

پراستیک اسید به عنوان ضد عفونی کننده سازگار با محیط زیست در صنعت پسته: مروری بر

مکانیسم اثر، کارایی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

نجمه پاکدامن^{*}، محمد مرادی^۲، امان‌الله جوانشاه^۱، محمد عبدالهی عزت‌آبادی^۱، احمد شاکر اردکانی^۲، ماریه

نادی^۱، نجمه صابری^۳، اعظم طاهری^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۲۳

چکیده

پسته (*Pistacia vera L.*) یکی از ارزشمندترین کالاهای صادراتی ایران است که حفظ کیفیت بهداشتی آن برای رقابت در بازارهای جهانی ضروری است. آلودگی میکروبی و سموم قارچی (به‌ویژه آفلاتوکسین) از عوامل اصلی برگشت محموله‌های صادراتی و آسیب به اعتبار این محصول به شمار می‌روند. روش‌های سنتی ضد عفونی نظیر هیپوکلریت سدیم با محدودیت‌هایی چون تولید محصولات جانبی مضر و کاهش اثربخشی در حضور مواد آلی روبرو هستند. در سال‌های اخیر، پراستیک اسید به عنوان یک اکسیدکننده قوی، ایمن و زیست‌سازگار با قابلیت تجزیه به فرآورده‌های بی‌خطر (آب، اکسیژن و دی‌اکسید کربن)، مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله مروری، با هدف تحلیل جامع مکانیسم اثر، اثربخشی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای کاربرد پراستیک اسید در فرآوری پسته انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد غلظت ۱٪ پراستیک اسید در حوضچه‌های شستشوی پایانه‌های فرآوری، موجب کاهش بار میکروبی (باکتری‌ها و قارچ‌ها) تا حدود ۱۰۰٪ می‌شود، بدون آنکه بر درصد لیپید، عدد پراکسید یا ویژگی‌های حسی محصول تأثیر منفی بگذارد. مکانیسم اصلی این ترکیب، اکسیداسیون پروتئین‌ها، لیپیدهای غشا و DNA میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. عدم برجای ماندن باقیمانده شیمیایی و هزینه‌ی عملیاتی مقرون‌به‌صرفه، از مزایای این روش است؛ با این حال، چالش‌هایی نظیر کاهش تدریجی غلظت مؤثر در حضور مواد آلی، پایش مستمر و بهینه‌سازی فرایند را الزامی می‌کند. در مجموع، پراستیک اسید به عنوان یک ضد عفونی کننده مؤثر، ایمن و منطبق با اصول کشاورزی پایدار، گزینه‌ای راهبردی برای جایگزینی ترکیبات کلردار در صنعت پسته ایران پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: پراستیک اسید، پسته، ضد عفونی کننده، آفلاتوکسین، فرآوری پس از برداشت

^۱ استادیار پژوهشی، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

^۲ دانشیار پژوهشی، ایستگاه تحقیقات پسته اردکان، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

^۳ کارشناس آزمایشگاه، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

* نویسنده مسئول: pakdaman@pri.ir

۱. مقدمه

هاشمی نسب و همکاران، ۱۳۹۶؛ جوانشاه و همکاران،

(۱۳۹۸).

با این حال، رقابت فزاینده صادرکنندگانی مانند آمریکا و ترکیه و سخت گیرانه تر شدن استانداردهای بهداشتی بازارهای هدف (به ویژه اتحادیه اروپا)، حفظ کیفیت بهداشتی این محصول را به یک ضرورت حیاتی تبدیل کرده است (Wu, 2007; Bui-Klimke *et al.*, 2014; European Food Safety Authority, 2020; Dini *et al.*, 2022). آلودگی میکروبی پسته به باکتری‌های شاخص (*شرشیاکلی*^۱، *سالمونلا*^۲ و *کلیفرمها*)، کپک‌ها، مخمرها و مهم‌تر از همه، میکوتوکسین‌ها (به ویژه آفلاتوکسین) از شایع‌ترین عوامل زیان اقتصادی و برگشت محموله‌های صادراتی ایران گزارش شده است (Umeh & Berkowitz, 2002; Akbas & Ozdemir, 2006; Centers for Disease and Prevention, 2009; Bui-Klimke *et al.*, 2014; Al-Moghazy *et al.*, 2014; Mateus *et al.*, 2021) اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۳، برای آفلاتوکسین مقدار مجاز ۴ ppb را تعریف نمود که این مقدار در سال ۲۰۰۹ به ۱۰ ppb تغییر کرد (Wu, 2007; Bui-Klimke *et al.*, 2014, European Food Safety Authority, 2020). همچنین سامانه هشدار سریع مواد غذایی و خوراک دام اتحادیه اروپا (RASFF^۳)، بین ژانویه ۲۰۲۰ تا ژوئن ۲۰۲۱، ۸۴ اخطار مربوط به آلودگی پسته

پسته (*Pistacia vera L.*) یکی از ارزشمندترین و ارزآورترین محصولات کشاورزی ایران است که سهم عمده‌ای در صادرات غیرنفتی کشور دارد. بر اساس آمارنامه وزارت صنعت، معدن و تجارت (۱۳۹۶)، ارزش صادرات این محصول در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ به ترتیب ۱/۲ و ۱/۴ میلیارد دلار بوده است؛ که ۳۱/۴ و ۳۲/۷ درصد از کل صادرات محصولات کشاورزی را تشکیل می‌دهد و آن را در رتبه نخست صادرات این بخش قرار داده است.

توسعه و افزایش تولیدات غیرنفتی، ضمن ارزش افزوده بالا و بهبود وضع اقتصادی کشور، موجب افزایش صادرات شده و ضریب تأثیرپذیری کشور از تحولات سیاسی و اقتصادی منطقه‌ای و جهانی که به واسطه تکیه بر اقتصاد نفتی به وجود می‌آید را کاهش می‌دهند. این امر ضرورت توجه به نقش کشاورزی و منابع طبیعی به‌عنوان یکی از ارکان اقتصاد کشور در ایجاد بستر مناسب برای توسعه صادرات و تحقق سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی را برجسته‌تر و اهمیت پسته به‌عنوان یکی منابع مهم صادرات غیرنفتی و ارزآورترین محصول کشاورزی کشور را بیش از پیش آشکار می‌سازد

^۱ *Escherichia coli*

^۲ *Salmonella sp.*

^۳ The Rapid Alert System for Food and Feed

است. پلاسمای سرد، گازی یونیزه شده حاوی گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن (RONS)، الکترون‌های آزاد و پرتو فرابنفش است که با تخریب غشای سلولی، اکسیداسیون پروتئین‌ها و آسیب به مواد ژنتیکی، میکروارگانیسم‌ها را غیرفعال می‌کند (Misra *et al.*, 2016; Nwabor *et al.*, 2022; Rao *et al.*, 2023; Shill *et al.*, 2025). این فناوری در کاهش آلودگی باکتریایی (از جمله سالمونلا و اشرشیاکلی)، قارچی (مانند *آسپرژیلوس فلاووس*) و همچنین میکوتوکسین‌ها (از جمله آفلاتوکسین B) در صنایع غذایی، مغزها و خشکبار نظیر بادام و پسته موفق عمل کرده و تأثیر منفی اندکی بر ویژگی‌های کیفی محصول دارد (Devi *et al.*, 2017; Olatunde *et al.*, 2021; Akhavan-Mahdavi *et al.*, 2023; Rao *et al.*, 2023; Kaur *et al.*, 2025). با این حال، هزینه بالای تجهیزات، نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای فرایند (نظیر گاز حامل، توان و زمان تیمار) و فقدان تأییدیه‌های گسترده نظارتی، از چالش‌های تجاری‌سازی این روش در مقیاس صنایع پسته به شمار می‌رود (Nwabor *et al.*, 2022).

در این میان، پراستیک اسید ($C_2H_4O_3$) یا پرسیدین، یک اکسیدکننده قوی و ایمن است که از ترکیب اسید استیک و پراکسید هیدروژن تولید می‌شود (Gehr *et al.*, 2003; Pietrysiak *et al.*, 2019). این ماده به دلیل طیف گسترده ضد میکروبی، تجزیه سریع به فرآورده‌های بی‌خطر (آب، اکسیژن و اسید استیک) و

کشورهای ترکیه، ایران و آمریکا به آفلاتوکسین و یک مورد آلودگی به آکراتوکسین A را ثبت کرد (Mateus *et al.*, 2021). این برگشت‌ها علاوه بر خسارت مالی مستقیم، به برند و اعتبار پسته ایران در بازارهای جهانی آسیب جدی وارد ساخته است.

برای رفع این چالش، تاکنون روش‌های گوناگونی برای کنترل آلودگی میکروبی، کاهش ضایعات و افزایش ماندگاری پسته ارزیابی شده‌اند (بشیری و همکاران، ۱۳۹۲؛ پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۹-ب) (Sharma *et al.*, 2009; Meshkani *et al.*, 2013; Nicolau-Lapeña *et al.*, 2020). ضد عفونی‌کننده‌های سنتی مانند هیپوکلریت سدیم (NaOCl) اگرچه مقرون به صرفه هستند، اما اثربخشی آن‌ها تحت تأثیر دما، pH و بقایای مواد آلی کاهش یافته و ممکن است به تشکیل فرآورده‌های جانبی سرطان‌زا مانند تری‌هالومتان‌ها منجر شوند (Zoellner *et al.*, 2018). از این رو، گرایش فزاینده‌ای به سمت جایگزین‌های ایمن‌تر مانند ترکیبات دارای گواهی GRAS¹ (شامل اسیدهای آلی، پراکسید هیدروژن و کربنات‌ها) ایجاد شده است (Romanazzi *et al.*, 2012; Feliziani *et al.*, 2016; Wisniewski *et al.*, 2016).

در سال‌های اخیر، فناوری پلاسمای سرد نیز به‌عنوان یک روش غیرحرارتی و سازگار با محیط زیست برای ضد عفونی محصولات غذایی مورد توجه قرار گرفته

¹ Generally recognized as safe

واکنش با ترکیبات آلی، فرآورده‌های جانبی سرطان‌زا نظیر تری‌هالومتان‌ها تولید کند (Zoellner *et al.*, 2018). ترکیبات کلردار دیگر نیز با چالش‌های مشابهی روبرو هستند. به همین دلیل، گرایش به حذف آن‌ها از چرخه ضد عفونی محصولات غذایی افزایش یافته است (Pablos *et al.*, 2018). در مقابل، ضد عفونی کننده‌هایی که عموماً ایمن شناخته می‌شوند، مانند اسیدهای آلی (اسید سیتریک، اسید استیک و اسید لاکتیک)، سدیم کربنات، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و پتاسیم کربنات، به عنوان جایگزین‌های ایمن تر مطرح شده‌اند (Romanazzi *et al.*, 2012; Feliziani *et al.*, 2016; Wisniewski *et al.*, 2016).

- **اشعه گاما و پرتو فرابنفش (UV):** پرتو دهی با اشعه گاما قادر است جمعیت میکروبی را به شدت کاهش دهد. برای نمونه، البشیر (۲۰۱۴) نشان داد که این روش تعداد کل باکتری‌ها و قارچ‌های پسته را به کمتر از 10CFU g^{-1} می‌رساند. پرتو فرابنفش (UV-C) نیز در ضد عفونی سطوح پسته کاربرد دارد و از آنجا که رویکردی غیرشیمیایی است، با استقبال مواجه شده، اما نفوذپذیری اندک آن در ماده غذایی، کارایی آن را به سطوحی که مستقیماً در معرض تابش هستند محدود می‌کند (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۸) (Gómez-López *et al.*, 2007; Koutchma *et al.*, 2009).

- **اُزن دهی:** اُزن (O_3) با پتانسیل اکسیدکنندگی 2.07V ، از قوی‌ترین اکسیدکننده‌های

عدم تولید محصولات جانبی مضر، توجه زیادی را در صنایع غذایی به خود جلب کرده است (Gehr *et al.*, 2003; Pietrysiak *et al.*, 2019; Suurnäkki *et al.*, 2020). پراستیک اسید برخلاف پراکسید هیدروژن تحت تأثیر آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز غیرفعال نشده و در حضور مواد آلی و دامنه وسیعی از دما (در محدوده ۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و pH (در محدوده ۱ تا ۸)، بدون نیاز به غلظت‌های بالا، پایدار و مؤثر باقی می‌ماند (Kitis, 2004; Joshi *et al.*, 2013).

هدف از این مقاله مروری، ارائه تحلیلی جامع و به روز از کاربرد پراستیک اسید در زنجیره فرآوری پسته و ترسیم مسیرهای پژوهشی آتی با رویکرد «از آزمایشگاه تا پایانه فرآوری» می‌باشد.

۲. روش‌های مرسوم کنترل آلودگی میکروبی و سموم قارچی در پسته

تاکنون روش‌های گوناگونی برای کاهش آلودگی میکروبی، مهار بیوسنتز سموم قارچی، حفظ کیفیت و افزایش ماندگاری فرآورده‌های باغی ارزیابی شده‌اند که کاربرد آن‌ها در مورد پسته نیز گزارش شده است. این روش‌ها به چند دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- **ضد عفونی با مواد شیمیایی سنتی:** هیپوکلریت سدیم (NaOCl) از دیرباز در شست‌وشوی میوه‌ها و سبزی‌ها به کار رفته است. این ماده ارزان و در دسترس است، اما اثربخشی آن به شدت تحت تأثیر دما، pH و حضور مواد آلی کاهش می‌یابد و ممکن است در

کیفیت پسته، بیش از ۹۰٪ آفلاتوکسین‌های B و بیش از ۹۹٪ انواع G را تخریب کرد (Babae *et al.*, 2022). با این حال، نیمه‌عمر کوتاه در آب (حدود ۲۰-۳۰ دقیقه)، حساسیت به دما، pH و مواد آلی و نیز هزینه بالای تجهیزات تولید و تزریق، از محدودیت‌های کاربرد گسترده آن محسوب می‌شود (Ekren & Ozkomur, 2016; Megahed *et al.*, 2019).

- تیمارهای حرارتی: استفاده از هوای داغ، آب گرم و بخار برای پاستوریزاسیون و ضدعفونی سطحی پسته به کار می‌رود. این روش‌ها کارایی خوبی دارند، اما در صورت کنترل نامناسب دما و زمان، ممکن است به تغییر رنگ، افت تردی و کاهش پذیرش حسی منجر شوند. نکته حائز اهمیت آن است که پسته سرشار از اسیدهای چرب غیراشباع (عمدتاً اسید لینولئیک و اولئیک) بوده و اعمال حرارت می‌تواند اکسیداسیون چربی را تشدید کند (Amaral *et al.*, 2006; Hojjati *et al.*, 2015; Schlörmann *et al.*, 2013). علاوه بر این، این روش‌ها مصرف انرژی نسبتاً بالایی دارند (Dini, 2021; Chen & Pan, 2022; Nazoori *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024; Evrendilek *et al.*, 2025).

- پوشش‌های خوراکی و نگهدارنده‌های طبیعی: پوشش‌دهی مغزها با فیلم‌های خوراکی بر پایه پروتئین‌ها یا پلی‌ساکاریدها (مانند ژلاتین، آلژینات، کیتوزان و صمغ عربی) به منظور کاهش سرعت اکسیداسیون چربی و حفظ تازگی محصول گزارش شده

مجاز در صنایع غذایی است. این گاز پس از واکنش به اکسیژن تبدیل می‌شود و بقایای شیمیایی برجای نمی‌گذارد (میرابوالفتحی و همکاران، ۱۳۹۷).

در تحقیقی که توسط بشیری و همکاران در سال ۱۳۹۲ و بر روی پسته رقم اوحدی انجام گرفت، اثر غوطه‌ور کردن سه نوع پسته آلوده (خشک با پوست سخت، خشک با پوست نرم و تازه با پوست نرم) در غلظت‌های مختلف ازن محلول (۰، ۴ و ۸ ppm) و زمان‌های تماس ۰ تا ۱۲ ساعت بر کاهش آفلاتوکسین‌های B1، B2، G1، G2 و مجموع آن‌ها بررسی شد. تیمارها در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد و pH معادل ۵/۵ انجام گرفت. نتایج نشان داد آفلاتوکسین B1 فراوان‌ترین و در عین حال حساس‌ترین ترکیب به تخریب توسط ازن بود. نمونه‌های شاهد تفاوت معنی‌داری در کاهش آفلاتوکسین‌ها نداشتند، اما تیمار با ازن موجب کاهش قابل توجه و وابسته به غلظت و زمان تماس شد. غلظت‌های ۴ و ۸ ppm به‌طور مشخص باعث افزایش درصد کاهش همه انواع آفلاتوکسین‌ها گردید. همچنین حساسیت تخریب به ترتیب در آفلاتوکسین‌های B1 و G1 بیشتر از B2 و G2 گزارش شد.

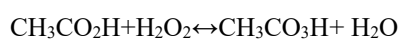
در تحقیقی دیگر، ترکیب UV-C با ازن و اسید سیتریک برای تخریب آفلاتوکسین‌ها بررسی شد و نتایج نشان داد که تیمار ترکیبی ۳۰ دقیقه ازن گازی، ۳۶ ساعت تابش UV-C و اسید سیتریک بدون اثر منفی بر

• مواد کاهنده/تجزیه کننده آفات توکسین:
ترکیباتی مانند هیدروسولفیت سدیم ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) تحت فشار بالا قادر به تجزیه آفات توکسین ها هستند (Jalili & Jinap, 2012). اما کاربرد این مواد در مقیاس صنعتی و تأثیر آن ها بر کیفیت نهایی پسته نیازمند پژوهش های بیشتری است.

۳. پراستیک اسید: خواص، مکانیسم عمل و ملاحظات زیست محیطی

۳-۱- خواص فیزیکی و شیمیایی

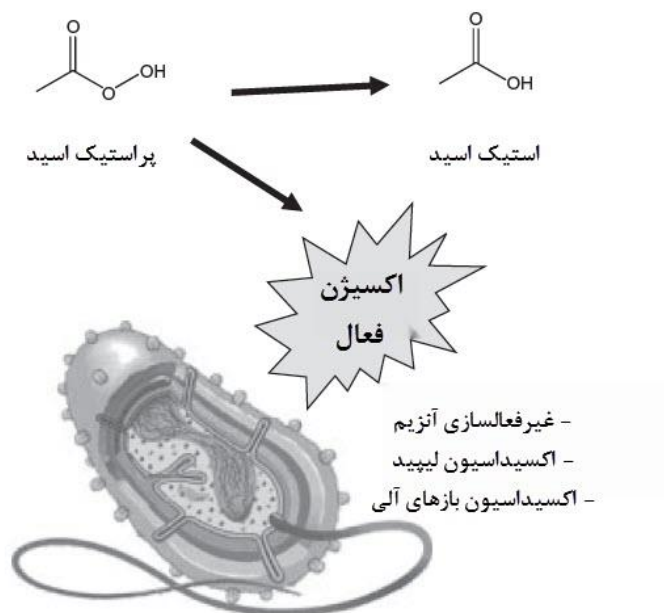
پراستیک اسید یک پراکسید آلی با پتانسیل اکسیدکنندگی بالاتر از کلر و دی اکسید کلر است. این ماده به صورت تجاری به شکل مخلوط تعادلی چهارجزئی شامل اسید استیک، پراکسید هیدروژن، پراستیک اسید و آب عرضه می شود که واکنش آن در معادله زیر نشان داده شده است (Gehr *et al.*, 2003; Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012):



پراستیک اسید مایعی شفاف، بی رنگ، بدون خاصیت کف کنندگی و با بوی تند اسید استیک (سرکه) و pH کمتر از ۲ است. این ماده در آب و حلال های آلی قطبی به هر نسبتی حل می شود و برخلاف پراکسید هیدروژن، توسط آنزیم های کاتالاز و پراکسیداز غیرفعال نمی گردد (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012). قدرت ضد میکروبی آن به حدی بالاست که در غلظت های بسیار پایین (حدود ۰.۰۱٪) خاصیت باکتری کشی،

است (خشنودی نیا و صداقت، ۱۳۹۲؛ شاکر اردکانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۹-ب) (Lee & Krochta, 2002; Min & Krochta, 2007; Meshkani *et al.*, 2013; Nicolau-Lapeña *et al.*, 2020). علاوه بر این، پوشش های خوراکی بر پایه لیپیدها شامل واکس ها، مونوگلیسریدهای استیله و رزین نیز در صنعت مغزها کاربرد دارند (Baldwin *et al.*, 2012; Galus & Kadzińska, 2015). این پوشش ها به دلیل ماهیت آب گریز، سد بسیار مؤثری در برابر جذب رطوبت محیطی ایجاد کرده و از افت تردی پسته جلوگیری می کنند (Baldwin *et al.*, 2012; Galus & Kadzińska, 2015). در بازار تجاری، پوشش های واکسی عمدتاً برای ایجاد براقیت و جذابیت ظاهری پسته های برشته و شور استفاده می شوند. با این حال، از آن جایی که لیپیدها سد نسبتاً ضعیفی در برابر اکسیژن ایجاد می کنند، پژوهش ها به سمت توسعه فیلم های کامپوزیت امولسیون (ترکیب لیپید با پروتئین یا پلی ساکارید) پیش رفته اند که هم زمان ویژگی های ممانعتی مناسبی در برابر رطوبت و اکسیژن فراهم می کنند (Baldwin *et al.*, 2012; Galus & Kadzińska, 2015; Aguirre-Joya *et al.*, 2016; Chiralt & Jiménez, 2016; Kumari *et al.*, 2026). پوشش ها گاهی حاوی ترکیبات ضد میکروبی طبیعی (اسانس ها) نیز هستند، اما نقش آن ها عمدتاً محافظتی و کندکننده رشد میکروب بوده و نمی توانند به سرعت بار میکروبی اولیه را کاهش دهند.

- اکسیداسیون گروه‌های سولفیدریل و پیوندهای گوگردی در پروتئین‌ها و آنزیم‌ها و در نتیجه غیرفعال‌سازی آن‌ها.
 - تخریب غشای سیتوپلاسمی از طریق اکسیداسیون لیپیدها و اختلال در عملکرد شیمیواسموتیک، که به نشت مواد سلولی و مرگ میکروب می‌انجامد.
 - غیرفعال‌سازی آنزیم کاتالاز و افزایش حساسیت به تنش اکسیداتیو.
 - آسیب به DNA از طریق اکسیداسیون بازها و توقف تکثیر سلولی.
- ۰/۰۳٪ قارچ‌کشی و ۰/۳٪ اسپورکشی) فعال می‌باشد (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012). سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) استفاده از آن را برای سالم‌سازی میوه‌ها و سبزی‌ها تأیید کرده است (Gehr *et al.*, 2003; Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012).
- ۲-۳- مکانیسم ضد میکروبی
- اثر ضد میکروبی پراستیک اسید عمدتاً از طریق آزادسازی گونه‌های فعال اکسیژن و اکسیداسیون بیومولکول‌های حیاتی پاتوژن‌ها اعمال می‌شود (شکل ۱). این فرایند شامل موارد زیر است (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012):



شکل ۱- مکانیسم ضد میکروبی پراستیک اسید بر پایه تولید اکسیژن فعال و اکسیداسیون بعدی بیومولکول‌های حیاتی

میکروارگانیزم‌های پاتوژن (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012).

استفاده کرد (Merk *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2008; Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012). با این حال، غلظت مؤثر آن در طول زمان و با افزایش دما یا تکرار دفعات استفاده کاهش می‌یابد، لذا پایش مستمر و تجدید محلول در کاربردهای صنعتی ضروری است (Merk *et al.*, 2002; Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012) همچنین محلول‌های با غلظت بالای ۱۵٪ ممکن است ناپایدار و بالقوه خطرناک باشند، از این رو در صنعت معمولاً از محلول‌های ۱۰-۱۵٪ (اغلب ۱۲٪) استفاده می‌شود (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012).

پراستیک اسید در محیط‌های آبی و غذایی به اسید استیک و پراکسید هیدروژن تجزیه می‌شود. لازم به توضیح است که پراستیک اسید اساساً یک مخلوط تعادلی چهارتایی شامل اسید استیک، پراکسید هیدروژن، پراستیک اسید و آب است؛ بنابراین هیدرولیز آن به اسید استیک و پراکسید هیدروژن یک واکنش برگشت پذیر محسوب می‌شود (Kitis, 2004; Zhao *et al.*, 2007). این محصولات نیز نهایتاً به آب، اکسیژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند. افزون بر این، پراستیک اسید یک مسیر تجزیه خودبه‌خودی و برگشت‌ناپذیر نیز دارد که در آن مستقیماً به اسید استیک و اکسیژن مولکولی تجزیه می‌شود و سرعت آن با افزایش دما و غلظت یون هیدروژن به‌طور چشمگیری

این ویژگی‌ها، پراستیک اسید را به یک ضد عفونی کننده با طیف وسیع علیه باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها و اسپورها تبدیل کرده است (Gonzalez-Aguilar *et al.*, 2012; Pietrysiak *et al.*, 2019; Suurnäkki, *et al.*, 2020). اثربخشی مکانیسم ضد میکروبی پراستیک اسید در محصولات مختلف تأیید شده است. ماری و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقی مشخص کردند که تیمار میوه‌های هسته‌دار مانند گیلان، زردآلو، هلو و شلیل با پراستیک اسید موجب کاهش پوسیدگی قهوه‌ای ناشی از قارچ *مونیلیا لاکس*^۱ و همچنین پوسیدگی نرم ناشی از قارچ *ریزوپوس استولونیفر*^۲ می‌گردد. اسپری پراستیک اسید بر برش‌های تازه میوه توت‌فرنگی نیز نشان داد که غلظت‌های کاربردی بر ویژگی‌های کیفی میوه تأثیری ندارد، اما موجب کاهش میکروارگانیزم‌های آلوده‌کننده، کپک‌ها، مخمرها و باکتری‌ها می‌گردد (Méndez-Galarraga *et al.*, 2019).

۳-۳- محصولات تجزیه و ملاحظات زیست‌محیطی

پراستیک اسید در محیط‌های آبی و غذایی به اسید استیک و پراکسید هیدروژن تجزیه می‌شود که خود نهایتاً به آب، اکسیژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند. بنابراین، پراستیک اسید محصول جانبی پایدار و مضرى برجای نمی‌گذارد و می‌توان از آن حتی در فرآیندهایی که آبکشی نهایی در آن‌ها انجام نمی‌شود،

¹ *Monilinia laxa*

² *Rhizopus stolonifer*

می‌تواند رشد کلی باکتری‌ها و قارچ‌ها را تا حدود ۹۹٪ نسبت به شاهد مهار کند. در ارزیابی تفکیکی سوبه‌های غالب، نکات زیر به دست آمد:

- **قارچ‌های مولد آفلاتوکسین و فسادزا:** کمترین غلظت (۰/۱٪) در کوتاه‌ترین زمان (۵/۰ دقیقه) موجب مهار کامل (۱۰۰٪) *آسپرژیلوس فلاووس* (هر دو سوبه توکسین‌زا و غیرتوکسین‌زا) و گونه‌های *آلترناریا*^۱ گردید. برای *آسپرژیلوس نایجر*^۲، غلظت ۰/۱٪ کاهش ۹۹٪/۹۴ را نشان داد که با افزایش غلظت و زمان به مهار کامل رسید.

- **مخمرها:** گونه‌های *پیکیا کودریاوتسوی*^۳، *ساکارومایسس*^۴ و *لاکانسیا ترموتولرانس*^۵ در تمام تیمارها بیش از ۹۹٪ کاهش یافتند.

- **باکتری‌ها:** غلظت ۰/۱٪ به تنهایی رشد باکتری‌های شناسایی شده شامل *باسیلوس پومیلوس*^۶، *باسیلوس سوبتیلیس*^۷، *اسینتوباکتر رادیورزیستنس*^۸ و *سودوموناس فلورسنس*^۹ را به طور کامل (۱۰۰٪) مهار کرد.

این نتایج نشان می‌دهد که پراستیک اسید حتی در غلظت پایین و زمان تماس کوتاه (۵/۰ دقیقه) قادر

افزایش می‌یابد (Zhao et al., 2008). همچنین در حضور یون‌های فلزات واسطه، مسیر سومی از تجزیه کاتالیزوری نیز فعال می‌شود که می‌تواند پایداری محلول را کاهش دهد (Zhao et al., 2008). بنابراین، پراستیک اسید محصول جانبی پایدار و مضر برای بر جای نمی‌گذارد و می‌توان از آن حتی در فرآیندهایی که آبکشی نهایی در آن‌ها انجام نمی‌شود، استفاده کرد (Merk et al., 2002; Gonzalez-Aguilar et al., 2012). با این حال، غلظت مؤثر آن در اثر هر دو مسیر تجزیه (هیدرولیز برگشت‌پذیر و تجزیه خودبه‌خودی برگشت‌ناپذیر) در طول زمان و با افزایش دما یا تکرار دفعات استفاده کاهش می‌یابد، لذا پایش مستمر و تجدید محلول در کاربردهای صنعتی ضروری است.

۴. **اثربخشی پراستیک اسید در کنترل فلور میکروبی پسته:** از آزمایشگاه تا پایانه فرآوری

۴-۱- مطالعات آزمایشگاهی

پاکدامن و همکاران (۱۳۹۹-الف) در یک مطالعه جامع آزمایشگاهی، تأثیر غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد پراستیک اسید را در زمان‌های تماس ۰/۵، ۱/۱۵، ۰/۲، ۰/۵ و ۲/۵ دقیقه بر جمعیت میکروبی پسته بررسی کردند. نتایج نشان داد که یک مرحله شستشو با غلظت ۰/۲٪

¹ *Alternaria* sp

² *A. niger*

³ *Pichia kudriavzevii*

⁴ *Saccharomyces* sp.

⁵ *Lachancea thermotolerans*

⁶ *Bacillus pumilus*

⁷ *B. subtilis*

⁸ *Acinetobacter radioresistens*

⁹ *Pseudomonas fluorescens*

قارچ‌ها را کاهش می‌دهند. از آنجا که تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت مشاهده نشد، غلظت ۱٪ به عنوان دوز بهینه و مقرون به صرفه برای کاربرد در پایانه‌های فرآوری توصیه گردید.

هم‌خوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و میدانی دیده شد، هرچند عواملی مانند هم‌زدگی مداوم حوضچه و دمای محیط می‌توانند اندکی بر کارایی اثر بگذارند. نکته بسیار مهم این است که تیمار با پراستیک اسید، «اثر معنی‌داری بر درصد لیپیدها و عدد پراکسید مغز پسته» بلافاصله و شش ماه پس از فرآوری نداشت (پاکدامن و همکاران، ۱۴۰۳؛ پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۹-الف). این بدان معناست که پراستیک اسید کیفیت چربی پسته را تخریب نمی‌کند و از این نظر، برای مصرف‌کننده ایمن است. با این وجود، مشاهده شد که پس از شش ماه انبارداری، آلودگی میکروبی حدود ۵٪ افزایش یافت که به آلودگی‌های ثانویه در مراحل پس از شستشو (خشک‌کردن، بسته‌بندی و نگهداری) نسبت داده شد. بنابراین، برای حفظ کیفیت میکروبی در بلندمدت، رعایت اصول بهداشتی در تمام مراحل پس از ضد عفونی الزامی است.

۵. مقایسه پراستیک اسید با سایر روش‌های ضد عفونی

پراستیک اسید در مقایسه با ضد عفونی‌کننده‌های رایج مزایای مشخصی دارد:

به حذف کامل مهم‌ترین میکروارگانیسم‌های آلوده‌کننده پسته است.

مطالعات بر روی سایر خشکبار نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. در تحقیقی دیگر که توسط ریبری و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، اثر ضد عفونی‌کنندگی پراستیک اسید بر دانه‌های آجیلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این محققین نشان داد که علی‌رغم وجود آلودگی میکروبی، رطوبت و فعالیت آبی زیاد اولیه، آفلاتوکسین در هیچ کدام از نمونه‌های تیمار شده تشخیص داده نشد. شمارش کلی باکتری‌ها، قارچ‌ها و اندازه‌گیری مقدار آفلاتوکسین نشان داد که شرایط بهینه ضد عفونی شامل ۱۵ دقیقه تماس با غلظت 140 L^{-1} پراستیک اسید می‌باشد. در این تحقیق ثابت شد که پراستیک اسید در غلظت مورد استفاده، هیچ تأثیری بر آفلاتوکسین ندارد و در واقع اثر آن با کنترل جمعیت قارچی بروز داده می‌شود.

۲-۴- مطالعات میدانی در پایانه فرآوری

پاکدامن و همکاران (۱۴۰۳)، کارایی پراستیک اسید را در شرایط واقعی یک پایانه فرآوری پسته و در حوضچه شستشو ارزیابی کردند. در این مطالعه، پسته‌ها به صورت انبوه (بدون انجام شستشوی اولیه با آب) مستقیماً در معرض محلول ضد عفونی‌کننده قرار گرفتند و پس از غوطه‌وری نیز شستشوی نهایی با آب انجام نشد. نتایج حاکی از آن بود که غلظت‌های ۱٪ و ۲٪ به‌طور معنی‌داری (تا ۱۰۰٪) جمعیت باکتری‌ها و

و پراستیک اسید در کاهش جمعیت باکتری *سالمونلا* بررسی شد. (Megahed *et al.*, 2019) نتایج آن‌ها نشان داد که پراستیک اسید در کاهش جمعیت این باکتری مؤثرتر بود. در واقع آزن یک اکسیدکننده قوی است که قادر است طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها را از بین ببرد و محصولات جانبی مضر نیز تولید نمی‌کند، اما یکی از مسائل مهمی که در ارتباط با کاربرد آن وجود دارد، هزینه‌بر بودن آن است و معمولاً به عنوان یک روش ضدعفونی گران‌قیمت شناخته می‌شود (Ekren & Ozkomur, 2016).

• در مقایسه با UV-C: پراستیک اسید کلیه سطوح محصول (از جمله نواحی سایه‌دار و شکاف‌ها) را پوشش می‌دهد، در حالی که UV تنها سطوح در معرض تابش مستقیم را ضدعفونی می‌کند (Gómez-López *et al.*, 2007; Koutchma *et al.*, 2009).

• در مقایسه با پوشش‌های خوراکی: پراستیک اسید قادر است بار میکروبی اولیه را به‌سرعت و به‌طور چشمگیری کاهش دهد (پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۹ و Thomas *et al.*, 2013; Kitis, 2004; Pietrysiak *et al.*, 2016; Zoellner *et al.*, 2018; Suurnäkki *et al.*, 2020) حال آنکه پوشش‌ها عمدتاً نقش بازدارنده و محافظتی برای جلوگیری از رشد مجدد دارند (شاکر اردکانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۹-ب) (Meshkani *et al.*, 2013; Nicolau-Lapeña *et al.*, 2020).

• در مقایسه با هیپوکلریت سدیم: پراستیک اسید فرآورده‌های جانبی کلردار مضر تولید نمی‌کند، باقیمانده شیمیایی بر محصول برجا نمی‌گذارد و بر خواص حسی (طعم و بو) اثر منفی ندارد (Alvaro *et al.*, 2018; Zoellner *et al.*, 2009). در تحقیقی که در سال ۲۰۰۹ انجام گرفت (Alvaro *et al.*, 2009)، اثرات ضدعفونی‌کننده دو ترکیب پراستیک اسید و هیپوکلریت سدیم در مرحله پس از برداشت گوجه فرنگی، فلفل شیرین و خیار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که ترکیب پراستیک اسید، در مقایسه با هیپوکلریت سدیم، برای شست‌وشوی میوه مناسب‌تر است و ماندگاری پس از برداشت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، پراستیک اسید به دلیل سمیت کمتر از جنبه زیست‌محیطی و سلامت مصرف‌کننده نیز حائز اهمیت می‌باشد و بر مشخصات حسی محصول نیز تأثیر چندانی ندارد.

• در مقایسه با آزن: هر دو اکسیدکننده قوی هستند، اما پراستیک اسید در حضور بار آلی بالا و دامنه وسیعی از pH و دما پایدارتر است و به تجهیزات پیچیده و پرهزینه تولید در محل نیاز ندارد (Ekren & Megahed *et al.*, 2019; Ozkomur, 2016). هزینه عملیاتی کمتر و سهولت کاربرد، پراستیک اسید را به گزینه‌ای جذاب‌تر برای پایانه‌های فرآوری پسته تبدیل کرده است. در تحقیقی که در سال ۲۰۱۹ انجام گرفت، اثرات سه ضدعفونی‌کننده هیپوکلریت سدیم، آزن مایع

۶. ملاحظات عملیاتی در مقیاس بزرگ

برای موفقیت در کاربرد صنعتی پراستیک اسید در پایانه‌های فرآوری پسته، توجه به چند نکته عملیاتی ضروری است:

- **روش اعمال و کنترل پارامترها:** روش غوطه‌وری در حوضچه‌های شستشو، روشی مناسب و قابل اجرا برای حجم بالای محصول است. کنترل دقیق دو پارامتر غلظت و زمان تماس کلید موفقیت است. غلظت توصیه شده، ۱٪ پراستیک اسید است که هم از نظر میکروبیولوژیکی مؤثر بوده و هم از دیدگاه اقتصادی بهینه می‌باشد. نکته عملیاتی مهم آن است که با افزایش حجم عملیات و میزان مواد آلی ورودی به حوضچه (از جمله شیرابه‌ها و ضایعات پسته)، غلظت مؤثر پراستیک اسید ممکن است به تدریج کاهش یابد. بنابراین، پایش مستمر غلظت پراستیک اسید در حوضچه (با استفاده از کیت‌های سنجش سریع یا روش‌های تیتراسیون) و تجدید محلول در فواصل زمانی معین یا به صورت جریان مداوم ضروری است. زمان تماس نیز در مقیاس آزمایشگاهی ۵/۰ دقیقه گزارش شده، اما در شرایط صنعتی، این پارامتر تابع عواملی چون نرخ تغذیه پسته به حوضچه، سرعت جریان محلول و طراحی هیدرولیکی حوض (مدت ماند هیدرولیکی یا میانگین زمانی که یک حجم مشخص از محلول در داخل حوضچه باقی می‌ماند) خواهد بود.

- **ملاحظات ایمنی و زیست‌محیطی:** پراستیک اسید در غلظت‌های توصیه شده، ترکیبی با سمیت پایین و تجزیه پذیر است که به سرعت به آب، اکسیژن و اسید استیک تجزیه می‌شود و از این رو، باقی مانده‌های مضر در محصول یا پساب ایجاد نمی‌کند. با این حال، کارکنان پایانه باید از تجهیزات حفاظت فردی (دستکش، عینک و ماسک) در هنگام کار با محلول غلیظ پراستیک اسید استفاده نمایند. همچنین، طراحی سیستم تهویه مناسب در محل استقرار حوضچه‌ها برای جلوگیری از تجمع بخارات ضروری است.

- **چالش‌ها و راهکارها:** چالش اصلی در کاربرد صنعتی پراستیک اسید، نبود اثر باقی مانده درازمدت و احتمال آلودگی مجدد محصول پس از شستشو است (پاکدامن و همکاران، ۱۴۰۳). برای غلبه بر این محدودیت، لازم است مراحل پس از ضد عفونی — شامل خشک کردن بهداشتی، بسته بندی در شرایط کنترل شده و نگهداری در انبارهای با رطوبت و دمای مناسب — با دقت انجام شود. همچنین، در صورت نیاز به حفاظت طولانی تر، می‌توان استفاده از پوشش‌های خوراکی حاوی مواد ضد میکروبی طبیعی را به عنوان مکمل در نظر گرفت.

۷. نتیجه گیری

پراستیک اسید ۱٪ در حوضچه شستشوی پایانه‌های فرآوری پسته، روشی کارآمد، ایمن و مقرون به صرفه برای کاهش سریع و چشمگیر بار میکروبی (تا ۱۰۰٪)

منابع

- بدون اثر منفی بر کیفیت چربی و ویژگی‌های حسی محصول است. یافته‌های میدانی هم‌خوانی بالایی با نتایج آزمایشگاهی داشته و فناوری مربوطه آمادگی لازم برای انتقال به مقیاس تجاری را دارد. با این حال، فقدان اثر باقی‌مانده طولانی‌مدت، لزوم رعایت دقیق بهداشت در مراحل پس از شستشو (خشک‌کردن، بسته‌بندی و انبارداری) را گوشزد می‌کند. به‌کارگیری این رویکرد می‌تواند سهم بسزایی در کاهش ضایعات، ارتقای کیفیت بهداشتی و بازیابی جایگاه پسته ایران در بازارهای جهانی ایفا نماید.
- ۸. پیشنهادها برای تحقیقات آینده**
- با توجه به پتانسیل بالای پراستیک اسید، پژوهش‌های آتی می‌توانند در زمینه‌های زیر متمرکز شوند:
- بررسی غلظت‌های کمتر از ۱٪ (در سطح ppm) به منظور دستیابی به غلظت مؤثر.
 - ارزیابی بلندمدت کیفیت پسته تیمار شده (تغییرات اکسایشی، ترکیبات فنلی، ویژگی‌های حسی و رنگ) طی انبارداری طولانی.
 - مطالعه اثر هم‌افزایی پراستیک اسید با روش‌های مکمل مانند پوشش‌های خوراکی ضد میکروبی یا پرتودهی UV برای مهار آلودگی‌های ثانویه.
 - توسعه فرمولاسیون‌های پایدارتر پراستیک اسید به منظور افزایش عمر محلول در حوضچه‌های شستشوی صنعتی.
- آمارنامه وزارت صنعت، معدن و تجارت. (۱۳۹۶). گزارش تحلیل صادرات کالاهای غیر نفتی کشور طی دوازده ماهه سال ۹۵. معاونت توسعه صادرات. ۹۳ صفحه.
- بختیاری، ف.، مقصودی، ح.، خراسانی، س.، و اخوان، ح. ر. (۱۳۹۸). تأثیر پرتودهی فرابنفش بر برخی ویژگی‌های کیفی مغز پسته خشک. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۷ (۹۸)، ۴۹-۴۱.
- بشیری، پ.، حداد خداپرست، م. ح.، صداقت، ن.، طباطبائی یزدی، ف.، و نصیری محلاتی، م. (۱۳۹۲). اثر آزن محلول در آب بر کاهش آفلاتوکسین پسته وارسته اوحدی. *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، ۹ (۳)، ۲۱۱-۲۱۵.
- پاکدامن، ن.، مرادی قهدریجانی، م.، جوانشاه، ا.، شاکراردکانی، ا.، طاهری، ا.، صابری، ن.، و فرج‌پور، ع. (۱۳۹۹-الف). *بررسی اثر پراستیک اسید بر میکروفلور عمومی میوه خشک پسته*. گزارش نهایی، پژوهشکده پسته.
- پاکدامن، ن.، مرادی قهدریجانی، م.، جوانشاه، ا.، عبدالهی عزت آبادی، م.، نادى، م.، صابری، ن.، و فرج‌پور، ع. (۱۴۰۳). *اثر استفاده از پراستیک اسید در ترمینال‌ها بر آلودگی*

- میکروبی پسته. گزارش نهایی، پژوهشکده پسته.
- پاکدامن، ن.، شاکر اردکانی، ا.، صابری، ن.، طاهری، ا. و طالقانی، ف. (۱۳۹۹-ب). بررسی اثر انجماد بر افزایش ماندگاری پسته تازه رقم اکبری. گزارش نهایی، پژوهشکده پسته.
- جوانشاه، ا.، هاشمی نسب، ح.، ابطحی، س. م.، شاکر اردکانی، ا.، طاهری، ا.، صابری، ن.، رفیعی دولت آبادی، ع.، اسماعیلی رنجبر، ع. و اکبری پور، ا. (۱۳۹۸). بررسی رابطه انس و عیار در چهار رقم تجاری پسته ایران (کله قوچی، احمدآقایی، اوحدی و اکبری). *مجله علوم و فناوری پسته*، ۴(۷)، ۴۱-۵۸.
- خشنودی نیا، س.، و صداقت، ن. (۱۳۹۲). تأثیر پوشش خوراکی ژلاتینی حامل آنتی اکسیدان بر پایداری اکسیداسیونی و ویژگی های حسی پسته ی برشته ی اوحدی. *مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران*، ۹(۱)، ۲۰-۱۱.
- شاکر اردکانی، ا.، هاشمی، م.، و میرزاعلیان دستجردی، ع. (۱۳۹۸). اثر پوشش خوراکی صمغ عربی حاوی اسانس آویشن شیرازی بر حفظ خصوصیات کیفی پسته تازه رقم احمدآقایی. *مجله علوم و صنایع غذایی*، ۱۶(۸۷)، ۱۲۶-۱۱۳.
- Al-Moghazy, M., Boveri, S., & Pulvirenti, A. (2014). Microbiological safety in میرابوالفتحی، م.، کرمی اسبو، ر.، و چیت ساز، م. (۱۳۹۷). استفاده از گاز اوزون برای کاهش آلودگی پسته به آفلاتوکسین و قارچ های مولد آن. دستورالعمل اجرایی، موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور.
- هاشمی نسب، ح.، اسماعیل پور، ع.، تاج آبادی پور، ع. و جوانشاه، ا. (۱۳۹۶). معرفی برنامه های به نژادی تحمل به شوری پسته (*Pistacia vera* L.) در ایران: ظرفیت ها، چالش ها و راهبردهای پیش رو. اولین همایش ملی شورورزی، یزد.
- Aguirre-Joya, J. A., Álvarez, B., Ventura, J. M., García-Galindo, J. O., De León-Zapata, M. A., Rojas, R. Saucedo, S., & Aguilar, C. N. (2016). Edible coatings and films from lipids, waxes, and resins. In: *Edible food packaging* (1st Edition), CRC Press.
- Akbas, M. Y., & Ozdemir, M. (2006). Effect of different ozone treatments on aflatoxin degradation and physicochemical properties of pistachios. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(13), 2099-2104.
- Akhavan-Mahdavi, S., Mirzazadeh, M., Alam, Z., & Solaimanimehr, S. (2023). The effect of chitosan coating combined with cold plasma on the quality and safety of pistachio during storage. *Food Science & Nutrition*, 11, 4296-4307.

- <https://www.cdc.gov/salmonella/pistachios/update.html>
- Chen, C., & Pan, Z. (2022). Postharvest processing of tree nuts: Current status and future prospects- A comprehensive review. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1702-1731.
- Devi, Y., Thirumdas, R., Sarangapani, C., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, 187-191.
- Dini, A. (2021). Optimization of the pistachio roasting process with hot air using the response surface methodology. *Pistachio and Health Journal*, 4(4), 4-27.
- Dini, A., Esmacili Nadimi, A., & Behmaram, K. (2022). The effect of Monitoring system on risk assessment of aflatoxins in Iran's pistachio nuts exported to the E.U. during 2012-2018. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 21(1), e123951.
- Ekren, O., & Ozkomur, A. (2016). Influence of ozone and peracetic acid disinfection on adhesion of resilient liners to acrylic resin. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 8(4), 290-295.
- Ervendilek, G. A., Mustulogu, S., & Turan, S. (2025). Impact of pulsed electric fields technology on surface disinfection and quality peroperties of pistachios. *Food Control*, 171, 111088.
- pistachios and pistachio containing products. *Food Control*, 36, 88-93.
- Alvaro, J. E. O., Moreno, S., Diane, F., Santos, M., Carrasco, G., & Urrestarazu, M. (2009). Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 11-15.
- Amaral, J. S., Casal, S., Seabra, R. M., & Oliveira, B. P. (2006). Effects of roasting on hazelnut lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4), 1315-1321.
- Chiralt, A., & Jiménez, A. (2016). Films and Coatings from lipids and wax. In: *Edible food packaging* (1st Edition), CRC Press.
- Babae, R., Karami-Osboo, R., & Mirabolfathy, M. (2022). Evaluation of the use of Ozone, UV-C and Citric acid in reducing aflatoxins in pistachio nut. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104276.
- Baldwin, E. A., Hagenmaier, R., & Bai, J. (2012). *Edible coatings and films to improve food quality* (2nd ed.). CRC Press.
- Bui-Klimke, T. R., Guclu, H., Kensler, T. W., Yuan, J. M., & Wu, F. (2014). Aflatoxin regulations and global pistachio trade: insights from social network analysis. *PLOS ONE*, 9(3), e92149. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092149>
- Centers for Disease Control and Prevention, CDC. (2009). *Salmonella* in pistachio nuts.

- acid. *Decontamination of Fresh and Minimally Processed Produce*, 215-223.
- Hojjati, M., Calín-Sánchez, Á., Razavi, S. H., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2013). Effect of roasting on colour, volatile composition and sensory profile of pistachio. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(12), 2630-2639.
- Jalili, M., and Jinap, S. (2012). Role of sodium hydrosulphite and pressure on the reduction of aflatoxins and ochratoxin A in black pepper. *Food Control*, 27(1), 11-15.
- Joshi, K., Mahendran, R., Alagusundaram, K., Norton, T., & Tiwari, B. (2013). Novel disinfectants for fresh produce. *Trends in Food Science & Technology*, 34(1), 54-61.
- Kaur, G., Sandhya, Kaur, M., Challana, V., & Kaur, S. (2025). Application of cold plasma, a novel nonthermal method on fruit juices: a review on quality and safety. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 17(1), 163-189.
- Kitis, M. (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review. *Environment International*, 30(1), 47-55.
- Koutchma, T., Forney, L., & Moraru, C. I. (2009). *Ultraviolet Light in Food Technology: Principles and Applications*. CRC Press.
- Kumari, M., Kodan, S., Khangwal, I. (2026). Lipid and wax: edible coating and films. In: *Trends in edible packaging: a sustainable approaches for postharvest*
- European Food Safety Authority, EFSA. (2020). Outcome of a public consultation on the draft risk assessment of aflatoxins in food. *EFSA Supporting Publications*, 17(3), 1798E.
- Feliziani, E., Lichter, A., Smilanick, J. L., & Ippolito, A. (2016). Disinfecting agents for controlling fruit and vegetable diseases after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 122, 53-69.
- Gad, S. (2014). Cadmium In: Wexler, P.(Ed.), *Encyclopedia of Toxicology*. Academic Press, San Diego.
- Galus, S., & Kadzińska, J. (2015). Food applications of emulsion-based edible films and coatings. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 273-283.
- Garg, A., Namboodiri, V., Smith, B., Al-Anazi, A., Murugesan, B., & Bowman, T. (2013). Disinfection of wastewater with peracetic acid (PAA) and UV combined treatment: a pilot study. *Disinfection and Reuse Symposium: Water Environment Federation*.
- Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P., & Payment, P. (2003). Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, 37(19), 4573-4586.
- Gómez-López, V. M., Ragaert, P., Debevere, J., & Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(9), 464-473.
- González-Aguilar, G., Ayala-Zavala, J. F., Chaidez-Quiroz, C., Heredia, J. B., & Campo, N. C. (2012). Peroxyacetic

- Merk, T. L., Malchesky, P. S., & Liu, C. C. (2002). Electrolytic synthesis of peracetic acid. Steris, February.
- Meshkani, M., Mortazavi, A., & Pourfallah, Z. (2013). Antimicrobial and physical properties of a chickpea protein isolate-based film containing essential oil of thyme using response surface methodology. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 8(1), 93-104.
- Min, S., & Krochta, J. M. (2007). Ascorbic acid-containing whey protein film coatings for control of oxidation. *Agricultural Food Chemistry*, 55(8), 2964-2969.
- Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J. (2016). Cold plasma in food and agriculture: fundamental and applications, Academic Press.
- Nazoori, F., Zamani Bahramabadi, E., & Rezaei, H. (2024). Effect of sun drying on pistachio quality and health benefits. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 11(3), 299-308.
- Nicolau-Lapeña, I., Colàs-Medà, P., Alegre, I., Aguiló-Aguayo, I., Muranyi, P., & Viñas, I. (2020). *Aloe vera* gel: an update on its use as a functional edible coating to preserve fruits and vegetables. *Progress in Organic Coatings*, 106007.
- Nwabor, O. F., Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K., Anumudu, C., & Hart, A. (2022). A cold plasma technology for ensuring the microbiological safety and quality of foods. *Food Engineering Reviews*, 14, 535-554.
- management of fruits and vegetables*. Springer.
- Lee, S. Y., & Krochta, J. M. (2002). Accelerated shelf life testing of whey-protein-coated peanuts analyzed by static headspace gas chromatography. *Agricultural Food Chemistry*, 50(7), 2022-2028.
- Liu, Y., Peng, X., Huang, Y., Hu, H., Li, C., Chen, Y., Yu, Q., & Wang, Y. (2024). Recent advances in the occurrence, mechanisms, influence factors and control strategies of process contaminations in nuts: a comprehensive review. *Food Control*, 159, 110265.
- Mateus, A. R. S., Barros, S., Pena, A., & Silva, A. S. (2021). Mycotoxins in pistachios (*Pistacia vera* L.): methods for determination, occurrence, decontamination. *Toxins*, 13, 682.
- Megahed, A., Aldridge, B., & Lowe, J. (2019). Comparative study on the efficacy of sodium hypochlorite, aqueous ozone, and peracetic acid in the elimination of *Salmonella* from cattle manure contaminated various surfaces supported by Bayesian analysis. *PLOS ONE*, 14(5), e0217428.
- Méndez-Galarraga, M. P., Salsi, M. S., Piagentini, A. M., & Pirovani, M. E. (2019). Spray washing disinfection with peracetic acid in the processing of fresh-cut strawberries: an alternative for dipping techniques. *International Journal of Fruit Science*, 19(3), 258-275.

- grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 141-147.
- Schlörmann, W., Birringer, M., Böhm, V., Löber, K., Jahreis, G., Lorkowski, S., Müller, A. K., Schöne, F., & Glei, M. (2015). Influence of roasting conditions on health-related compounds in different nuts. *Food Chemistry*, 180, 77-85.
- Sharma, V. K., Yngard, R. A., & Lin, Y. (2009). Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 83-96.
- Sheikhi, A., Mirdehghan, S. H., Arab, M. M., Eftekhari, M., Ahmadi, H., Jamshidi, S., & Gheysarbigi, S. (2020). Novel organic-based postharvest sanitizer formulation using Box Behnken design and mathematical modeling approach: A case study of fresh pistachio storage under modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 160, 111047.
- Shill, N., & Sit, N. (2025). Application of cold plasma as a technique for minimal processing of fruits. *Food Production, Processing and Nutrition*, 7(43), <https://doi.org/10.1186/s43014-025-00319-y>
- Suurnäkki, S., Pulkkinen, J. T., Lindholm-Lehto, P. C., Tirola, M., & Aalto, S. L. (2020). The effect of peracetic acid on microbial community, water quality, nitrification and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) performance in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 516, 734534.
- Olatunde O. O., Shiekh, K. A., & Benjakul, S. (2021). Pros and cons of cold plasma technology as an alternative non-thermal processing technology in seafood industry. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 617-627.
- Pablos, C., Romero, A., de Diego, A., Vargas, C., Bascón, I., Pérez-Rodríguez, F., & Marugán, J. (2018). Novel antimicrobial agents as alternative to chlorine with potential applications in the fruit and vegetable processing industry. *International Journal of Food Microbiology*, 285, 92-7.
- Pietrysiak, E., Kummer, J. M., Hanrahan, I., & Ganjyal, G. M. (2019). Efficacy of surfactant combined with peracetic acid in removing *Listeria innocua* from fresh apples. *Journal of Food Protection*, 82(11), 1965-1972.
- Rao, W., Li, Y., Dhaliwal, H., Feng, M., Xiang, Q., Roopesh, M. S., Pan, D., & Du, L. (2023). The application of cold plasma technology in low-moisture foods. *Food Engineering Reviews*, 15(1), 86-112.
- Ribeiro, M., Freitas-Silva, O., Castro, I. M., Teixeira, A., Marques-da-Silva, S. H., Sales-Moraes, A. C. S., Abreu, L. F., & Sousa, C. L. (2020). Efficacy of sodium hypochlorite and peracetic acid against *Aspergillus nomius* in Brazil nuts. *Food Microbiology*, 90, 103449.
- Romanazzi, G., Lichter, A., Gabler, F.M., & Smilanick, J. L. (2012). Recent advances on the use of natural and safe alternatives to conventional methods to control postharvest gray mold of table

- Thomas, P., Bruns, A., Ganzer, A., Jünemann, T., Kordex, L., Krone, N., Metz, H. N., Sandmann, I., Schorling, D., & Schröder, A. (2016). Peracetic acid and atmospheric plasma as alternatives for packaging disinfection in the dairy industry. *Milk Science International-Milchwissenschaft*, 69(1), 2-6.
- Umeh, O. & Berkowitz, L. B. (2002). *Klebsiella* infections. eMedicine.com.
- Wisniewski, M., Droby, S., Norelli, J., Liu, J., & Schena, L. (2016). Alternative management technologies for postharvest disease control: the journey from simplicity to complexity. *Postharvest Biology and Technology*, 122, 3-10.
- Wu, F. (2007). A tale of two commodities: how EU mycotoxin regulations have affected US tree nut industries. *World Mycotoxin Journal*, 1(1), 95-102. <https://doi.org/10.3920/WMJ2008.x011>
- Zhao, X., Cheng, K., Hao, J., & Liu, D. (2008). Preparation of peracetic acid from hydrogen peroxide, part II: Kinetics for spontaneous decomposition of peracetic acid in the liquid phase. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 284(1-2):58-68.
- Zoellner, C., Aguayo-Acosta, A., Siddiqui, M. W., & Dávila-Aviña, J. (2018). Peracetic acid in disinfection of fruits and vegetables. *Postharvest Disinfection of Fruits and Vegetables*: Elsevier, p. 53-66.

Peracetic Acid as an Eco-Friendly Disinfectant in the Pistachio Industry: A Review of Mechanism of Action, Efficacy, Challenges, and Future Prospects

Najmeh Pakdaman¹, Mohammad Moradi², Amanollah Javanshah¹, Mohammad Abdolahi Ezzatabadi¹, Ahmad Shakerardekani², Marieh Nadi¹, Najmeh Saberi³ and Azam Taheri³

Abstract

Pistachio (*Pistacia vera* L.) is one of Iran's most valuable export commodities, and maintaining its hygienic quality is essential to compete in global markets. Microbial contamination and mycotoxins (particularly aflatoxin) are the primary causes of export shipment rejections and damage to the product's reputation. Traditional disinfection methods, such as sodium hypochlorite, face limitations due to the formation of harmful by-products and reduced efficacy in the presence of organic matter. In recent years, peracetic acid has gained attention as a potent, safe, and environmentally friendly oxidant that decomposes into harmless residues (water, oxygen, and carbon dioxide). This review aims to comprehensively analyze the mechanism of action, efficacy, challenges, and prospects of peracetic acid application in pistachio processing. Findings demonstrate that a 1% peracetic acid solution in terminal washing tanks can reduce microbial load (bacteria and fungi) by up to approximately 100% without negatively affecting lipid percentage, peroxide value, or sensory properties. The primary antimicrobial mechanism involves oxidation of proteins, membrane lipids, and DNA of microorganisms. The absence of chemical residues and cost-effective operation are key advantages of this approach; however, challenges such as the gradual decline in effective concentration in the presence of organic matter necessitate continuous monitoring and process optimization. Overall, peracetic acid is proposed as an effective, safe, and sustainable agriculture-compliant disinfectant and a strategic alternative to chlorinated compounds in Iran's pistachio industry.

Keywords: Peracetic acid; Pistachio; Disinfection; Aflatoxin; Postharvest processing

¹ Research Assistant Professor, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran.

² Research Associate Professor, Pistachio Research station, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

³ Lab Expert, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran.

* Corresponding Author: pakdaman@pri.ir