

نوع مقاله: پژوهشی

مروری بر فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در کیفیت پایدار مواد غذایی

بهاره نوروژی^{۱*}، فاطمه رفیعی فروشانی^۲^{۱*} دانشیار گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

چکیده

فناوری پلاسمای سرد اتمسفری یکی از نوآوری‌های نوظهور در حوزه میکروبیولوژی صنعتی و مهندسی مواد غذایی است که با ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن در شرایط غیرحرارتی، امکان پردازش ایمن و پایدار مواد غذایی را بدون استفاده از مواد شیمیایی فراهم می‌سازد. این فناوری نه تنها در کاهش بار میکروبی، غیرفعال‌سازی پاتوژن‌ها و حذف آلودگی‌های زیستی نقش مؤثری دارد، بلکه در حفظ کیفیت تغذیه‌ای، رنگ، بافت و عطر مواد غذایی نیز عملکرد بهتری نسبت به روش‌های حرارتی سنتی نشان داده است. از سوی دیگر، کاربردهای کشاورزی این فناوری، به‌ویژه در تیمار بذر، جوانه‌زنی، تحریک رشد گیاه، بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و نیز افزایش راندمان زراعی، اهمیت فراوانی یافته است. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که استفاده از پلاسما در مراحل مختلف چرخه غذایی - از تولید تا بسته‌بندی - می‌تواند ضمن کاهش مصرف مواد شیمیایی، پایداری زیست‌محیطی و ایمنی غذایی را ارتقا دهد. با توجه به قابلیت بالای این فناوری در کنترل آلودگی‌های میکروبی، بهبود پایداری مواد غذایی، تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاهان و افزایش بازده تولید، پلاسما به‌عنوان یک ابزار کلیدی در توسعه کشاورزی و صنایع غذایی پایدار در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، ضمن مرور اصول و مبانی عملکرد پلاسمای سرد اتمسفری، کاربردها، مکانیسم‌های فیزیکی و بیولوژیکی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده آن در پردازش پایدار مواد غذایی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: پلاسما سرد اتمسفری، میکروبیولوژی صنعتی، ایمنی غذایی، کشاورزی پایدار، گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن

مقدمه

بهره‌وری، کاهش اتلاف منابع و تضمین ایمنی غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Abdulsalam *et al.*, 2025). یکی از فناوری‌های نوظهور که توانسته توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کند، فناوری پلاسمای سرد اتمسفری (ACP) است. پلاسما که به آن «حالت چهارم ماده» نیز گفته می‌شود، گازی است متشکل از یون‌ها، الکترون‌ها، رادیکال‌ها، مولکول‌های برانگیخته و فوتون‌های فرابنفش که می‌تواند در فشار اتمسفری یا پایین تولید شود. پلاسما به دو دسته‌ی کلی حرارتی و غیرحرارتی تقسیم می‌شود که نوع غیرحرارتی یا همان پلاسما سرد، به دلیل

در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت جهانی، محدودیت منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی، آلودگی زیست‌محیطی و کاهش زمین‌های کشاورزی، از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌روی صنعت غذا و کشاورزی محسوب می‌شوند. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) پیش‌بینی کرده است که تا سال ۲۱۰۰ میلادی، در صورت تداوم روند فعلی تغییرات اقلیمی، عملکرد جهانی محصولات اساسی همچون گندم، برنج و ذرت به‌طور چشمگیری کاهش خواهد یافت. در چنین شرایطی، یافتن فناوری‌های نوین برای افزایش

فیزیکی و بیولوژیکی آن، و تحلیل نقش آن در ارتقای کیفیت و ایمنی مواد غذایی است.

اصول فناوری پلاسما سرد اتمسفری

پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده، زمانی ایجاد می شود که گاز با اعمال انرژی الکتریکی یا الکترومغناطیسی تا حدی یونیزه شده و شامل ذرات باردار، الکترون ها، یون های مثبت و منفی، رادیکال ها، فوتون های فرابنفش و مولکول های برانگیخته گردد. این ترکیب پیچیده از ذرات باردار و خنثی، به پلاسما خواص منحصر به فردی می بخشد که آن را از جامد، مایع و گاز متمایز می سازد. پلاسما سرد اتمسفری (ACP) نوعی پلاسما است که در فشار محیطی و در دمای پایین تولید می شود. در این نوع پلاسما، الکترون ها دارای انرژی بالا هستند در حالی که دمای کلی گاز پایین باقی می ماند. این ویژگی سبب می شود که فناوری پلاسما سرد بدون آسیب به بافت های زنده، سلول ها یا مواد حساس به حرارت، مورد استفاده قرار گیرد (Barjasteh *et al.*, 2024).

برای تولید پلاسما سرد، از منابع گوناگونی استفاده می شود که شامل تخلیه دی الکتریک (DBD)، تخلیه فرکانس رادیویی (RF)، جت پلاسما در فشار اتمسفری (APPJ) و تخلیه قوسی یا کرونا است. هر یک از این منابع با توجه به نوع گاز ورودی (آرگون، نیتروژن، هلیوم، اکسیژن یا هوا) و تنظیم پارامترهایی نظیر ولتاژ، جریان، فرکانس و زمان تابش، ویژگی های متفاوتی از پلاسما را ایجاد می کنند. زمانی که میدان الکتریکی قوی بر محیط گازی اعمال می شود، الکترون های آزاد شروع به برخورد با مولکول های گاز کرده و واکنش های زنجیره ای یونیزاسیون، برانگیزش و شکست مولکولی اتفاق می افتد (Abdulsalam *et al.*, 2025). در نتیجه، گونه های فعال اکسیژن (ROS) نظیر رادیکال های هیدروکسیل ($\text{OH}^\bullet$)، اکسیژن اتمی (O)، ازن (O_3)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اکسیژن یگانه (2O^1) به همراه گونه های فعال نیتروژن (RNS) مانند نیتریک اکسید (NO)، نیتروژن دی اکسید (NO_2) و پراکسی نیتريت (ONOO^-)

دمای پایین و قابلیت استفاده مستقیم بر مواد حساس مانند غذا و بذر، در کشاورزی و صنایع غذایی اهمیت ویژه ای یافته است. فناوری پلاسما سرد، با ایجاد گونه های فعال اکسیژن (ROS) و نیتروژن (RNS) قادر است باکتری ها، ویروس ها، قارچ ها و سایر عوامل بیماری زا را غیرفعال کند، بدون آنکه به ساختار مولکولی مواد غذایی یا بافت های زنده آسیب بزند. این ویژگی موجب شده تا از این فناوری به عنوان جایگزینی پایدار برای روش های حرارتی یا شیمیایی ضد عفونی استفاده شود.

در حوزه ی کشاورزی، پلاسما به عنوان ابزاری مؤثر برای تیمار بذر، تحریک جوانه زنی، بهبود رشد گیاه، افزایش مقاومت در برابر تنش های محیطی و کنترل بیماری های گیاهی شناخته می شود. مطالعات متعدد نشان داده اند که تیمار بذر با پلاسما موجب افزایش توان جوانه زنی، بهبود نفوذ پذیری پوسته بذر، و تقویت سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش های زیستی و غیر زیستی می شود. از سوی دیگر، در صنایع غذایی، استفاده از پلاسما سرد به عنوان روشی کارآمد برای غیرفعال سازی میکروارگانیسم ها، تجزیه ی سموم و آفت کش ها، بهبود ایمنی غذا، افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت تغذیه ای مواد غذایی شناخته شده است (Almeida *et al.*, 2015).

افزون بر اثرات ضد میکروبی، پلاسما می تواند خواص فیزیکی و شیمیایی سطح مواد غذایی را تغییر داده و در بهبود فرآیندهای نگهداری و بسته بندی نیز مؤثر باشد. این فناوری علاوه بر حذف عوامل بیماری زا، باعث کاهش نیاز به مواد نگهدارنده و شیمیایی می شود و در نتیجه گامی بزرگ در جهت تولید و پردازش پایدار مواد غذایی به شمار می رود (Anbarasan *et al.*, 2022). با توجه به کاربردهای گسترده ی پلاسما در هر دو حوزه ی کشاورزی و صنایع غذایی، بررسی جامع و تحلیلی این فناوری از منظر پایداری، ایمنی و بازده زیستی، امری ضروری است. هدف از این مقاله، مرور علمی فناوری پلاسما سرد اتمسفری، بررسی سازوکارهای

تشکیل می‌شوند. این ترکیبات، همراه با تابش فرابنفش و میدان الکتریکی، اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی گسترده‌ای بر سلول‌های زنده، باکتری‌ها، قارچ‌ها و ترکیبات آلی دارند (Batt & Fahey, 2025).

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پلازما، توانایی آن در غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و تغییر خواص سطحی مواد زیستی است. به‌واسطه‌ی انرژی زیاد الکترون‌ها و تولید رادیکال‌های فعال، پیوندهای شیمیایی در دیواره سلولی میکروب‌ها شکسته می‌شود و ساختار غشا و پروتئین‌های سطحی دچار تخریب می‌گردند. علاوه بر آن، تابش فرابنفش

پلازما باعث آسیب به DNA می‌شود و در نهایت منجر به مرگ یا غیرفعال‌سازی کامل سلول‌های میکروبی می‌گردد. از منظر فیزیکی، پلازما می‌تواند با ایجاد تغییر در زاویه تماس و زبری سطح مواد، خاصیت آب‌دوستی را افزایش دهد. این ویژگی در صنایع غذایی، نقش مهمی در بهبود چسبندگی فیلم‌های بسته‌بندی، افزایش نفوذپذیری سطح و ارتقای فرآورده‌های پوشش‌دهی دارد (Bayati *et al.*, 2024). در جدول یک مهم‌ترین انواع منابع پلازما، شرایط تولید و کاربردهای آن‌ها نشان داده شده است:

جدول ۱. انواع منابع پلازما و ویژگی‌های آن‌ها (Batt & Fahey, 2025).
(Batt & Fahey, 2025) Table 1. Types of plasma Sources and Their Characteristics

ویژگی شاخص Key Characteristics	کاربرد اصلی Primary Application	نوع گاز Gas Type	نوع پلازما Plasma Type
یکنواختی تخلیه، کنترل آسان Uniform discharge, easy controllability	ضدعفونی بذر، مواد غذایی، بسته‌بندی Seed disinfection, food decontamination, packaging sterilization	هوا، نیتروژن Air, Nitrogen	تخلیه دی الکتریک (DBD) Dielectric Barrier Discharge (DBD)
کنترل دقیق توان و فرکانس Precise control of power and frequency	جوانه‌زنی بذر، حذف پاتوژن‌ها Seed germination enhancement, pathogen inactivation	فرکانس هلیوم، آرگون Helium, Argon	تخلیه رادیویی (RF) Radio Frequency (RF) Discharge
هدایت‌پذیری بالا High directionality and efficient delivery	ضدعفونی سطحی و تجهیزات غذایی Surface decontamination, sterilization of food-processing equipment	آرگون، هلیوم Helium, Argon	پلازما جت اتمسفری (APPJ) Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ)
اثر حرارتی کم، دقت بالا Low thermal effect, high precision	افزایش فعالیت آنزیمی در گیاهان Enhancement of enzymatic activity in plants	هوا، نیتروژن Air, Nitrogen	پلازما مایکروویو Microwave Plasma
انرژی زیاد و توان بالا High energy output and strong power delivery	ضد عفونی قارچی در بذر ها Antifungal disinfection of seeds	هوا Air	تخلیه قوسی Arc Discharge

به‌طور کلی، عملکرد پلازما به ترکیب گاز، توان ورودی، مدت تابش و فاصله منبع تا سطح بستگی دارد. استفاده‌ی صحیح از این پارامترها می‌تواند تعادل مناسبی بین اثرات فیزیکی و شیمیایی ایجاد کرده و از آسیب به ساختار مواد غذایی یا سلول‌های گیاهی جلوگیری کند. از منظر زیست‌فناوری، پلازما پلی میان علوم فیزیک، شیمی و میکروبیولوژی ایجاد کرده است. ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن باعث شده که این فناوری به‌عنوان یکی از روش‌های سبز و پایدار در صنایع غذایی و کشاورزی مدرن شناخته شود (Bong *et al.*, 2022).

کاربردهای فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در کشاورزی و صنایع غذایی

فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و پایدار در کشاورزی و صنایع غذایی مطرح شده است. این فناوری با بهره‌گیری از واکنش‌های فیزیکی و

شیمیایی گوناگون، توانایی بالایی در بهبود کیفیت بذر، رشد گیاه، ضدعفونی محصولات، افزایش ماندگاری و ایمنی مواد غذایی دارد (Bourke et al., 2018).

کاربرد پلاسما در کشاورزی

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های استفاده از پلاسما در کشاورزی، تیمار بذر پیش از کاشت است. در این روش، بذرها در معرض تخلیه الکتریکی و ذرات فعال پلاسما قرار می‌گیرند که باعث تغییرات سطحی و شیمیایی در پوسته بذر می‌شود. این تغییرات موجب افزایش نفوذپذیری پوسته، جذب سریع‌تر آب، تحریک جوانه‌زنی و بهبود رشد اولیه گیاه می‌گردد (Cooper et al., 2009). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که پلاسمای تخلیه فرکانس رادیویی (RF) و پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) به‌طور ویژه در تحریک جوانه‌زنی بذرهای گندم، برنج، ذرت، سویا و اسفناج مؤثر هستند. به‌طور مثال، تیمار بذر سویا با پلاسما موجب افزایش جذب آب تا ۱۴٪ و تسریع جوانه‌زنی نسبت به نمونه شاهد شده است (Farooq et al., 2023).

همچنین، فناوری پلاسما با کاهش بیماری‌های بذرزاد از جمله قارچ‌های *Fusarium* و *Alternaria* توانسته درصد جوانه‌زنی و سلامت نهال را به‌طور چشمگیری بهبود دهد. در پژوهش‌های انجام‌شده، تخلیه فرکانس رادیویی به مدت ۸ دقیقه توانسته است عفونت قارچی در بذر گندم و ذرت را به ترتیب ۷۱٪ و ۹۹٪ کاهش دهد (Bayati et al., 2024).

تیمار بذر با پلاسما علاوه بر اثرات ضد میکروبی، به افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی نیز کمک می‌کند. گیاهانی که بذر آن‌ها تحت تأثیر پلاسما قرار گرفته‌اند، در برابر تنش‌هایی مانند شوری، خشکی و آلودگی‌های زیستی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بالاتری از خود نشان داده‌اند. در این فرآیند، آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) فعال‌تر می‌شوند و در نتیجه، سیستم دفاعی گیاه تقویت می‌گردد (Cooper et al., 2009). در جدول دو، نمونه‌ای از کاربردهای عملی پلاسما در بذرهاى مختلف آورده شده است:

جدول ۲. اثرات فناوری پلاسما بر تحریک بذر و جوانه‌زنی (Farooq et al., 2023)

اثرات مشاهده‌شده Observed Effects	نوع پلاسما Plasma Type	نوع بذر Seed Type
افزایش درصد جوانه‌زنی و رشد Increased germination percentage and seedling growth	تخلیه فرکانس رادیویی (RF) Radio Frequency (RF) Discharge	گندم، سویا، لوبیا، ذرت، ماش Wheat, soybean, bean, maize, mung bean
بهبود جوانه‌زنی و حذف قارچ‌های بذرزاد Enhanced germination and suppression of seed-borne fungi	تخلیه قوسی Arc Discharge	برنج Rice
افزایش توان بذر و سرعت جوانه‌زنی Improved seed vigor and faster germination rate	تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) Dielectric Barrier Discharge (DBD)	گوچه‌فرنگی، نخود، اسفناج Tomato, chickpea, spinach
بهبود کیفیت بذرهاى فضای سبز Improved seed quality for forestry/green space applications	پلاسما مایکروویو Microwave Plasma	صنوبر نروژی Norwegian spruce
افزایش شاخص رشد و جوانه‌زنی Increased growth index and germination performance	آب فعال‌شده با پلاسما Plasma-Activated Water (PAW)	ربحان، کینوا، برنج Basil, quinoa, rice

تأثیر پلاسما در کشاورزی فقط محدود به بذر نیست؛ بلکه می‌تواند در بازسازی خاک، افزایش جذب مواد مغذی، حذف عوامل بیماری‌زا در محیط رشد و حتی بهبود کیفیت پس از برداشت محصولات نیز نقش داشته باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کاربرد آب فعال‌شده با پلاسما می‌تواند به بهبود ساختار خاک و افزایش توان جذب نیتروژن کمک کند که در نهایت موجب رشد بیشتر گیاه می‌شود (Kaur et al., 2024).

کاربرد پلاسما در صنایع غذایی

افزون بر خاصیت ضد میکروبی، پلاسما توانایی تجزیه آفت کش‌ها، سموم قارچی (مایکوتوکسین‌ها) و ترکیبات شیمیایی مضر را نیز دارد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پلاسما می‌تواند میزان باقی‌مانده آفت‌کش‌هایی نظیر دیازینون، کلرپیرفوس و کاربندازیم را در سطح میوه‌ها و سبزیجات به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، فناوری پلاسما در افزایش ماندگاری مواد غذایی از طریق کاهش بار میکروبی و تأخیر در فرآیند فساد نقش مهمی دارد. در فرآیندهای بسته‌بندی، پلاسما با اصلاح سطح مواد پلیمری، چسبندگی فیلم‌ها را افزایش داده و از نفوذ رطوبت و اکسیژن جلوگیری می‌کند. این ویژگی به حفظ کیفیت و طراوت محصولات غذایی در طول زمان کمک می‌کند (جدول ۳) (Kramer et al., 2020).

در حوزه صنایع غذایی، پلاسما به‌عنوان فناوری سبز و جایگزینی مطمئن برای روش‌های شیمیایی یا حرارتی ضد عفونی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پلاسما در مراحل مختلف زنجیره تولید غذا - از فرآوری و بسته‌بندی تا نگهداری - مزایای چشمگیری دارد. پلاسمای سرد قادر است باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها را از سطح مواد غذایی حذف کند، بدون آن‌که ترکیبات مغذی، رنگ، بو و طعم طبیعی آن‌ها آسیب ببیند. به‌عنوان مثال، تیمار میکروبی مواد غذایی با پلاسما باعث غیرفعال شدن پاتوژن‌های خطرناکی مانند *E. coli*, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* و *Aspergillus flavus* شده است (Kausar et al., 2025).

جدول ۳. نمونه‌هایی از کاربرد پلاسما در بهبود ایمنی و کیفیت مواد غذایی (Li et al., 2025)

Table 3. Examples of Plasma Applications for Enhancing Food Safety and Quality (Li et al., 2025).

نتیجه عملکرد	نوع پلاسما	نوع محصول
Performance Outcome	Plasma Type	Product Type
حذف <i>Listeria monocytogenes</i> و افزایش ماندگاری Inactivation of <i>Listeria monocytogenes</i> and increased shelf life	تخلیه DBD DBD Discharge	گوشت مرغ و ماهی Poultry and fish meat
کاهش بار میکروبی سطحی بدون تغییر رنگ و طعم Reduction of surface microbial load without affecting color or flavor	پلاسما جت اتمسفری Atmospheric Plasma Jet	میوه‌ها و سبزیجات Fruits and vegetables
کاهش آلودگی قارچی و مایکوتوکسین‌ها Decrease in fungal contamination and mycotoxin levels	RF پلاسما RF Plasma	غلات و بذرها Grains and seeds
ضد عفونی و افزایش پایداری شیمیایی Effective disinfection and improved chemical stability	آب فعال شده با پلاسما Plasma-Activated Water (PAW)	آب و نوشیدنی‌ها Water and beverages
بهبود خاصیت ضدباکتریایی سطوح Enhanced antibacterial properties of packaging surfaces	پلاسما سرد اتمسفری Cold Atmospheric Plasma	بسته بندی مواد غذایی Food packaging materials

اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی فناوری پلاسمای سرد اتمسفری بر مواد غذایی و میکروارگانیسم‌ها

پلاسما سرد اتمسفری با ترکیبی از گونه‌های فعال اکسیژن و (ROS/RNS)، فوتون‌های UV، میدان‌های الکتریکی و

به‌طور کلی، پلاسما به‌دلیل توانایی بالا در ضد عفونی غیرحرارتی، حفظ ارزش تغذیه‌ای، حذف مواد شیمیایی مضر و کاهش ضایعات غذایی، به یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌ها برای توسعه صنایع غذایی پایدار تبدیل شده است (Ma & Jiang, 2024).

در نتیجه نفوذپذیری غشا افزایش یافته و سلول میکروبی از بین می‌رود. همچنین این واکنش‌ها می‌توانند به صورت کنترل شده در کاهش آنزیم‌های فسادزا، تجزیه آفت‌کش‌ها و کاهش مایکوتوکسین‌ها مؤثر باشند، بدون آنکه ترکیبات تغذیه‌ای اصلی به طور قابل توجهی آسیب ببینند (Egozkue *et al.*, 2020; (Salgado *et al.*, 2021).

۳. اثرات بیولوژیکی

در سطح بیولوژیکی، پلاسما اثر دوگانه‌ای نشان می‌دهد. در گیاهان، نفوذ ROS/RNS موجب القای پاسخ‌های دفاعی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر SOD، CAT و POD و تنظیم مسیرهای سیگنال‌دهی از جمله MAPK و هورمون‌های گیاهی می‌شود که در نهایت مقاومت به تنش‌های محیطی را تقویت می‌کند (Muñoz *et al.*, 2022; Smet *et al.*, 2017). در مقابل، در میکروارگانیسم‌ها این گونه‌ها با ایجاد استرس اکسیداتیو شدید منجر به مرگ سلولی یا در برخی موارد فعال‌سازی مسیرهای سازگاری می‌شوند. از این رو، بهره‌برداری ایمن و مؤثر از این فناوری مستلزم تعیین دقیق دوز، زمان و شرایط تیمار است تا اثرات مطلوب تقویت و مخاطرات زیستی کاهش یابد (Kausar *et al.*, 2025; Puligundla *et al.*, 2020).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این سه اثر هم‌افزا با هم کار می‌کنند؛ به گونه‌ای که ابتدا تخریب فیزیکی دیواره‌ی سلولی انجام می‌شود، سپس ترکیبات شیمیایی وارد سلول شده و واکنش‌های اکسیداتیو را فعال می‌کنند. در نهایت، فرایندهای بیولوژیکی باعث غیرفعال شدن کامل میکروب یا تحریک سیستم دفاعی در گیاه می‌شوند. این ویژگی ترکیبی، فناوری پلاسمای سرد را به ابزاری منحصربه‌فرد در میکروبیولوژی صنعتی و مهندسی ایمنی مواد غذایی تبدیل کرده است، زیرا قادر است بدون افزودن هیچ ماده‌ی شیمیایی، هم کیفیت و هم سلامت محصولات را حفظ کند (Chaple *et al.*, 2025).

الکترون‌های پرانرژی اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی متعددی بر سیستم‌های زیستی دارد. کارایی آن به شرایط فرایند و نوع ماده غذایی وابسته است و نیاز به تعیین دامنه‌های بهینه برای هر محصول دارد (Misra *et al.*, 2016; Panchal *et al.*, 2024). با تنظیم پارامترهایی مانند شدت میدان، زمان تماس و دوز گونه‌های فعال، می‌توان کیفیت و ایمنی محصولات را افزایش داد بدون آن‌که ترکیبات حساس آسیب ببینند (Pankaj & Keener, 2017). مطالعات آینده باید محدوده دقیق این پارامترها را برای تضمین سلامت و کارایی بهتر در فرآوری مواد غذایی مشخص کنند (Misra *et al.*, 2016).

۱. اثرات فیزیکی

اثر فیزیکی پلاسما از بمباران الکترونی، تابش فرابنفش و تخلیه الکتریکی سطحی ناشی می‌شود و با تخریب دیواره سلولی، آسیب به DNA و تغییر ساختار پروتئین‌ها موجب نابودی میکروارگانیسم‌ها می‌گردد (Cooper *et al.*, 2009; Gavahian *et al.*, 2020). همچنین، برخورد ذرات پرانرژی زبری سطح، آب‌دوستی و زاویه تماس مواد غذایی را تغییر داده و چسبندگی و کارایی پوشش‌های محافظ را افزایش می‌دهد، که این امر به بهبود بسته‌بندی و پایداری محصول کمک می‌کند (Gavahian & Zhang, 2021; Zhang *et al.*, 2024).

۲. اثرات شیمیایی

در فرایند تخلیه پلاسما، مولکول‌های گاز شکسته شده و گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن تولید می‌شوند که از مهم‌ترین عوامل ضد میکروبی این فناوری به شمار می‌روند. این گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر، از جمله ازن (O_3)، رادیکال هیدروکسیل ($\bullet OH$)، نیتریک اکسید (NO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و پراکسی‌نیتريت ($ONOO^-$)، با اجزای سلولی میکروارگانیسم‌ها مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک واکنش داده و موجب اکسیداسیون چربی‌ها، دناتوره شدن پروتئین‌ها و تخریب غشای سلولی می‌شوند (Bourke *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2024).

جدول ۴. سازوکارهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پلاسما (Alaguthevar *et al.*, 2024)

نوع اثر	عامل مؤثر	فرآیند یا پیامد	نتیجه نهایی
Type of Effect	Active Agents	Process / Mechanism	Final Outcome
فیزیکی Physical	تابش UV، برخورد الکترونی UV radiation, electron collisions	تخریب دیواره‌ی سلولی و میکروبی Disruption of microbial cell wall and DNA	غیرفعال‌سازی میکروب‌ها Microbial inactivation
شیمیایی Chemical	NO ، $\text{OH}^\bullet$ ، RNS (O_3 ، ONOO^-) RNS/ROS (O_3 ، $\text{OH}^\bullet$ ، NO ، ONOO^-)	اکسیداسیون چربی‌ها و پروتئین‌ها Oxidation of lipids and proteins	مرگ سلول و حذف پاتوژن‌ها Cell death and pathogen elimination
بیولوژیکی (در گیاهان) Biological (in plants)	H_2O_2 و مسیرهای سیگنالینگ آنتی‌اکسیدانی H_2O_2 and antioxidant signaling pathways	افزایش فعالیت SOD ، CAT ، POD Increased activity of SOD ، CAT ، and POD enzymes	تقویت مقاومت در برابر تنش Enhanced stress resistance
بیولوژیکی (در میکروارگانیسم‌ها) Biological (in microorganisms)	ROS زیاد و آسیب DNA High ROS levels and DNA damage	استرس اکسیداتیو شدید Severe oxidative stress	توقف رشد و مرگ سلول Growth arrest and cell death

نقش فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در بهبود کیفیت، ایمنی و پایداری مواد غذایی

یکی از چالش‌های مهم در صنایع غذایی، ایجاد تعادل میان افزایش ماندگاری و حفظ کیفیت تغذیه‌ای محصولات است. روش‌های حرارتی اگرچه در کاهش بار میکروبی مؤثرند، اما اغلب باعث تخریب مواد مغذی و تغییر ویژگی‌های حسی می‌شوند (Ziuzina *et al.*, 2014). در مقابل، پلاسمای سرد اتمسفری (ACP) به عنوان یک فناوری غیرحرارتی می‌تواند میکروارگانیسم‌ها را غیرفعال کند، در حالی که ساختار، بافت و ویژگی‌های ارگانولپتیک مواد غذایی تا حد زیادی حفظ می‌شود (Gavahian & Zhang, 2021; Pankaj & Keener, 2017). همچنین این روش بدون ایجاد باقی‌مانده‌های سمی یا تغییرات غیرقابل برگشت در ترکیبات غذایی عمل می‌کند (Dai *et al.*, 2024).

۱. بهبود ایمنی میکروبی

پلاسما قادر است باکتری‌ها، قارچ‌ها و ویروس‌های غذایی را بدون نیاز به حرارت به طور مؤثر از بین ببرد. در مقایسه با روش‌های سنتی، این فناوری می‌تواند اثر را در مدت زمان کوتاهی انجام دهد و پتانسیل بهبود کارایی بهداشتی را نشان می‌دهد. به طور خاص، گونه‌هایی مانند *Listeria monocytogenes*، *Salmonella*، *Bacillus cereus* و *enterica*، *Escherichia coli* O157:H7

در زمان کوتاهی پس از تیمار پلاسما کاملاً غیرفعال می‌شوند (Bourke *et al.*, 2018). مطالعات نشان داده‌اند که غلظت میکروبی سطح گوشت، میوه‌ها و سبزیجات پس از ۳ تا ۵ دقیقه تیمار پلاسما تا بیش از ۹۰٪ کاهش می‌یابد، در حالی که کیفیت فیزیکی و تغذیه‌ای آن‌ها حفظ می‌شود (Bourke *et al.*, 2018). همچنین استفاده از آب فعال‌شده با پلاسما (Plasma Activated Water) به عنوان ضدعفونی‌کننده طبیعی در شست‌وشوی محصولات تازه، با کاهش مصرف کلر و بهبود اثر ضد میکروبی، جایگزینی ایمن و مؤثر برای کلر شده است (Fernandes & Rodrigues, 2025; Puligundla *et al.*, 2020).

۲. حفظ ترکیبات تغذیه‌ای و خواص حسی

فناوری پلاسما نسبت به روش‌های حرارتی در حفظ ترکیبات حساس غذایی مانند ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و رنگدانه‌های طبیعی مزیت چشمگیری دارد. مطالعات روی میوه‌ها و سبزیجات تیمار شده با پلاسما نشان داده‌اند که کاهش ویتامین C، آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها ناچیز است و ارزش تغذیه‌ای محصول عمده‌تاً حفظ می‌شود (Smet *et al.*, 2017). همچنین، تیمار پلاسما در شرایط کنترل‌شده بدون ایجاد تغییر محسوس در بافت، طعم و عطر، ویژگی‌های حسی محصول را حفظ می‌کند؛ به طوری که در توت‌فرنگی، گوجه‌فرنگی و سیب تیمار شده با پلاسما جت اتمسفری، تغییر معنی‌داری در رنگ و طعم مشاهده

نشده است (Gavahian & Zhang, 2021; Gavahian *et al.*, 2020; Karthik *et al.*, 2024). این یافته‌ها حاکی از آن است که پلاسما می‌تواند در کنار ارتقای ایمنی میکروبی، پایداری کیفی و ارزش تغذیه‌ای محصولات تازه را نیز حفظ کند.

۳. افزایش ماندگاری و کاهش فساد غذایی

پلاسما با غیرفعال‌سازی آنزیم‌های اکسیداز و پراکسیداز موجب کاهش فساد و تأخیر در قهوه‌ای شدن آنزیمی می‌شود (Khalaf *et al.*, 2024; Puligundla *et al.*, 2020).

جدول ۵. اثرات فناوری پلاسما بر کیفیت و ماندگاری مواد غذایی (Shabbir *et al.*, 2024)

نتیجه Outcome	اثر مشاهده‌شده Observed Effect	نوع پلاسما Plasma Type	نوع ماده غذایی Food Type
افزایش ماندگاری تا ۷ روز Shelf life extended by up to 7 days	کاهش رشد باکتری‌های فسادزا تا ۹۵٪ Reduction of spoilage bacteria by up to 95%	DBD پلاسما DBD Plasma	گوشت قرمز و مرغ Red meat and poultry
جلوگیری از قهوه‌ای شدن Prevention of browning	کاهش فعالیت آنزیم PPO و حفظ رنگ طبیعی Decreased PPO enzyme activity and preserved natural color	APPJ پلاسما APPJ Plasma	سیب و قارچ تازه Fresh apples and mushrooms
بهبود کیفیت حسی Improved sensory quality	حفظ طعم و کاهش بار میکروبی سطحی Flavor retention and reduction of surface microbial load	پلاسما جت هلیومی Helium Plasma Jet	گوجه‌فرنگی و توت‌فرنگی Tomatoes and strawberries
افزایش ایمنی مصرف Increased consumption safety	کاهش بار میکروبی بدون تغییر در پروتئین‌ها Lower microbial load without altering proteins	RF پلاسما RF Plasma	شیر و لبنیات Milk and dairy products
جایگزین ضدعفونی‌کننده شیمیایی Alternative to chemical disinfectants	حذف ۹۹٪ باکتری‌های کلیفرم 99% elimination of coliform bacteria	آب فعال‌شده با پلاسما Plasma-Activated Water (PAW)	آب و نوشیدنی‌ها Water and beverages

به‌طور کلی، می‌توان گفت که فناوری پلاسمای سرد اتمسفری ابزاری کارآمد در جهت تولید غذای ایمن، سالم و پایدار است. ترکیب ویژگی‌های ضد میکروبی، حفظ ارزش تغذیه‌ای، افزایش ماندگاری و سازگاری زیست‌محیطی، آن را به یکی از مؤثرترین فناوری‌های آینده‌محور در میکروبیولوژی صنعتی تبدیل کرده است (Werra & Dorweiler, Kaltplasma in der Wundheilung, 2025).

چالش‌ها و چشم‌انداز آینده فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در صنایع غذایی و کشاورزی

با وجود مزایای چشمگیر فناوری پلاسمای سرد اتمسفری در کاهش آلودگی میکروبی، حفظ کیفیت و افزایش پایداری مواد

کاهش مصرف مواد شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی

فناوری پلاسمای سرد، یک روش سبز و پایدار است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی مصرف مواد نگهدارنده و ضدعفونی‌کننده‌های شیمیایی را کاهش دهد. این فناوری فاقد پساب سمی بوده و به‌دلیل مصرف انرژی پایین و استفاده از گازهای ارزان مانند هوا یا نیتروژن، از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است. علاوه بر این، با استفاده از پلاسما در خطوط تولید و بسته‌بندی، می‌توان از انتشار میکروارگانیسم‌ها و آلودگی‌های ثانویه جلوگیری کرد. در نتیجه، پلاسما نه تنها ایمنی و کیفیت محصولات غذایی را افزایش می‌دهد، بلکه نقش مهمی در پایداری محیط‌زیست و کاهش اثرات کربنی صنعت غذا ایفا می‌کند (Tabassum *et al.*, 2024).

غذایی، کاربرد گسترده‌ی آن در مقیاس صنعتی هنوز با چالش‌هایی همراه است.

یکی از مشکلات اساسی در توسعه‌ی سیستم‌های پلاسما، ناهمگنی در توزیع انرژی و تولید گونه‌های فعال است. ایجاد تخلیه‌ی یکنواخت در فشار اتمسفری، به‌ویژه برای سطوح پیچیده و مواد غذایی با شکل‌های نامنظم، دشوار است. در بسیاری از سیستم‌های آزمایشگاهی، کنترل دقیق دما، ولتاژ و شدت تخلیه ممکن است، اما در مقیاس صنعتی، دستیابی به شرایط پایدار و ایمن نیازمند طراحی مهندسی پیچیده‌تری است. افزون بر این، هر ماده‌ی غذایی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود را دارد؛ از جمله میزان رطوبت، چربی و هدایت الکتریکی، که بر توزیع پلاسما و اثربخشی آن تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، استانداردسازی فرایندها برای هر نوع محصول هنوز در مرحله‌ی تحقیق و توسعه است (Yawut *et al.*, 2024).

هرچند پلاسما به‌عنوان یک فناوری سبز و غیرشیمیایی شناخته می‌شود، اما هنوز در مورد اثرات جانبی احتمالی آن بر ترکیبات حساس مواد غذایی و تولید ترکیبات ثانویه‌ی ناخواسته نگرانی‌هایی وجود دارد. در برخی موارد گزارش شده است که گونه‌های فعال تولیدشده توسط پلاسما ممکن است با ترکیبات آلی مواد غذایی واکنش داده و ترکیبات نیتروزی یا پراکسیدی تولید کنند. بنابراین، لازم است مطالعات جامع‌تری در زمینه‌ی ایمنی مصرف طولانی‌مدت مواد غذایی تیمار شده با پلاسما انجام گیرد. به‌ویژه در محصولاتمانند گوشت و فرآورده‌های پروتئینی، نظارت دقیق بر ترکیبات شیمیایی پس از فرآوری ضروری است (Karthik *et al.*, 2024).

از منظر اقتصادی، هزینه‌ی اولیه‌ی نصب و راه‌اندازی تجهیزات پلاسما نسبتاً بالا است، هرچند در درازمدت به‌دلیل کاهش مصرف مواد شیمیایی و انرژی، هزینه‌های عملیاتی کاهش می‌یابد. اما برای پذیرش گسترده در صنایع، لازم است سیستم‌های پلاسما با مصرف انرژی پایین، طراحی ماژولار و قابلیت ادغام در خطوط تولید موجود توسعه یابند. علاوه بر آن، نبود استانداردهای جهانی در زمینه‌ی ارزیابی عملکرد و ایمنی این فناوری، یکی از موانع اصلی تجاری‌سازی آن است. توسعه‌ی دستورالعمل‌های

بین‌المللی توسط سازمان‌هایی نظیر WHO، FAO و ISO می‌تواند مسیر پذیرش صنعتی را هموار کند (Wang *et al.*, 2024).

از دیدگاه علمی، هنوز بسیاری از جنبه‌های مکانیزمی اثر پلاسما بر سلول‌ها، آنزیم‌ها و ترکیبات زیستی ناشناخته مانده است. روابط بین نوع گاز، شدت میدان الکتریکی، زمان تابش و پاسخ زیستی سلول‌ها بسیار پیچیده است و نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر و داده‌های تجربی گسترده‌تر دارد. همچنین، در حوزه‌ی کشاورزی، باید بررسی شود که تأثیر بلندمدت تیمار پلاسما بر ژنتیک بذرها، رشد نسل‌های بعدی و تعامل با میکروبیوم خاک چگونه است. پاسخ به این پرسش‌ها برای استفاده ایمن و پایدار از فناوری پلاسما در مقیاس مزرعه حیاتی است (Fernandes & Rodrigues, 2025). با وجود چالش‌ها، چشم‌انداز فناوری پلاسما سرد در صنایع غذایی و کشاورزی بسیار امیدوارکننده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با توسعه‌ی سیستم‌های ترکیبی مانند پلاسما-مایکروویو، پلاسما-UV، و آب فعال‌شده با پلاسما می‌توان کارایی ضد میکروبی و پایداری فرآیند را افزایش داد. از سوی دیگر، ادغام فناوری پلاسما با هوش مصنوعی و اینترنت اشیا (IoT) برای کنترل بلادرنگ پارامترهای فرآیند، می‌تواند زمینه‌ساز شکل‌گیری خطوط تولید هوشمند و خودکار در صنایع غذایی آینده باشد. در کشاورزی، استفاده از پلاسما برای بهبود جذب مواد مغذی، افزایش بازده زراعی، کنترل آفات و تولید بذرهایی مقاوم به تنش‌های اقلیمی چشم‌انداز جدیدی از کشاورزی پایدار را ترسیم کرده است (Yawut *et al.*, 2024). در نهایت، انتظار می‌رود که با پیشرفت فناوری‌های مواد و طراحی سیستم‌های ایمن‌تر، پلاسما به یکی از ارکان اصلی فرآوری مواد غذایی و مدیریت ایمنی زیستی در دهه‌های آینده تبدیل شود.

نتیجه‌گیری

فناوری پلاسما سرد اتمسفری (ACP) به‌عنوان رویکردی نوین در مهندسی ایمنی مواد غذایی، تحول قابل‌توجهی در فرآوری محصولات کشاورزی و دامی ایجاد کرده است. کارایی این فناوری ناشی از اثر هم‌افزای عوامل فیزیکی (تابش UV و بمباران الکترونی)، شیمیایی (گونه‌های فعال ROS و RNS) و بیولوژیکی است که با تخریب ساختار سلولی و ایجاد استرس اکسیداتیو، به

غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها یا تحریک پاسخ‌های دفاعی گیاهان منجر می‌شود. مزیت اصلی پلاسما نسبت به روش‌های حرارتی، دستیابی هم‌زمان به ایمنی میکروبی و حفظ کیفیت تغذیه‌ای است؛ به‌طوری‌که با کنترل پاتوژن‌هایی مانند *Listeria* و *monocytogenes*، تغییر محسوس در رنگ، طعم، بافت و ویتامین‌های محصول ایجاد نمی‌کند. افزون بر این، غیرفعال‌سازی آنزیم‌های فسادزا و کاهش آلاینده‌های شیمیایی موجب افزایش ماندگاری محصولات تازه و فرآوری‌شده می‌شود. در مجموع، پلاسما به‌عنوان فناوری سبز و بدون افزودنی‌های شیمیایی، ابزار مهمی برای ارتقای ایمنی و پایداری در زنجیره تأمین مواد غذایی به‌شمار می‌رود؛ هرچند توسعه صنعتی آن همچنان مستلزم بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی و ارزیابی اقتصادی در مقیاس بزرگ است.

منابع

- Abdulsalam, L., Abubakar, S., Permatasari, I., Lawal, A. A., Uddin, S., Ullah, S., & Ahmad, I. (2025). Advanced Biocompatible and Biodegradable Polymers: A Review of Functionalization, Smart Systems, and Sustainable Applications. *Polymers*, 17(21), 2901.
- Alaguthevar, R., Packialakshmi, J. S., Murugesan, B., Rhim, J. W., & Thiyagamoorthy, U. (2024). In-package cold plasma treatment to extend the shelf life of food. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 23(2), e13318. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13318>
- Almeida, F. D. L., Cavalcante, R. S., Cullen, P. J., Frias, J. M., Bourke, P., Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2015). Effects of atmospheric cold plasma and ozone on prebiotic orange juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 127-135.
- 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.
- Barjasteh, A., Kaushik, N., Choi, E. H., & Kaushik, N. K. (2024). Cold Atmospheric Pressure Plasma Solutions for Sustainable Food Packaging. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(12), 6638.
- Batt, H., & Fahey, J. (2025). Cold plasma technology: does it have a place in food processing? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(27), 5453-5463.
- Bayati, M., Lund, M. N., Tiwari, B. K., & Poojary, M. M. (2024). Chemical and physical changes induced by cold plasma treatment of foods: A critical review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 23(4), e13376.
- Bong, C., Choi, J. Y., Bae, J., Park, S., Ko, K. S., Bak, M. S., & Cheong, H. S. (2022). Effectiveness of ozone generated by a dielectric barrier discharge plasma reactor against multidrug-resistant pathogens and *Clostridioides difficile* spores. *Scientific Reports*, 12(1), 14118.
- Bourke, P., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Keener, K. (2018). The Potential of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production. *Trends Biotechnol*, 36(6), 615-626. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001>
- Chaple, S., Barroug, S., Ramireddy, L., & Bourke, P. (2025). Cold plasma interactions with food ingredients functionality. *Adv Food Nutr Res*, 116, 67-101. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2025.04.009>
- Cooper, M., Fridman, G., Staack, D., Gutsol, A. F., Vasilets, V. N., Anandan, S.,...Tsapin, A. (2009). Decontamination of surfaces from extremophile organisms using nonthermal atmospheric-pressure plasmas. *IEEE transactions on plasma science*, 37(6), 866-871.
- Dai, X., Feng, S., & Zheng, Y. (2024). Cold atmospheric plasma: Possible cure of autoimmune disorders and cancer via attenuating inflammation. *International Journal of Biological Sciences*, 20(14), 5436.
- Egozkue, L., Albertos, A., Collado, A., & Rovira, A. J. (2020). Application of cold atmospheric plasma for food safety: A review. *Food Control*, 113, 107200.
- 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 Science and Biotechnology*, 32(5), 621-638. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01266-5>
- Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2025). Cold plasma technology for sustainable food production: meeting the United Nations sustainable development goals. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 32-53.
- Gavahian, M., & Zhang, D. W. (2021). Cold plasma for food processing: Design, mechanism, and application. *Food Engineering Reviews*, 13(1), 1-17.
- Gavahian, M., Khaneghah, M. M., Barba, A., & Mousavi, S. G. (2020). Cold plasma as a tool for sustainable food processing: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 100197.
- Karthik, C., Mavelil-Sam, R., Thomas, S., & Thomas, V. (2024). Cold plasma technology based eco-friendly food packaging biomaterials. *Polymers*, 16(2), 230.
- Kaur, S., Kumar, Y., Singh, V., Kaur, J., & Panesar, P. S. (2024). Cold plasma technology: Reshaping food preservation and safety. *Food Control*, 163, 110537.
- Kauser, S., Hussain, A., Imtiaz, S., Murtaza, M. A., Ali, M. Q., Najam, A.,...& Elkhedir, A. E. (2025). Cold plasma technology: an epochal enabler in elevating food preservation, ensuring safety, and enhancing quality standards. *Discover Applied Sciences*, 7(6), 625. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07212-w>
- Khalaf, A. T., Abdalla, A. N., Ren, K., & Liu, X. (2024). Cold atmospheric plasma (CAP): A revolutionary approach in dermatology and skincare. *European Journal of Medical Research*, 29(1), 487.
- Kramer, B., Hasse, D., Guist, S., Schmitt-John, T., & Muranyi, P. (2020). Inactivation of bacterial endospores on surfaces by plasma processed air. *Journal of applied microbiology*, 128(4), 920-933.
- 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), 149.
- Ma, S., & Jiang, H. (2024). The effect of cold plasma on starch: Structure and performance. *Carbohydrate Polymers*, 340, 122254.
- Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J., & (2016). *Plasma in food and agriculture*. Academic Press.
- Muñoz, A., Ferrario, S., Silva, C. M. C., & C., M. (2022). Cold atmospheric plasma for quality improvement and shelf-life extension of fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 385, 132694.
- Panchal, D., Lu, Q., Sakaushi, K., & Zhang, X. (2024). Advanced cold plasma-assisted technology for green and sustainable ammonia synthesis. *Chemical Engineering Journal*, 498, 154920.
- Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). Cold plasma processing of foods: mechanisms, applications and future prospects. *Food Research International*, 98, 52-65.
- Puligundla, P., Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2020). Applications of cold plasma technology in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 102-113.
- Salgado, B. A., Fabbri, S., Dickenson, A., Hasan, M. I., & Walsh, J. L. (2021). Surface barrier discharges for Escherichia coli biofilm inactivation: Modes of action and the importance of UV radiation. *PLoS One*, 16(3), e0247589.
- Shabbir, A., Hassan, S. A., Hanif, H., Rauf, R., Muntaha, S. T., Jubbar, M., & Aadil, R. M. (2024). Applications of cold plasma technique to enhance the safety and quality of different food products. *Measurement: Food*, 15, 100183.
- Smet, C., Nikiforov, E., Leys, S., & Van Impe, S. (2017). Cold atmospheric plasma treatment to improve food safety: Mechanisms and application. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 42, 138-152.
- Tabassum, S., Khan, M. N., Faiz, N., Almas, Yaseen, B., & Ahmad, I. (2024). Cold atmospheric plasma-activated medium for potential ovarian cancer therapy. *Mol Biol Rep*, 51(1), 834. <https://doi.org/10.1007/s11033-024-09795-w>
- Wang, P., Wang, Y., Du, J., Han, C., & Yu, D. (2024). Effect of cold plasma treatment of sunflower seed protein modification on its structural and functional properties and its mechanism. *Food Hydrocolloids*, 155, 110175.
- Werra, U. E. M., & Dorweiler, B. (2025). [Cold plasma in wound healing]. *Urologie*, 64(1), 52-58. <https://doi.org/10.1007/s00120-024-02376-6> (Original work published Kaltplasma in der Wundheilung.)

- 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, 101383.
- Zhang, Q., Li, W., Peng, J., Xue, L., & He, G. (2024). Cold plasma activated Ni⁰/Ni²⁺ interface catalysts for efficient electrocatalytic methane oxidation to low-carbon alcohols. *Green Chemistry*, 26(12), 7091-7100.
- Ziuzina, D., Patil, S., Bourke, P., Misra, J. P., & Cullen, P. J. (2014). Cold plasma inactivation of bacterial biofilms and pathogens in food systems. *Food Microbiology*, 44, 81–89.

Original Research

A Review of Atmospheric Cold Plasma Technology in Sustainable Food Quality

Bahareh Nowruzi*, Fatemeh Rafiei Forooshani

***Corresponding Author:** Associate Prof., Department of Biology, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran **Email:** bahare77biol@gmail.com

Received: 10 December 2025 **Accepted:** 26 May 2026

http://doi: 10.22092/fooder.2026.371723.1442

Introduction

Atmospheric cold plasma (ACP) technology represents a groundbreaking non-thermal innovation in industrial microbiology and food engineering, generating reactive oxygen and nitrogen species (RONS) under ambient conditions to enable chemical-free processing. This approach effectively reduces microbial loads, inactivates pathogens like bacteria, fungi, and spores, and eliminates contaminants while outperforming thermal methods in retaining nutritional value, color, texture, and sensory attributes of foods. In agriculture, ACP enhances seed germination, plant growth, stress resistance, and yield by modifying surface properties and stimulating physiological responses, thus promoting sustainable practices across the food supply chain from production to packaging. Studies demonstrate ACP's role in minimizing chemical use, improving food safety, and boosting environmental sustainability, positioning it as a versatile tool for microbial control and quality preservation.

Materials and Methods

ACP systems typically employ configurations such as dielectric barrier discharge (DBD), plasma jets, gliding arc, corona discharge, radio frequency, microwave-induced plasma, and atmospheric glow discharge, operating at atmospheric pressure with gases like air, argon, or helium. Key parameters include voltage (5-20 kV), frequency (50 Hz-13.56 MHz), treatment time (seconds to minutes), gas flow rate (1-10 L/min), and distance from plasma source to sample (1-10 cm), optimized for specific applications like surface decontamination or seed treatment. Microbial inactivation is assessed via plate counts (e.g., CFU/mL reduction >4-6 log for *E. coli*, *Salmonella*), while food quality evaluates nutritional retention (e.g., vitamins via HPLC), sensory changes (colorimetry, texture analysis), and physicochemical properties (pH, water activity). Plant responses measure germination rate, seedling vigor, and gene expression via qPCR; low-moisture foods like spices and grains test mycotoxin degradation (ELISA) and spore inactivation.

Results and Discussion

ACP achieves >5-log reductions in pathogens on food surfaces, such as *Salmonella* on poultry (up to 6.5 log in 5 min) and *Aspergillus* spores on grains, with minimal quality impact due to non-thermal RONS action (e.g., OH⁻, NO⁻, O₃) etching cell membranes and DNA. In low-moisture foods, treatments reduce mycotoxins like aflatoxins by 70-90% via reactive species breakdown, extending shelf life without altering texture or nutrition. Agricultural applications show 20-50% improved seed germination (e.g., tomatoes, wheat) and 15-30% yield increases through enhanced wettability and hormone signaling, alongside biotic/abiotic stress tolerance. Food packaging benefits from plasma-modified films with improved barrier properties and antimicrobial coatings, reducing microbial migration. Challenges include non-uniformity on complex surfaces, scale-up for industry, and RONS residue safety, addressed by combining with ultrasound or optimizing feeds. Mechanisms involve UV radiation, electric fields, and etching, outperforming heat in preserving heat-labile compounds like vitamins (retention >90%).

Conclusion

ACP emerges as a pivotal technology for sustainable food processing, offering superior microbial decontamination, quality preservation, and agricultural enhancements without chemicals or heat damage.

Future prospects include hybrid systems, real-time monitoring, and regulatory standardization to fully integrate ACP into industry, reducing post-harvest losses by 20-40% and supporting global food security.

Author Contributions:

Funding Sources: No external funding received.

Acknowledgement: Not applicable.

Keywords: Atmospheric cold plasma, industrial microbiology, food safety, sustainable agriculture, reactive oxygen and nitrogen species

