

مروری جامع بر آلودگی سالمونلا در محصولات کشاورزی با تأکید بر پسته: عوامل مؤثر، مسیرهای انتقال و راهبردهای کنترلی در صنایع غذایی

مهذخت ارجمند کرمانی^{*}

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

چکیده

سالمونلا (*Salmonella spp.*) یکی از مهم‌ترین عوامل بیماری‌زای قابل انتقال از غذا به انسان است که در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به نقش آن در آلودگی محصولات کشاورزی و گیاهی معطوف شده است. برخلاف تصور رایج، محصولات خشک از جمله آجیل‌ها، به‌ویژه پسته، می‌توانند به‌عنوان ناقل سالمونلا عمل کنند و سلامت مصرف‌کنندگان را تهدید نمایند. پسته به دلیل ارزش اقتصادی بالا، مصرف گسترده داخلی و صادرات جهانی، و فرآوری محدود پیش از مصرف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این مقاله مروری، بررسی جامع منابع، علل و مسیرهای انتقال سالمونلا در محصولات کشاورزی با تمرکز ویژه بر زنجیره تولید پسته به عنوان یک مطالعه موردی مهم و نظام‌مند است که به تحلیل عوامل و ارائه راهکارهای کنترلی مؤثر در زنجیره تولید و فرآوری می‌پردازد. مطالعات نشان می‌دهند که عوامل محیطی شامل خاک و کودهای حیوانی آلوده، آب آبیاری نامطلوب، حضور حیوانات و پرندگان، تماس با تجهیزات آلوده در مراحل برداشت و فرآوری، و شرایط نامطلوب خشک‌کردن و نگهداری، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در آلودگی پسته به سالمونلا هستند. اگرچه فعالیت آبی پایین پسته مانع رشد فعال باکتری می‌شود، اما باکتری سالمونلا قادر است در شرایط خشک برای مدت طولانی زنده مانده و در صورت مصرف محصول خام یا فرآوری‌نشده، موجب بروز بیماری سالمونلوز شود. لذا کنترل یکپارچه در سراسر زنجیره تولید، از مزرعه تا فرآوری، همراه با به‌کارگیری روش‌های نوین ضدعفونی، برای کاهش مؤثر خطر سالمونلا در محصولات خشکی مانند پسته ضروری است.

واژه‌های کلیدی: سالمونلا، پسته، ایمنی مواد غذایی، آلودگی میکروبی، محصول خشک، راهبردهای کنترلی.

۱ بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان - سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی -

کرمان - ایران

* نویسنده مسئول: mahdokht_arjomand@yahoo.com

مقدمه

دلیل داشتن رطوبت پایین، به اشتباه به عنوان محصولاتی کم خطر تلقی می‌شوند (Gurtler *et al.*, 2020). لذا بایستی توجه داشت که مصرف محصولات خشک نیمه‌فرآوری‌شده یا خام، به ویژه زمانی که فرآیندهای کنترل میکروبی در زنجیره تولید به‌طور کامل رعایت نشده باشد، می‌تواند منجر به ابتلا به سالمونلوز شود (Onarinde, 2021.; Enache, *et al.*, 2017). پسته به عنوان یکی از محصولات اقتصادی مهم در کشورهایمانند ایران، آمریکا و ترکیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این محصول نه تنها ارزش اقتصادی بالا دارد بلکه سهم قابل توجهی در صادرات خشکبار و بازارهای بین‌المللی ایفا می‌کند. مصرف داخلی و صادرات جهانی پسته باعث شده است که هرگونه آلودگی میکروبی، به ویژه آلودگی با سالمونلا، پیامدهای بهداشتی و اقتصادی گسترده‌ای ایجاد کند (Harris *et al.*, 2025). عوامل متعددی می‌توانند منجر به ورود سالمونلا به محصول پسته شود. خاک و کود آلوده، استفاده از آب نامناسب برای آبیاری، حضور حیوانات و پرندگان در باغات، تجهیزات برداشت و فرآوری آلوده، از مهم‌ترین منابع آلودگی هستند، همچنین شرایط نامطلوب خشک‌کردن و ذخیره‌سازی نیز می‌تواند بقای سالمونلا را در پسته افزایش

ایمنی مواد غذایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهداشت عمومی در سطح جهان است و ارتباط مستقیم با سلامت مصرف‌کنندگان و اقتصاد ملی دارد (Beuchat *et al.*, 2010). با جهانی‌شدن تجارت مواد غذایی و افزایش حجم مبادلات بین‌المللی، انتقال عوامل بیماری‌زا از جمله باکتری‌ها و ویروس‌ها میان کشورها تسهیل یافته و خطر شیوع بیماری‌های منتقله از غذا افزایش یافته است (Podolak *et al.*, 2017). در این خصوص سالمونلا به عنوان یکی از شایع‌ترین پاتوژن‌های غذایی مورد توجه جهانی قرار گرفته است. طبق گزارش مرکز کنترل و پیشگیری از بیماری‌های آمریکا این باکتری می‌تواند موجب طیف وسیعی از بیماری‌ها از جمله اسهال، تب، درد شکمی و در موارد شدید، عفونت‌های سیستمیک شود و هر ساله میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار دهد (CDC1, 2020).

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که باکتری سالمونلا می‌تواند در شرایط کم آب برای مدت طولانی زنده بماند و حتی در طول ذخیره‌سازی طولانی‌مدت در دماهای متغیر، توانایی ایجاد آلودگی بالقوه را حفظ کند (Zhang *et al.*, 2021.; Enache *et al.*, 2017). به همین علت محصولات خشک، از جمله آجیل‌ها و به ویژه پسته، به

راهکارهای کنترلی در طول زنجیره تولید پسته مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱- ویژگی‌های زیستی سالمونلا در پسته و آجیل‌ها
درک ویژگی‌های زیستی سالمونلا برای طراحی راهکارهای کنترلی ضروری است. سالمونلا یک باکتری گرم-منفی و میله‌ای شکل از خانواده *Enterobacteriaceae* است که توانایی بقای طولانی در محیط خشک و فعالیت آبی پایین را دارد (Beuchat et al., 2017; Zhang et al., 2012). مقاومت نسبی در برابر تنش‌های حرارتی و شیمیایی و قابلیت تشکیل بیوفیلم، بقای سالمونلا را در زنجیره تولید و فرآوری آجیل افزایش می‌دهد (Farakos et al., 2013; Gurtler et al., 2020).
سویه‌های *Salmonella Senftenberg* و *Montevideo* بیشترین مقاومت را در شرایط کم آب دارند و می‌توانند ماه‌ها در محصولات خشک باقی بمانند (Zhang et al., 2018).

۲- منابع آلودگی و مسیرهای انتقال

آلودگی پسته به سالمونلا می‌تواند از منابع مختلفی در طول زنجیره تولید نشأت بگیرد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

۱-۲- خاک و کود آلوده

دهد (Danyluk et al., 2006; Kim et al., 2021.; Ross et al., 1994).

پژوهش‌های میدانی نشان داده‌اند که تماس پسته با تجهیزات آلوده و یا تأخیر در خشک‌کردن بیش از چند ساعت می‌تواند سطح آلودگی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با توجه به اهمیت اقتصادی و بهداشتی پسته و دیگر محصولات خشک، بسیاری از پژوهش‌ها در سال‌های اخیر (۲۰۱۰-۲۰۲۵) بر ارزیابی ریسک آلودگی سالمونلا و ارائه راهکارهای کنترلی متمرکز شده‌اند (Henson et al., 2010; Onarinde et al., 2021).

فن‌آوری‌های کاهش بار میکروبی، استانداردهای بهداشتی پیش از برداشت (GAP1)، و سیستم‌های مدیریت ایمنی غذا مانند HACCP2 و GMP ۳، از مهم‌ترین رویکردهایی هستند که در سطح بین‌المللی برای کاهش ریسک انتقال سالمونلا در زنجیره تولید و فرآوری آجیل‌ها توصیه می‌شوند (Onarinde et al., 2021).

هدف این مقاله مروری، ارائه تحلیل جامع از منابع و مسیرهای انتقال سالمونلا در محصولات کشاورزی به ویژه پسته، بررسی مطالعات پژوهشی اخیر، و ارائه راهبردهای کنترل مؤثر در صنایع غذایی است. در این راستا، پس از مرور ویژگی‌های زیستی سالمونلا و منابع آلودگی،

۴-۲- تجهیزات آلوده

در برداشت پسته، تجهیزات کشاورزی نقش بسیار مهمی در آلودگی یا پیشگیری از انتقال سالمونلا دارند. تماس پسته با تجهیزات آلوده در حین برداشت و فرآوری می تواند سبب انتقال سالمونلا شود (Montville *et al.*, 2019).

۳- فرآوری و برداشت

یکی از نکات کلیدی، تأثیر شرایط فرآوری و نگهداری بر بقای سالمونلا است. فرآیندهای خشک کردن سریع، حرارت‌دهی کنترل شده و ذخیره‌سازی در دما و رطوبت مناسب، موجب کاهش قابل توجه بقای باکتری می‌شود (Saunders 2017; Ross *et al.*, 1994).

۱-۳- خشک کردن سریع

خشک کردن سریع ۱ باعث کاهش فعالیت آبی ۲ ماده غذایی می‌شود که یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد میکروارگانیسم‌هاست. سالمونلا برای رشد به فعالیت آبی نسبتاً بالا نیاز دارد؛ بنابراین کاهش سریع آن سبب توقف رشد سالمونلا و کاهش جمعیت باکتری خواهد شد. اما در برخی شرایط، سالمونلا ممکن است در حالت غیررشدکننده ولی زنده باقی بماند و نسبت به تنش‌های بعدی (مانند حرارت) مقاوم‌تر شود (Beuchat & Man, 2011).

استفاده از کود حیوانی فرآوری نشده یا خاک آلوده می‌تواند منبع اولیه سالمونلا باشد، انتقال آلودگی می‌تواند از طریق تماس مستقیم خاک و کود آلوده با پسته یا از طریق گرد و غبار آلوده صورت پذیرد. همچنین چنانچه خاک به باکتری آلوده باشد در اثر بارش باران و آبیاری، باکتری می‌تواند تا ارتفاع ۸۰ سانتی متر به اطراف پاشیده شده و سطح گیاه را آلوده کند (Danyluk *et al.*, 2007).

۲-۲- آب آبیاری

آب‌های سطحی یا چاه‌های آلوده که با فضولات حیوانی تماس داشته‌اند، می‌توانند منبع آلودگی سالمونلا باشند و از طریق تماس مستقیم با پسته سبب ورود سالمونلا به پسته شوند (Liu *et al.*, 2020).

۳-۲- حیوانات و پرندگان

حضور حیوانات وحشی، پرندگان و جوندگان در باغات می‌تواند سالمونلا را منتقل کند، این باکتری به طور طبیعی در روده حیواناتی مانند خزندگان (مار، مارمولک، لاک پشت)، دوزیستان (قورباغه)، پرندگان (مرغ، بوقلمون، غاز، اردک، طوطی و...)، چهارپایان اهلی (گاو، گوسفند و...)، اسب، گربه و سگ اغلب بدون بروز علائم بیماری وجود دارد، مدفوع این حیوانات می‌تواند آب، خاک و همچنین مستقیماً پسته را آلوده سازند (Carasco *et al.*, 2011).

۳-۲- حرارت دهی

حرارت دهی ۱ یکی از مؤثرترین روش‌ها برای غیرفعال‌سازی سالمونلا است. طبق یافته‌های تحقیقی بدست آمده، افزایش دما و زمان حرارت دهی منجر به کاهش لگاریتمی قابل توجه سالمونلا می‌شود؛ با این حال، اگر سالمونلا پیش‌تر در معرض تنش‌هایی مانند خشک‌کردن قرار گرفته باشد، ممکن است تحمل حرارتی آن افزایش یابد و برای دستیابی به همان سطح کاهش، شرایط شدیدتری لازم باشد (Owusu-Apenten, *et al.*, 2022.; Saunders, *et al.*, 2017).

۳-۳- ذخیره‌سازی طولانی مدت

ذخیره‌سازی طولانی مدت ۲، به‌ویژه در شرایط خشک معمولاً باعث کاهش تدریجی جمعیت سالمونلا در طول زمان می‌شود؛ اما حذف کامل پاتوژن را تضمین نمی‌کند؛ سالمونلا می‌تواند برای مدت طولانی در مواد غذایی کم رطوبت زنده بماند، هرچند قادر به رشد نیست (Zhang *et al.*, 2017).

جمع‌بندی اثرات نشان می‌دهد، ترکیب خشک‌کردن سریع، حرارت دهی مناسب و ذخیره‌سازی کنترل شده می‌تواند به‌طور مؤثری بقای سالمونلا را کاهش دهد؛ با این حال، اتکای صرف به ذخیره‌سازی یا کاهش

رطوبت بدون اعمال حرارت کافی، ریسک باقی‌ماندن سالمونلا را حفظ می‌کند؛ بنابراین، این عوامل باید به‌صورت یکپارچه در مدیریت ایمنی غذایی به‌کار گرفته شوند، نه به‌عنوان اقدامات مستقل. تحقیقات نشان می‌دهد که اگرچه این فرآیندها رشد سالمونلا را محدود می‌کنند، اما تنها حرارت دهی مؤثر است که حذف قابل اطمینان این پاتوژن را تضمین می‌کند.

مدل‌های کمی ارزیابی ریسک میکروبی (QMRA)^۳، در واقع ابزارهایی ریاضی-آماري هستند و برای برآورد احتمال بروز بیماری در انسان در اثر مواجهه با عوامل بیماری‌زای میکروبی مانند سالمونلا به‌کار می‌روند و کل مسیر «از مزرعه تا مصرف»؛ یعنی میزان آلودگی اولیه، تغییرات جمعیت میکروبی در مراحل فرآوری، نگهداری و توزیع، الگوی مصرف، و در نهایت رابطه دوز-پاسخ بین مقدار عامل بیماری‌زا و احتمال ابتلا به بیماری را در نظر می‌گیرند، نشان می‌دهند کاهش $\log_4 \leq$ سالمونلا در زنجیره تولید، ریسک ابتلا به سالمونلوز انسانی را به حداقل می‌رساند، این کاهش معادل 10^4 برابر کمتر شدن تعداد باکتری است. این سطح از کاهش، باعث می‌شود دوز سالمونلایی که مصرف‌کننده دریافت می‌کند معمولاً پایین‌تر از آستانه‌ای باشد که بتواند موجب بروز بیماری

3 Quantitative Microbial Risk Assessment

1 Heat treatment

2 Long-term storage

شوند. از پیامدهای غیرمستقیم بهداشتی و اجتماعی آن می‌توان کاهش اعتماد عمومی مصرف‌کنندگان به ایمنی پسته و فرآورده‌های آن، افزایش احتمال آلودگی متقاطع در محیط‌های خانگی و صنعتی و تهدید امنیت غذایی و سلامت عمومی را نام برد (CDC2, 2021.; CPS3, 2019).

آلودگی سالمونلا در پسته یک تهدید جدی بهداشتی محسوب می‌شود که می‌تواند سلامت مصرف‌کنندگان و اعتبار نظام غذایی کشور را تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس گزارش‌های رسمی سازمان‌های بین‌المللی ایمنی غذا و بهداشت عمومی مانند CDC، FDA و آژانس بهداشت کانادا، پسته و فرآورده‌های آن در سال‌های اخیر در چندین شیوع سالمونلا نقش داشته‌اند که منجر به بیماری انسانی، بستری و جمع‌آوری گسترده محصولات از بازار شده است (جدول ۱). این آمارها بیانگر حساسیت بالای بازارهای هدف نسبت به سالمونلا در پسته است (شکل ۱).

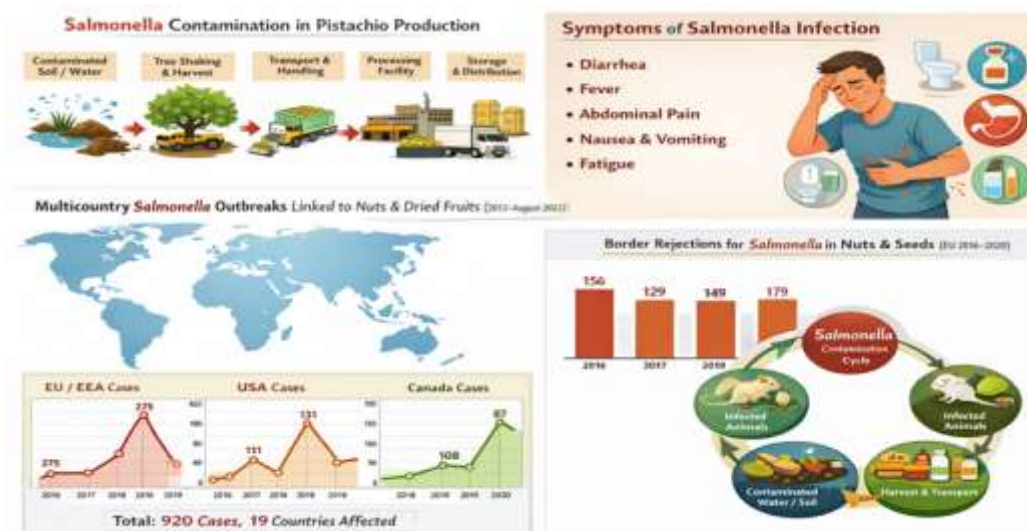
شود. در نتیجه، احتمال ابتلا به سالمونلوز انسانی به حداقل قابل قبول از نظر بهداشت عمومی می‌رسد (Farakos et al., 2019). به همین دلیل، کاهش $\log \leq 4$ سالمونلا اغلب به‌عنوان یک "هدف کنترلی یا معیار ایمنی" ۱ در برنامه‌های مدیریت ریسک و سیستم‌های ایمنی غذا مانند HACCP پیشنهاد می‌شود.

۴- پیامدهای بهداشتی

مصرف پسته آلوده می‌تواند منجر به بروز سالمونلوزیس شود که علائم آن شامل: اسهال (گاهی خونی)، تب و لرز، درد و گرفتگی شکم، تهوع و استفراغ است. دوره نهفتگی بیماری معمولاً ۶ تا ۷۲ ساعت بوده و طول دوره بیماری بین ۴ تا ۷ روز است. در برخی گروه‌های حساس، آلودگی سالمونلا می‌تواند پیامدهای شدیدتری ایجاد کند. عوارض احتمالی شامل کم‌آبی شدید، سپتی‌سمی، بستری شدن و در موارد نادر مرگ است. برخی بیماران ممکن است پس از بهبودی دچار عوارض طولانی‌مدت مانند آرتریت واکنشی یا اختلالات گوارشی پایدار

جدول ۱- نمونه آمار رسمی شیوع سالمونلا مرتبط با پسته در کشورهای واردکننده.

کشور گزارش‌دهنده	سال	تعداد موارد بیماری	موارد بستری	اقدام کنترلی
ایالات متحده	2024-2025	چندین مورد تأیید شده	گزارش شده	جمع‌آوری و برگشت محصول از بازار
کانادا	2025	بیش از ۱۰۰ مورد گزارش شده	ده‌ها مورد	ممنوعیت فروش و هشدار عمومی
اتحادیه اروپا	سال‌های مختلف	موارد پراکنده	محدود	افزایش کنترل واردات



شکل ۱- نمای شماتیک مسیرهای آلودگی سالمونلا در زنجیره تولید پسته، علائم انسانی مرتبط، شیوع‌های چند کشوری و رد محموله‌های آلوده در بازارهای بین‌المللی (CDC, 2025.; FDA, 2025.; EFSA, 2020.; and WHO, 2018.; Podolak *et al.*, 2010).

۵- پیامدهای اقتصادی

فرآوری مجدد و از دست رفتن ارزش تجاری محموله است. در بسیاری موارد، محموله برگشتی قابل فروش در هیچ بازار معتبری نیست. بطوریکه پسته آلوده اغلب مجبور به امحای کامل یا فروش با قیمت بسیار پایین در بازارهای درجه چندم و کاهش شدید حاشیه سود تولیدکننده و صادرکننده می‌شود (U.S. FDA, 2023). برآورد خسارات مستقیم ناشی از آلودگی سالمونلا در یک محموله صادراتی پسته در جدول ۲ آورده شده است (Scharff, 2012).

آلودگی سالمونلا در پسته علاوه بر تهدید جدی سلامت عمومی، پیامدهای اقتصادی بسیار سنگین و چندلایه برای باغدار، کارخانه، صادرکننده و اقتصاد ملی دارد. سالمونلا یکی از مهم‌ترین دلایل ریجکت پسته در بازارهای حساس به‌ویژه اتحادیه اروپا و آمریکا است (European Food Safety Authority, 2020). پیامدهای مالی برگشت محموله شامل هزینه حمل‌ونقل رفت و برگشت، هزینه آزمایش‌های مجدد، هزینه انهدام یا

جدول ۲- برآورد خسارات مستقیم ناشی از آلودگی سالمونلا در یک محموله صادراتی پسته.

نوع خسارت	شرح	پیامد اقتصادی
ریجکت محموله	عدم پذیرش در کشور مقصد	از دست رفتن کل یا بخش عمده ارزش کالا
هزینه حمل‌ونقل برگشتی	بازگشت یا امحای	افزایش هزینه لجستیک
آزمایش‌های مجدد	آزمون‌های میکروبی تکمیلی	افزایش هزینه کنترل کیفیت
امحای یا فرآوری مجدد	غیرقابل مصرف انسانی	افت شدید قیمت فروش

می‌باشد. قابل توجه است که در موارد تکرار آلودگی، حذف باغ‌دار از زنجیره تأمین صادراتی صورت می‌گیرد (Todd, 2010, Henson & Humphrey, 2012). از دیگر پیامدهای اقتصادی از دست رفتن بازارهای بین‌المللی با کاهش سهم بازار ایران در برابر رقبا (آمریکا، ترکیه)، سخت‌گیرانه‌تر شدن کنترل‌ها بر پسته ایرانی، افزایش دفعات نمونه‌برداری در مبادی ورودی کشور مقصد، آسیب به برند "پسته ایران"، کاهش اعتماد خریداران خارجی، افت قدرت چانه‌زنی در قراردادهای فروش اجباری با قیمت پایین‌تر نسبت به رقبا است. پیامدهای اقتصادی غیرمستقیم آلودگی سالمونلا در پسته در جدول ۳ آورده شده است (Golan, et al., 2004).

افزایش هزینه‌های تولید و فرآوری که شامل هزینه‌ی کنترل و پایش و هزینه‌ی اصلاح خطوط تولید می‌باشد، از دیگر پیامدهای اقتصادی است. بطوریکه پس از شناسایی آلودگی، با افزایش تعداد آزمون‌های میکروبی در آزمایشگاه‌های معتبر داخلی و خارجی و پایش مداوم خطوط فرآوری و همچنین جهت اصلاح خطوط تولید، هزینه‌های ضدعفونی عمیق تجهیزات، توقف خط تولید، آموزش مجدد نیروی انسانی و اصلاح زیرساخت‌ها (کف، زهکشی، تجهیزات) هزینه هنگفتی تحمیل می‌شود، پیامدهای اقتصادی برای باغداران شامل کاهش تقاضا برای پسته خام از باغ‌های مشکوک، افت قیمت خرید تضمینی یا توافقی، الزام به سرمایه‌گذاری اضافی در تجهیزات برداشت، بهداشت مزرعه، حمل‌ونقل استاندارد

جدول ۳ - پیامدهای اقتصادی غیرمستقیم آلودگی سالمونلا در پسته.

پیامد	حوزه اثر
کاهش اعتماد واردکنندگان و سخت‌گیری مقررات	بازار صادرات
تضعیف جایگاه پسته ایران در بازار جهانی	برند ملی
کاهش قیمت خرید و حذف از زنجیره صادرات	باغداران
توقف خط تولید و افزایش هزینه‌های بهداشتی	صنعت فرآوری
کاهش ارزآوری محصولات غیرنفتی	اقتصاد ملی

بلندمدت را نام برد، پسته یکی از مهم‌ترین اقلام ارزآور غیرنفتی است، ریجکت یا کاهش صادرات آن سبب کاهش ارزآوری کشور شده و پیامدهای اقتصادی ملی به همراه

از هزینه‌های حقوقی و بیمه‌ای آن می‌توان دعاوی حقوقی خریداران خارجی، جریمه‌های قراردادی، افزایش حق بیمه محموله‌ها، لغو یا عدم تمدید قراردادهای

پیامد اقتصادی سالمونلا شدت بسیار بالاتری دارد (Beuchat *et al.*, 2015; Henson, *et al.*, 2010).

خواهد داشت. مقایسه پیامد اقتصادی سالمونلا با سایر مخاطرات پسته از جمله آفلاتوکسین نشان می‌دهد که

جدول ۴- مقایسه اقتصادی سالمونلا با سایر مخاطرات پسته.

مخاطره	نوع خسارت	قابلیت اصلاح	شدت اقتصادی
سالمونلا	فوری و حاد	بسیار محدود	بسیار بالا
آفلاتوکسین	مزمین	محدود	بالا
آلودگی فیزیکی	موضعی	قابل اصلاح	متوسط

۶- راهکارهای کنترل و پیشگیری

آلودگی سالمونلا در پسته و دیگر محصولات خشک، یک چالش چندبعدی است که نیازمند اجرای رویکردهای جامع و چندمرحله‌ای در تمام مراحل زنجیره تولید، فرآوری و توزیع است. شواهد علمی نشان می‌دهد که ترکیب اقدامات پیشگیرانه قبل و بعد از برداشت، همراه با فناوری‌های کاهش بار میکروبی و مدیریت بهداشت محیط، می‌تواند به طور مؤثری خطر انتقال سالمونلا را کاهش دهد (Beuchat & Man, 2010).

۷- اصول بهداشت کشاورزی (GAP)

۷-۱- کنترل پیش از برداشت

- مدیریت کود و خاک: استفاده از کودهای آلی فرآوری شده و جلوگیری از استفاده کودهای

شیوع‌های بین‌المللی ناشی از آجیل و پسته، چندین میلیون دلار خسارت به همراه داشته‌اند (Beuchat *et al.*, 2010; Henson *et al.*, 2012). با تحلیل هزینه-فایده پیشگیری پی می‌بریم که هزینه پیشگیری (بهداشت برداشت، آموزش، پایش) بسیار کمتر از هزینه یک محموله برگشتی است و پیشگیری مؤثر سبب حفظ بازار صادراتی، ثبات قیمت و افزایش سود پایدار می‌شود (Scharff *et al.*, 2012; Unnevehr *et al.*, 1999).

جمع‌بندی پیامدهای اقتصادی نشان می‌دهد آلودگی سالمونلا در پسته منجر به خسارت مستقیم و غیرمستقیم گسترده، تهدید جدی برای صادرات و برند ملی، عامل بی‌ثباتی درآمد باغداران است که با مدیریت و برنامه‌ای دقیق قابل پیشگیری می‌باشد ولی در صورت وقوع بسیار پرهزینه است.

ضدعفونی‌کننده‌های مناسب (Padolak *et al.*, 2010).

- مدیریت دما و رطوبت در ذخیره‌سازی: ذخیره‌سازی در شرایط خشک و خنک، به همراه کنترل دما و رطوبت، کاهش رشد و بقای سالمونلا را تضمین می‌کند (Ross *et al.*, 1994).
- کنترل بسته‌بندی: استفاده از بسته‌بندی مقاوم در برابر نفوذ رطوبت و میکروارگانیسم‌ها و کاهش احتمال آلودگی ثانویه.

۷-۳- اجرای سیستم‌های مدیریت ایمنی غذا (HACCP و GMP)

- شناسایی نقاط بحرانی آلودگی (CCP1) در زنجیره تولید پسته و طراحی برنامه‌های کنترل مؤثر.
- نظارت مستمر و مستندسازی اقدامات پیشگیرانه، از مرحله برداشت تا بسته‌بندی و حمل و نقل.
- آموزش کارکنان در مورد شیوه‌های پیشگیری، تشخیص علائم آلودگی و واکنش سریع در مواجهه با خطرات احتمالی

حیوانی خام، احتمال ورود سالمونلا به باغات را کاهش می‌دهد (Brar & Danyluk, 2018).

- مدیریت آب آبیاری: استفاده از آب سالم و پایش کیفیت آب، جلوگیری از آلودگی از منابع سطحی یا چاه‌های آلوده به فضولات حیوانی (Brar & Danyluk, 2018).
- کنترل حیوانات و پرندگان: نصب حفاظها، شبکه‌های محافظ و اقدامات مدیریتی برای کاهش حضور حیوانات و پرندگان در باغها (Brar & Danyluk, 2018).
- بهداشت کارکنان و تجهیزات: آموزش کشاورزان در مورد رعایت بهداشت فردی و ضدعفونی ابزار و وسایل مورد استفاده در برداشت.

۷-۲- اقدامات پس از برداشت

- خشک‌کردن سریع و بهینه: خشک‌کردن سریع پسته به رطوبت مطلوب ($\geq 6\%$) برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها و کاهش بقای سالمونلا (Padolak *et al.*, 2010).
- پاکسازی و ضدعفونی تجهیزات: تمیزکاری منظم دستگاه‌های برداشت، جداکننده‌ها و خطوط بسته‌بندی، با استفاده از

۴-۷- فناوری‌های کاهش بار میکروبی

- حرارت‌دهی کنترل‌شده: استفاده از حرارت برای کاهش بار میکروبی سالمونلا بدون آسیب به کیفیت محصول.
- پرتودهی: تکنولوژی پرتو یونیزان برای کاهش باکتری‌ها در محصولات خشک و افزایش ماندگاری (Hartanto, 2022).
- ضدعفونی شیمیایی: استفاده از محلول‌های مناسب برای شستشو و ضدعفونی آجیل‌ها و تجهیزات، با رعایت استانداردهای بهداشتی (Danyluk *et al.*, 2006).

۵-۷- مدیریت زنجیره تأمین و پایش مستمر

- پایش کیفیت در طول زنجیره: انجام نمونه‌برداری تصادفی از محصولات در مراحل مختلف (برداشت، فرآوری، ذخیره‌سازی و حمل و نقل) برای شناسایی زود هنگام آلودگی و جلوگیری از گسترش آن.
- ردیابی محصول: با ایجاد سیستم‌های ردیابی جهت شناسایی سریع منابع آلودگی و جلوگیری از گسترش آن در بازار، ردیابی محصول انجام

می‌گیرد. در محدوده برنامه سیستم ایمنی غذا (FSS1)، قابلیت ردیابی به عنوان ابزاری برای کنترل خطرات احتمالی ناشی از غذا، ارائه اطلاعات قابل اعتماد درباره محصول و تضمین اصالت محصول پیاده سازی می‌شود.

- کنترل‌های صادراتی: رعایت استانداردهای بین‌المللی و مقررات کشور مقصد برای کاهش خطرات بهداشتی و حفظ اعتماد مشتریان خارجی.

۶-۷- آموزش و ارتقای آگاهی

- آموزش کشاورزان، کارگران و مدیران صنایع غذایی در مورد خطرات سالمونلا، اهمیت بهداشت و روش‌های کاهش آلودگی.
- ایجاد پروتکل‌های داخلی برای شناسایی سریع خطرات و اجرای اقدامات اصلاحی.

در جمع‌بندی راهکارهای ذکر شده می‌توان گفت که اجرای این راهکارهای ترکیبی و چندمرحله‌ای، از مزرعه تا مصرف‌کننده، نه تنها خطر آلودگی سالمونلا در پسته و آجیل‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه موجب ارتقای ایمنی غذا، افزایش اعتماد مصرف‌کننده و حفظ بازارهای صادراتی

توجه بقای باکتری شد (Kimber, 2021; Podolak, et al., 2010.; Ross et al., 1994). در ضمن اینکه تفاوت مقاومت سویه‌ها، به ویژه *S. Senftenberg* و *S. Montevideo*، نشان می‌دهد که برخی سویه‌ها در برابر شرایط خشک و حرارت نسبتاً مقاوم هستند و نیازمند روش‌های کنترل چندمرحله‌ای هستند (Estrada et al., 2024.; Fong, 2015; Martinez, 2023).

چالش بهداشتی ایجاد شده در این زمینه، مشکلات گسترده‌ای خصوصاً در بازارهای جهانی ایجاد کرده و تهدیدی جدی برای صادرات و برند ملی است، همچنین عامل بی‌ثباتی درآمد باغداران می‌باشد که با کنترل و ردیابی مسیر تولید تا مصرف قابل پیشگیری است، در حالی که وقوع آلودگی محصول، بسیار پرهزینه و یا حتی با از دست رفتن اعتبار برند ملی، غیر قابل جبران است. مطالعات اخیر همچنین نشان داده‌اند که راه‌های انتقال سالمونلا در زنجیره تولید پسته از باغ تا فرآوری و انبارداری، پیچیده و چندگانه است (Danyluk et al., 2007). این پیچیدگی نشان می‌دهد که کنترل موفق نیازمند رویکرد جامع و چندلایه است که شامل پیشگیری در مزرعه، فرآوری ایمن و نظارت مستمر بر شرایط ذخیره‌سازی باشد. یکی از نکات مهم دیگر، چالش‌های پژوهشی و خلأهای علمی است. بسیاری از مطالعات تمرکز خود را بر روش‌های کاهش بار میکروبی پس از برداشت

می‌شود. این رویکرد جامع شامل پیشگیری، پایش، فناوری‌های کاهش بار میکروبی و آموزش مداوم است که با تکیه بر شواهد علمی، بهترین روش کاهش ریسک آلودگی سالمونلا در صنایع غذایی محسوب می‌شود.

بحث

آلودگی پسته به سالمونلا یک نگرانی مهم در ایمنی مواد غذایی است که نیازمند رویکردی یکپارچه از مزرعه تا مصرف‌کننده می‌باشد. ترکیبی از روش‌های پیش‌گیری، نظارت و مداخله برای تضمین ایمنی این محصول ضروری است. بقای طولانی مدت سالمونلا در محصولات خشک از جمله پسته برای ماه‌ها تا سال‌ها، سبب می‌شود حتی با ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، این محصولات منبع بالقوه انتقال بیماری باشند. این ویژگی چالشی مهم در کنترل ایمنی پسته و آجیل‌ها ایجاد می‌کند (Gurtler et al., 2020). تحلیل داده‌های میدانی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میزان آلودگی در محصولات فرآوری‌نشده یا نیمه‌فرآوری‌شده بالاتر است و نرخ شیوع بین دو تا پنج درصد گزارش شده است (Harris et al., 2017). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های بین‌المللی همسو است، در ضمن اینکه لازم به ذکر است که حتی سطح کم آلودگی می‌تواند در صورت مصرف گسترده، منجر به بروز موارد بیماری انسانی شود (Beuchat et al., 2013). با کنترل و بهینه‌سازی شرایط فرآوری می‌توان موجب کاهش قابل

گذاشته‌اند، در حالی که بررسی اثرات متفاوت روش‌های خشک‌کردن، زمان ذخیره‌سازی، بسته‌بندی و تعامل با سایر میکروارگانیسم‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، تاثیر ترکیبی عوامل محیطی و سویه‌های مختلف سالمونلا بر بقای آن هنوز نیازمند تحقیقات جامع‌تر است.

مطالعات اخیر همچنین نشان داده‌اند که راه‌های انتقال سالمونلا در زنجیره تولید پسته از مزرعه تا برداشت و فرآوری پیچیده و چندگانه بوده و به عنوان منابع بالقوه آلودگی مطرح هستند (kimber, 2011; Beuchat *et al.*, 2015). این پیچیدگی نشان می‌دهد که کنترل موفق نیازمند رویکرد جامع و چندلایه است که شامل پیشگیری در مزرعه، فرآوری ایمن و نظارت مستمر بر شرایط ذخیره‌سازی باشد. یکی از نکات مهم دیگر، چالش‌های پژوهشی و خلأهای علمی است. بسیاری از مطالعات تمرکز خود را بر روش‌های کاهش بار میکروبی پس از برداشت گذاشته‌اند، در حالی که بررسی اثرات متفاوت روش‌های خشک‌کردن، زمان ذخیره‌سازی، بسته‌بندی و تعامل با سایر میکروارگانیسم‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، تاثیر ترکیبی عوامل محیطی و سویه‌های مختلف سالمونلا بر بقای آن هنوز نیازمند تحقیقات جامع‌تر است.

به طور خلاصه، بخش گسترده بحث نشان می‌دهد که سالمونلا در پسته و آجیل‌های خشک یک تهدید واقعی و چندبعدی است که نیازمند رویکرد جامع، چندلایه و مبتنی بر شواهد پژوهشی برای کنترل و پیشگیری است. تحقیقات آینده باید به بررسی مقاومت سویه‌ها، بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن، تعامل با سایر میکروارگانیسم‌ها و توسعه فن‌آوری‌های نوین کاهش بار میکروبی تمرکز داشته باشند.

نتیجه‌گیری

با توجه به قدرت بقاء بالای سالمونلا در پسته و آجیل‌های خشک و پیامدهای بهداشتی و اقتصادی ناشی از آن، لازم است اقدامات موثری جهت کاهش خطر آلودگی سالمونلا انجام شود در این راستا بهترین رویکرد پیاده‌سازی کنترل چندمرحله‌ای شامل بهداشت پیش از برداشت (GAP)، مدیریت آب و کود، کنترل حضور حیوانات و پرندگان و نظارت بر فرآوری و ذخیره‌سازی است (Igo & Schaffner, 2021).

ترکیب این اقدامات با فن‌آوری‌های کاهش بار میکروبی، مانند حرارت‌دهی کنترل‌شده، پرتودهی و ضدعفونی شیمیایی، می‌تواند بقای باکتری را در زنجیره تولید به حداقل برساند. همچنین، اهمیت پایش مستمر و آموزش کارکنان صنایع غذایی نباید نادیده گرفته شود. آگاهی از خطرات بالقوه، رعایت اصول ایمنی و اجرای

کاهش بار و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن و ذخیره‌سازی بپردازد، همچنین باید بر توسعه فن‌آوری‌های موثر و مقرون به صرفه برای کاهش آلودگی سالمونلا در پسته متمرکز شوند (Beuchat & Mann, 2011).

اقدامات پیشگیرانه، نه تنها سلامت مصرف‌کننده را تضمین می‌کند بلکه از پیامدهای اقتصادی ناشی از فراخوان محصولات و محدودیت‌های صادراتی جلوگیری می‌کند. به منظور کنترل بیشتر این عارضه، تحقیقات آینده باید به بررسی مقاومت سویه‌ها، روش‌های نوین

منابع

5. Beuchat, L. R., Mann, D. A., & Alali, W. Q. (2012). Evaluation of sanitizers for inactivating Salmonella on in-shell pecans and pecan nutmeats. *Journal of food protection*, 75(11), 1930-1938.
6. Beuchat, L. R., & Mann, D. A. (2015). Survival of Salmonella on dried tree nuts and nut products. *Journal of Food Protection*, 78(3), 495-503.
7. Brar, P. K., & Danyluk, M. D. (2018). Nuts and grains: microbiology and preharvest contamination risks. *Preharvest Food Safety*, 105-121.
8. Carrasco, E., Morales-Rueda, A., & García-Gimeno, R. M. (2012). Cross-contamination and recontamination by Salmonella in foods: A review. *Food Research International*, 45(2), 545-556.
9. Casulli, K. E., Calhoun, S., & Schaffner, D. W. (2019). Modeling the risk of salmonellosis from consumption of peanuts in the United States. *Journal of Food Protection*, 82(4), 579-588.
10. Center for Produce Safety. (2019). Distribution of Salmonella in pistachios [CPS Report]. <https://www.centerforproducesafety.org/research-database/distribution-of->
1. Beuchat, L. R., Komitopoulou, E., Beckers, H., Betts, R. P., Bourdichon, F., Fanning, S., ... & Ter Kuile, B. H. (2013). Low-water activity foods: increased concern as vehicles of foodborne pathogens. *Journal of Food Protection*, 76(1), 150-172.
2. Beuchat, L. R., & Mann, D. A. (2010). Factors affecting infiltration and survival of Salmonella on in-shell pecans and pecan nutmeats. *Journal of Food Protection*, 73(7), 1257-1268.
3. Beuchat, L. R., & Mann, D. A. (2010). Survival and growth of Salmonella in high-moisture pecan nutmeats, in-shell pecans, inedible nut components, and orchard soil. *Journal of Food Protection*, 73(11), 1975-1985.
4. Beuchat, L. R., & Mann, D. A. (2011). Inactivation of Salmonella on pecan nutmeats by hot air treatment and oil roasting. *Journal of Food Protection*, 74(9), 1441-1450.

17. Farakos, S. S., Frank, J. F., & Schaffner, D. W. (2013). Modeling the influence of temperature, water activity and water mobility on the persistence of Salmonella in low-moisture foods. *International Journal of Food Microbiology*, 166(2), 280-293.
18. Farakos, S. M. S., Pouillot, R., Davidson, G. R., Johnson, R., Son, I., Anderson, N., & Van Doren, J. M. (2019). A quantitative risk assessment of human salmonellosis from consumption of walnuts in the United States. *Journal of Food Protection*, 82(1), 45-57.
19. FDA. (2018). Risk assessment of Salmonella in tree nuts. U.S. Food and Drug Administration.
20. Fong, K. (2015). Environmental adaptation and stress response of Salmonella enterica in peanut oil, peanuts and chia seeds (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
21. Golan, E., Roberts, T., Salay, E., Caswell, J., Ollinger, M., & Moore, D. (2004). Food safety innovation in the United States: Evidence from the meat industry. USDA Economic Research Service
22. Gurtler, J. B., Keller, S. E., Fan, X., Olanya, O. M., Jin, T., & Camp, M. J. (2020). Survival of Salmonella during apple dehydration as affected by apple cultivar and antimicrobial pretreatment. *Journal of Food Protection*, 83(5), 902-909.
23. Hartanto, V. (2022). Application of atmospheric cold plasma for inactivation salmonella-in-pistachios-and-development-of-effective-sampling-strategies.
11. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2020). Salmonella and foodborne illness. <https://www.cdc.gov/salmonella/general/index.html>.
12. Danyluk, M. D. (2006). Evaluating risk factors for contamination of almonds with Salmonella and assessing the risk of salmonellosis from consumption of almonds. *University of California, Davis*.
13. Danyluk, M. D., Jones, T. M., Abd, S. J., Schlitt-Dittrich, F., Jacobs, M., & Harris, L. J. (2007). Prevalence and amounts of Salmonella found on raw California almonds. *Journal of Food Protection*, 70(4), 820-827.
14. Enache, E., Podolak, R., Kataoka, A., & Harris, L. J. (2017). Persistence of Salmonella and other bacterial pathogens in low-moisture foods. *Control of Salmonella and other Bacterial Pathogens In Low Moisture Foods*, 67-86.
15. Estrada, E. M., & Harris, L. J. (2024). Phenotypic Characteristics That May Contribute to Persistence of Salmonella Strains in the Pistachio Supply Chain. *Journal of Food Protection*, 87(5), 100268.
16. European Food Safety Authority. (2020). The Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) *annual report*. <https://www.efsa.europa.eu>

- of *Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7, and *Listeria monocytogenes* on almond kernels and inshell pistachios. University of California, Davis.
30. Liu, P., et al. (2020). Persistence of *Salmonella* in low-moisture foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3201–3218.
31. Martinez, E. M. E. (2023). The Genetic and Phenotypic Diversity of *Salmonella* Strains Associated with the US Pistachio Environment (Doctoral dissertation, University of California, Davis).
32. Onarinde, B. A. (2021). Survival of *Salmonella* Enteritidis Phage Type 30 on Brazil Nut Kernels and Pumpkin Seeds Stored at 8, 23, and 37° C. *Journal of Food Protection*, 84(12), 2044-2052.
33. Owusu-Apenten, R., & Vieira, E. (2022). Food Microbes, Quality and Fermentation. In *Elementary Food Science* (pp. 149-170). Cham: Springer International Publishing.
34. Podolak, R., Enache, E., Stone, W., Black, D. G., & Elliott, P. H. (2010). Sources and risk factors for contamination, survival, persistence, and heat resistance of *Salmonella* in low-moisture foods. *Journal of Food Protection*, 73(10), 1919–1936.
35. Podolak, R., Black, D. G., & Wiley, J. (Eds.). (2017). Control of *Salmonella* and other bacterial pathogens in low-moisture foods (pp. xii+-263). Wiley Blackwell.
36. Ross, T., & McMeekin, T. A. (1994). Predictive microbiology. *International Journal of Food Microbiology*, 23(3-4), 241-264.
- of foodborne enteric pathogens on raw and dry roasted pistachio kernels and in pineapple juice (Master's thesis, Iowa State University).
24. Harris, L. J., et al. (2017). Prevalence and control of *Salmonella* in nuts and nut products. *Food Research International*, 100, 1–9.
25. Harris, L. J., Lieberman, V. M., Long, S., & Moyne, A. L. (2025). Prevalence and levels of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* and *Salmonella* in California raw almond kernels from the 2021 harvest compared with data from harvests between 2001–2013. *Journal of Food Protection*, 100629.
26. Henson, S., & Humphrey, J. (2010). Understanding the complexities of private standards in global agri-food chains. *World Development*, 38(11), 1628–1641.
27. Igo, M. J., & Schaffner, D. W. (2021). Models for factors influencing pathogen survival in low water activity foods from literature data are highly significant but show large unexplained variance. *Food Microbiology*, 98, 103783.
28. Kim, J. Y., Song, H., Kim, D., & Lee, S. Y. (2021). Physiological changes and stress responses of heat shock treated *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Food Control*, 124, 107915.
29. Kimber, M. (2011). Changes in total aerobic, coliform, and presumptive *Escherichia coli* counts on pistachios during postharvest handling and survival

- <https://www.fda.gov/food/outbreaks-foodborne-illness>
43. World Health Organization (WHO). (2018). Salmonella (Non-typhoidal). [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-\(non-typhoidal\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal))
44. Zhang, G., Hu, L., Melka, D., Wang, H., Lasri, A., Brown, E. W., ... & Hammack, T. S. (2017). Prevalence of Salmonella in cashews, hazelnuts, macadamia nuts, pecans, pine nuts, and walnuts in the United States. *Journal of Food Protection*, 80(3), 459-466.
45. Zhang, L., Kou, X., Zhang, S., Cheng, T., & Wang, S. (2018). Effect of water activity and heating rate on Staphylococcus aureus heat resistance in walnut shells. *International Journal of Food Microbiology*, 266, 282-288.
46. Zhang, G., Hu, L., Luo, Y., Santillana Farakos, S. M., Johnson, R., Scott, V. N., & Hammack, T. S. (2021). Survey of Salmonella in raw tree nuts at retail in the United States. *Journal of Food Science*, 86(2), 495-504.
37. Saunders, T. P. (2017). Inactivation of Salmonella and surrogate bacteria on cashews and macadamia nuts exposed to saturated steam and propylene oxide treatments (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
38. Scharff, R. L. (2012). Economic burden from health losses due to foodborne illness in the United States. *Journal of Food Protection*, 75(1), 123-131..
39. Todd, E. C. D. (2017). Foodborne disease in developed countries: Emerging issues and economic costs. *Food Control*, 73, 539-546.
40. Unnevehr, L. J., & Jensen, H. H. (1999). The economic implications of using HACCP as a food safety regulatory standard. *Food Policy*, 24(6), 625-635.
41. U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2023). Food recalls: *Economic and public health impacts*. <https://www.fda.gov/food>.
42. U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2025). Outbreak investigation of Salmonella: Pistachio and pistachio products.

A comprehensive review of Salmonella contamination in agricultural products with emphasis on pistachios: influencing factors, transmission routes, and control strategies in the food industry

Mahdokht Arjmand Kermani*¹

Abstract

Salmonella spp. is one of the most important foodborne pathogens that has attracted special attention in recent years due to its role in contaminating agricultural and plant products. Contrary to popular belief, dried products and nuts, especially pistachios, can act as carriers of Salmonella and threaten the health of consumers. Pistachios are of particular importance due to their high economic value, widespread domestic consumption and global export, and limited processing before consumption. The aim of this review article is to comprehensively examine the sources, causes, and transmission pathways of Salmonella in agricultural products, with a special focus on the pistachio production chain as an important and systematic case study, and to analyze the contributing factors and effective control measures throughout the production and processing chain. Studies show that environmental factors, including contaminated soil and animal manure, unsuitable irrigation water, the presence of animals and birds, contact with contaminated equipment during harvesting and processing, and unsuitable drying and storage conditions, are among the most important factors affecting pistachio contamination with Salmonella. Although the low water activity of pistachios prevents active bacterial growth, Salmonella is able to survive in dry conditions for long periods of time and can cause salmonellosis if the product is consumed raw or unprocessed. Therefore, integrated control throughout the production chain, from farm to processing, along with the use of modern disinfection methods, is essential for effectively reducing the risk of Salmonella in dry products such as pistachios.

Key Words: Salmonella, pistachio, food safety, microbial contamination, dried product, control strategies.

¹ Agricultural Engineering Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran.

*Corresponding Author: mahdokht_arjomand@yahoo.com