, A. P., Gomes, R. T., & Oetterer, M. (2009). Ionizing radiation effects on food vitamins: a review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 52, 1267–1278.
- Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2021). Cold plasma processing on fruits and fruit juices: a review on the effects of plasma on nutritional quality. *Processes*, 9(12), 2098.
- Ladikos, D., & Lougovois, V. (1990). Lipid oxidation in muscle foods: a review. *Food Chemistry*, 35, 295–314.
- Choi, S., Puligundla, P., & Mok, C. (2016). Corona discharge plasma jet for inactivation of *Escherichia coli* O157 and *Listeria monocytogenes* on inoculated pork and its impact on meat quality attributes. *Annals of Microbiology*, 66, 685–694.
- Jayasena, D. D., Kim, H. J., Yong, H. I., Park, S., Kim, K., Choe, W., & Jo, C. (2015). Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes. *Food Microbiology*, 46, 51–57.
- Yepez, X. V., & Keener, K. M. (2016). High-voltage atmospheric cold plasma (HVACP) hydrogenation of soybean oil without trans-fatty acids. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 169–174.
- Hajian-Tilaki, A., Kenari, R. E., Razavi, R., & Farahmandfar, R. (2024). Phenolic profile, antioxidant properties, and pollen spectra of Iranian-originated honeys. *European Food Research and Technology*, 1–13.
- Grzegorzewski, F., Ehlbeck, J., Schlüter, O., Kroh, L. W., & Rohn, S. (2011). Treating lamb's lettuce with a cold plasma-influence of atmospheric pressure air plasma immanent species on the phenolic profile of *Valerianella locusta*. *LWT – Food Science and Technology*, 44, 2285–2289.
- Kim, J. E., Oh, Y. J., Won, M. Y., Lee, K. S., & Min, S. C. (2017). Microbial decontamination of onion powder using microwave-powered cold plasma treatments. *Food Microbiology*, 62, 112–123.
- Anbarasan, R., Jaspin, S., Bhavadharini, B., Pare, A., Pandiselvam, R., & Mahendran, R. (2022). Chlorpyrifos pesticide reduction in soybean using cold plasma and ozone treatments. *LWT*. 159, 113193.
- Neyts, E. C., Ostrikov, K., Sunkara, M. K., & Bogaerts, A. (2015). Plasma catalysis: synergistic effects at the nanoscale. *Chemical Reviews*. 115(24), 13408–13446.
- Yusupov, M., Neyts, E. C., Khalilov, U., Snoeckx, R., Van Duin, A. C. T., & Bogaerts, A. (2012). Atomic-scale simulations of reactive oxygen plasma species interacting with bacterial cell walls. *New Journal of Physics*. 14(9), 093043.
- Han, L., Patil, S., Boehm, D., Milosavljević, V., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2016). Mechanisms of inactivation by high-voltage atmospheric cold plasma differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Applied and Environmental Microbiology*. 82, 450–458.
- Athukorala, S. N. P., Fernando, W. G. D., & Rashid, K. Y. (2009). Identification of antifungal antibiotics of *Bacillus* species isolated from different microhabitats using polymerase chain reaction and MALDI-TOF mass spectrometry. *Canadian Journal of Microbiology*. 55(9), 1021–1032.
- Min, S. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Boyd, G., Sites, J. E., Uknalis, J., & Fan, X. (2017). In-package inhibition of *E. coli* O157 on bulk Romaine lettuce using cold plasma. *Food Microbiology*. 65, 1–6.
- Bußler, S., Ehlbeck, J., & Schlüter, O. K. (2017). Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 40, 78–86.
- Ramazzina, I., Berardinelli, A., Rizzi, F., Tappi, S., Ragni, L., Sacchetti, G., & Rocculi, P. (2015). Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwi fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 107, 55–65.
- Sarangapani, C., Thirumdas, R., Devi, Y., Trimukhe, A., Deshmukh, R. R., & Annature, U. S. (2016). Effect of low-pressure plasma on physico-chemical and functional properties of parboiled rice flour. *LWT-Food Science and Technology*. 69, 482–489.
- Pasquali, F., Stratakis, A. C., Koidis, A., Berardinelli, A., Cevoli, C., Ragni, L., ... & Trevisani, M. (2016). Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control*. 60, 552–559.
- Ziuzina, D., Misra, N. N., Han, L., Cullen, P. J., Moiseev, T., Mosnier, J. P., ... & Bourke, P. (2020). Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 59, 102229.

- Hou, Y., Wang, R., Gan, Z., Shao, T., Zhang, X., He, M., & Sun, A. (2019). Effect of cold plasma on blueberry juice quality. *Food Chemistry*. 290, 79–86.
- Tappi, S., Ragni, L., Tylewicz, U., Romani, S., Ramazzina, I., & Rocculi, P. (2019). Browning response of fresh-cut apples of different cultivars to cold gas plasma treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 53, 56–62.
- Prasad, P., Mehta, D., Bansal, V., & Sangwan, R. S. (2017). Effect of atmospheric cold plasma (ACP) with its extended storage on the inactivation of *Escherichia coli* inoculated on tomato. *Food Research International*. 102, 402–408.
- Min, S. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Sites, J. E., Boyd, G., & Lacombe, A. (2016). Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma inhibits *Escherichia coli* O157, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and *Tulane virus* in Romaine lettuce. *International Journal of Food Microbiology*. 237, 114–120.
- Devi, Y., Thirumdas, R., Sarangapani, C., Deshmukh, R. R., & Annappure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*. 77, 187–191.
- Han, Y. X., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2019). Changes in activity, structure and morphology of horseradish peroxidase induced by cold plasma. *Food Chemistry*. 301, 125240.
- Mir, S. A., Shah, M. A., & Mir, M. M. (2016). Understanding the role of plasma technology in food industry. *Food and Bioprocess Technology*. 9, 734–750.
- Anthon, G. E., & Barrett, D. M. (2002). Kinetic parameters for the thermal inactivation of quality-related enzymes in carrots and potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(14), 4119–4125.
- Giner, J., Gimeno, V., Espachs, A., Elez, P., Barbosa-Cánovas, G. V., & Martín, O. (2000). Inhibition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) pectin methylesterase by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 1(1), 57–67.
- Terefé, N. S., Yang, Y. H., Knoerzer, K., Buckow, R., & Versteeg, C. (2010). High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 11(1), 52–60.
- Neves, F. I., Vieira, M. C., & Silva, C. L. (2012). Inactivation kinetics of peroxidase in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) by heat and UV-C radiation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 13, 158–162.
- Cruz, R. M., Vieira, M. C., & Silva, C. L. (2006). Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (*Nasturtium officinale*). *Journal of Food Engineering*. 72(1), 8–15.
- Pankaj, S. K., Misra, N. N., & Cullen, P. J. (2013). Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 19, 153–157.
- Liu, W., Liu, Y., Zhu, R., Yu, J., Lu, W., Pan, C., Yao, W., & Gao, X. (2016). Structure characterization, chemical and enzymatic degradation, and chain conformation of an acidic polysaccharide from *Lycium barbarum* L. *Carbohydrate Polymers*. 147, 114–124.
- Ali, S., Khan, A. S., & Malik, A. U. (2016). Postharvest L-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 121, 135–142.
- Pandiselvam, R., Kaavya, R., Khanashyam, A. C., Divya, V., Abdullah, S. K., Aurum, F. S., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Research trends and emerging physical processing technologies in mitigation of pesticide residues on various food products. *Environmental Science and Pollution Research*. 29, 1–19.
- Misra, N. N., Kaur, S., Tiwari, B. K., Kaur, A., Singh, N., & Cullen, P. J. (2015). Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour. *Food Hydrocolloids*. 44, 115–121.

نیکمram ح ، ۱۳۹۱ ، از بین بردن میکروارگانیسم های شیر با استفاده از پلاسما سرد اتمسفری

Fuhrmann H, Rupp N, Bu'chner A, Braun P (2010) The effect of gaseous ozone treatment on egg components. *J Sci Food Agric* 90(4):593–598.

Ragni L, Berardinelli A, Vannini L, Montanari C, Sirri F, Guerzoni ME, Guarnieri A (2010) Non-thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs. *J Food Eng* 100(1):125–132

## A Review of Cold Plasma Technology: Mechanism, Effects on Physico-chemical Properties of Food Products, and Applications in the Food Industry

Ali Dadgar, Department of Food Industry Science  
and Engineering, University of Kurdistan,  
Sanandaj, Iran

Adel Hajian-Tilaki, Department of Food Science  
and Technology, Sari Agricultural Sciences  
and Natural Resources University (SANRU), Sari,  
Iran

### 1-1-

#### Abstract

Cold plasma, an innovative non-thermal method in food processing, plays a momentous role in preserving the quality of products without the detrimental effects of heat on their nutritional properties. This technique employs active gas molecules to deactivate harmful microorganisms and break down pesticides and enzymes that can compromise quality. Optimization of product surface characteristics and process parameters—including environmental, procedural, and intrinsic factors—can significantly enhance the efficiency of cold plasma treatment. Due to its non-thermal nature, this technology exerts minimal impact on the physicochemical, nutritional, and sensory characteristics of food. However, there remains a need for further research to optimize and minimize its negative effects on various properties of food products. Cold plasma is distinguished by its adaptable, cost-effective, and eco-friendly design, presenting greater potential than traditional methods to extend shelf life and enhance food quality. The review aims to assess the effect of cold plasma processing on the quality characteristics of food products and to demonstrate the efficacy of this technology in mitigating microbiological concerns while enhancing the quality of minimally processed products. This study endeavors to clarify the importance of optimizing cold plasma processes in maintaining and improving food quality by providing up-to-date data and results.

**Keywords:** Cold plasma, food quality, physicochemical properties, enzyme activity, decontamination