

Evaluation of the Volumetric Content and Internal Structure of Aerosol Cans Using X-ray Radiography

AmirMohammad Beigzadeh¹  | Mojtaba Askari² 

1. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: abeigzadeh@aeoi.org.ir
2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: moasgari@aeoi.org.ir

Article Information:

Research Article

Received 18 April 2026

Revised 04 Oct 2026

Accepted 05 Oct 2026

Keywords:

X-ray Radiography,
Aerosol Cans,
Volumetric Content,
Non-destructive Testing
(NDT),
Digital Radiography (DR)

ABSTRACT

In this study, an approach is presented for evaluating the volumetric content and examining the internal structure of aerosol spray cans with varying dimensions, shapes, and filling volumes using X-ray radiography. Conventional industrial methods are primarily based on measuring the net weight of the product after subtracting the packaging weight. Although such methods are useful for determining the quantity of material in terms of mass, they do not provide precise and comprehensive information regarding the actual volumetric content, the percentage of filling, the detailed distribution of liquid and gas phases, or the condition and integrity of internal structural components of the cans. These limitations often result in quality assessment and production monitoring relying almost exclusively on weight-based measurements, which are frequently insufficient in many critical industrial situations. To address this challenge, the present study employs a transmission digital radiography (DR) system based on X-ray imaging, specially designed, carefully constructed, and rigorously calibrated within the radiation laboratory. This advanced method enables complete, non-destructive visualization and thorough inspection of the internal space of the can, allowing the accurate determination of phase boundaries, precise identification of potential defects, detailed assessment of filling uniformity, and comprehensive analysis of the internal structure and constituent components with exceptionally high precision. To evaluate the performance and reliability of the system, five aerosol spray cans with different volumes, dimensions, and physical characteristics were examined using X-ray radiography, and the obtained results were analyzed in both qualitative and the quantitative terms. The findings clearly demonstrated that X-ray radiography provides significantly more accurate volumetric information and a more comprehensive structural analysis when compared to conventional weight-based techniques. This advanced method is not only highly effective for quality control purposes but also contributes substantially to standardization efforts and the overall improvement and optimization of production processes in the aerosol manufacturing industry.

Cite this article: Beigzadeh, A. M. & Askari, M. (2025). Evaluation of the Volumetric Content and Internal Structure of Aerosol Cans Using X-ray Radiography. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 65-79.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.579066.1174>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی محتوای حجمی و ساختار داخلی قوطی‌های آئروسول با روش پرتونگاری پرتو ایکس

امیرمحمد بیگزاده^۱ | مجتبی عسکری^۲۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران، رایانامه: abeigzadeh@aeoi.org.ir۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران، رایانامه: moasgari@aeoi.org.ir

چکیده:

در این پژوهش، یک رویکرد برای ارزیابی محتوای حجمی و بررسی ساختار داخلی قوطی‌های افشانه با ابعاد و محتوای حجمی متفاوت با استفاده از پرتونگاری پرتو ایکس ارائه شده است. روش‌های متداول صنعتی عمدتاً بر پایه اندازه‌گیری وزن خالص محصول پس از کسر وزن بسته‌بندی انجام می‌شوند. این روش‌ها اگرچه میزان ماده موجود را از نظر وزنی مشخص می‌کنند، اما اطلاعات دقیقی درباره محتوای حجمی واقعی، درصد پرشدگی، نحوه توزیع فازهای مایع و گاز و همچنین وضعیت اجزای داخلی سازنده قوطی‌ها را ارائه نمی‌دهند. این محدودیت‌ها باعث می‌شود ارزیابی کیفی دقیق و پایش فرآیند تولید تنها به اندازه‌گیری‌های وزنی وابسته باشد که در برخی شرایط این اطلاعات کافی نیست. برای غلبه بر این چالش، در این مطالعه از یک سامانه پرتونگاری صنعتی دیجیتال عبوری (DR) مبتنی بر پرتو ایکس استفاده شده است؛ سامانه‌ای که به‌صورت ویژه در آزمایشگاه پرتوی طراحی، ساخته و کالیبره شده است. این روش امکان مشاهده و بازرسی غیرمخرب فضای داخلی قوطی و تعیین دقیق مرز میان فازهای مختلف را فراهم می‌کند و همچنین قابلیت شناسایی نواقص احتمالی، بررسی یکنواختی پرشدگی و تحلیل ساختار داخلی و اجزای سازنده را با دقت بالا ایجاد می‌کند. برای ارزیابی عملکرد سیستم، پنج قوطی افشانه با حجم‌ها و ابعاد مختلف تحت پرتونگاری قرار گرفتند و نتایج حاصل، از جنبه‌های کیفی و کمی بررسی شد. یافته‌ها نشان داد که پرتونگاری پرتو ایکس نسبت به روش‌های وزنی سنتی، اطلاعات حجمی دقیق‌تر و تحلیل ساختاری کامل‌تری ارائه می‌کند. این روش نه تنها در کنترل کیفیت، بلکه در استانداردسازی و بهبود فرایندهای تولید محصولات آئروسول نیز بسیار کارآمد است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۱/۲۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۳

کلیدواژگان:

پرتونگاری پرتو ایکس

قوطی افشانه

محتوای حجمی

بازرسی غیرمخرب

تصویربرداری دیجیتال

عبوری.

استناد: بیگزاده، امیرمحمد و عسکری، مجتبی. (۱۴۰۴). ارزیابی محتوای حجمی و ساختار داخلی قوطی‌های آئروسول با روش پرتونگاری پرتو ایکس. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۵ (۱)، ۶۵-۷۹.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.579066.1174>

۱- مقدمه

محصولات آئروسول از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع بسته‌بندی در صنایع مختلف به شمار می‌روند و نقش بسزایی در بهبود کارایی، سهولت استفاده و استانداردسازی تولید ایفا می‌کنند. این محصولات در صنایع متنوعی از جمله بهداشت و درمان، داروسازی، محصولات آرایشی و بهداشتی، مواد شیمیایی، رنگ و رزین، مواد غذایی و حتی صنایع فنی و مکانیکی کاربرد دارند و تقریباً در تمام حوزه‌هایی که نیاز به ذخیره‌سازی ایمن و پخش کنترل‌شده مواد وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ویژگی‌های متمایز قوطی‌های افشانه^۱ یا آئروسول، طراحی فشرده و یکپارچه آن‌هاست که امکان ذخیره‌سازی حجم قابل توجهی از ماده فعال را در فضای کوچک فراهم می‌کند. این طراحی به گونه‌ای است که ماده داخل قوطی می‌تواند در دو فاز مایع و گاز نگهداری شود و به هنگام استفاده، به شکل یک افشانه یا افشانه دقیق و یکنواخت آزاد شود [۱].

ویژگی فنی دیگر قوطی‌های آئروسول، قابلیت کنترل فشار داخلی و توزیع یکنواخت ماده در هنگام پاشش است. این ویژگی باعث شده است که استفاده از آئروسول‌ها در محصولات دارویی برای تجویز دقیق دوز دارو، در محصولات آرایشی برای انتشار یکنواخت عطر یا افشانه‌ها، و در صنایع شیمیایی برای پخش مواد فعال در محیط‌های صنعتی بسیار رایج باشد [۲]. با وجود تمام مزایای فنی و کاربردی، طراحی داخلی قوطی‌های آئروسول نسبتاً پیچیده است و وجود دو فاز مایع و گاز باعث شده است که بررسی دقیق محتوای واقعی، میزان پرشدگی، و کیفیت داخلی محصول به چالشی جدی برای تولیدکنندگان تبدیل شود [۳].

به طور خاص، اطمینان از کیفیت محصول و تطابق آن با استانداردهای تولید، نیازمند ارزیابی دقیق وضعیت داخلی قوطی، کنترل فشار داخلی، بررسی یکنواختی توزیع ماده، و اطمینان از سلامت اجزای مکانیکی مانند شیر و والو است. این پیچیدگی‌ها، تولیدکنندگان را ملزم می‌کند تا علاوه بر کنترل وزن و حجم، از روش‌های پیشرفته‌تر و دقیق‌تری برای بررسی و بازرسی داخلی استفاده کنند تا ضمن تضمین

کیفیت و ایمنی، از عملکرد مطلوب محصول در طول عمر مفید آن اطمینان حاصل شود. به همین دلیل، بررسی‌های دقیق و علمی پیرامون ساختار داخلی و محتوای واقعی قوطی‌های افشانه همواره به‌عنوان یک نیاز ضروری و چالشی مهم در صنایع تولیدکننده آئروسول مطرح بوده است.

روش‌های سنتی کنترل کیفیت محصولات آئروسول عمدتاً مبتنی بر توزین قوطی‌ها هستند. در این روش، وزن کل قوطی پس از پرشدگی اندازه‌گیری شده و وزن بسته‌بندی از آن کسر می‌شود تا مقدار ماده موجود در قوطی تعیین شود. هرچند این روش ساده و سریع است و اطلاعات اولیه‌ای از میزان ماده موجود در محصول ارائه می‌دهد، اما محدودیت‌های جدی دارد. مهم‌ترین محدودیت آن، عدم ارائه اطلاعات حجمی دقیق، عدم امکان بررسی یکنواختی پرشدگی، عدم توانایی شناسایی توزیع فازهای مایع و گاز و عدم دسترسی به جزئیات ساختاری داخلی قوطی است [۴]. این مسئله می‌تواند در مواردی که کنترل کیفیت دقیق و استانداردسازی الزامی است، مشکلات جدی ایجاد کند. به‌طور مثال، عدم پرشدگی یکنواخت، وجود حباب هوا یا نواقص ساختاری داخلی می‌تواند عملکرد محصول، ایمنی مصرف‌کننده و طول عمر مفید قوطی را تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به این محدودیت‌ها، روش‌های غیرمخرب و پیشرفته تصویربرداری داخلی، به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی مطرح شده‌اند. یکی از این روش‌ها، پرتونگاری پرتو ایکس^۲ است که توانایی ارائه تصاویر دقیق از فضای داخلی قوطی‌ها و تعیین مرزهای بین فازهای مختلف را داراست [۵]. پرتونگاری پرتو ایکس، بر اساس عبور پرتوهای ایکس از جسم و ثبت میزان جذب آن توسط مواد مختلف انجام می‌شود و با توجه به تفاوت جذب مواد مایع، گاز و فلز، امکان تشخیص جزئیات داخلی فراهم می‌آید. این روش کاملاً غیرمخرب است و نیاز به باز کردن یا تخلیه قوطی ندارد، بنابراین برای کنترل کیفیت صنعتی ایده‌آل محسوب می‌شود [۶].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه تصویربرداری دیجیتال، از جمله سیستم‌های پرتونگاری صنعتی دیجیتال عبوری^۳ باعث شده است تا بتوان تصاویر با

^۳ Digital Radiography, DR^۱ spray^۲ X-ray radiography

داده‌اند که تصویربرداری دیجیتال امکان تعیین دقیق‌تر محتوای داخلی قوطی‌ها را فراهم می‌کند. همچنین پیشنهاد داده‌اند که استفاده از تصویربرداری مقطع‌نگاری صنعتی^۱ می‌تواند دقت این اندازه‌گیری‌ها را در آینده بیش از پیش افزایش دهد [۱۰].

درباره‌ی از مطالعات ساختار و محتوای داخلی کپسولهای آتش‌نشانی نیز با بهره‌گیری از سامانه‌های تصویربرداری مبتنی بر پرتوی پرنفوذ ایکس و گاما و آشکارسازهای خطی صورت گرفته است. در مطالعاتی به بازرسی کپسول‌های اطفای حریق پرداخته شده است [۱۱-۱۳].

با توجه به این مسأله، در این پژوهش، روشی برای ارزیابی محتوای حجمی و بررسی ساختار داخلی قوطی‌های افشانه با ابعاد و محتوای حجمی متفاوت، بر پایه پرتونگاری پرتو ایکس توسعه یافته است. این روش با استفاده از سامانه تصویربرداری دیجیتال عبوری امکان بازرسی غیرمخرب، تحلیل دقیق مرزهای بین فازهای مایع و گاز، شناسایی نواقص و بررسی یکنواختی پرشدگی را فراهم می‌آورد.

در مطالعه حاضر امکان استفاده از یک سامانه اندازه‌گیری مبتنی بر پرتوی ایکس عبوری و آشکارساز صفحه-تخت، برای بازرسی قوطیهای افشانه، بررسی گردید. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب علمی و عملی برای کنترل کیفیت پیشرفته و استانداردسازی محصولات آئروسول است. با استفاده از پرتونگاری پرتو ایکس، تولیدکنندگان می‌توانند علاوه بر بررسی دقیق محتویات و ساختار داخلی قوطی‌ها، اطلاعات ارزشمندی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید، کاهش ضایعات، و ارتقای ایمنی محصول کسب کنند

۲- روش‌ها

در این کار تجربی ساختار درونی و محتوای حجمی قوطیهای افشانه با بهره‌گیری از سیستم پرتونگاری مبتنی بر پرتوی ایکس بررسی شد. در شکل ۲، شماتیک هندسه تجربی سیستم نمایش داده شده است. اجزای اصلی این سیستم به شرح زیر هستند:

۱. آشکارساز صفحه تخت

آشکارسازها از نظر پوشش میدانی، ویژگی‌های هندسی،

قدرت تفکیک و دقت بالا از داخل قوطی‌های آئروسول به دست آورد. سیستم‌های DR با استفاده از آشکارسازهای دیجیتال و الگوریتم‌های پردازش تصویر، امکان تحلیل کمی و کیفی حجم محتویات، شناسایی نواقص، بررسی یکنواختی پرشدگی و تحلیل ساختار داخلی قوطی‌ها را فراهم می‌کنند. این فناوری می‌تواند اطلاعاتی را ارائه دهد که به هیچ وجه از طریق روش‌های سنتی وزنی قابل دسترسی نیست، از جمله اندازه‌گیری دقیق حجم مایع، تشخیص حباب‌ها، شناسایی نواحی کم‌پرشدگی و ارزیابی وضعیت مکانیکی داخلی قوطی‌ها [۷].

از سوی دیگر، اهمیت استفاده از چنین فناوری‌هایی در صنایع آئروسول، تنها به ارتقای کیفیت محدود نمی‌شود. استانداردسازی محصولات، بهبود فرآیند تولید، کاهش ضایعات و افزایش امنیت محصولات، از مزایای اصلی بهره‌گیری از پرتونگاری پرتو ایکس به شمار می‌رود. صنایع مدرن نیازمند کنترل دقیق و همیشگی کیفیت هستند و به همین دلیل، توانایی ارزیابی داخلی محصولات بدون آسیب رساندن به آن‌ها، یک مزیت استراتژیک محسوب می‌شود.

پرتونگاری صنعتی مبتنی بر پرتو ایکس (یا گاما) به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی آزمون غیرمخرب شناخته می‌شود و در صنایع گوناگون از جوشکاری و ریخته‌گری گرفته تا خطوط لوله و ساخت قطعات پیچیده برای شناسایی نقص‌های داخلی مثل ترک، تخلخل یا عدم یکنواختی به کار می‌رود [۸]. پیشرفت در فناوری، روش پرتونگاری دیجیتال جایگزین پرتونگاری سنتی فیلم شده و مزایایی چون افزایش حساسیت تصویر، بهبود ایمنی، کاهش زمان بازرسی و تسهیل آرشیو نتایج را به همراه دارد [۹]. در سال‌های اخیر مروری جامع بر کاربردهای پرتو ایکس در شناسایی نقص در قطعات و مواد صنعتی منتشر شده است که نشان می‌دهد آزمون غیرمخرب با پرتونگاری با ایکس همچنان در صدر روش‌های بازرسی کامل و داخلی قرار دارد. آدربان و همکارانش یک سیستم پرتونگاری دیجیتال مبتنی بر اشعه ایکس طراحی کرده‌اند تا بتوانند حجم واقعی محتویات قوطی‌های افشانه را با دقت بیشتری نسبت به روش‌های سنتی (که مبتنی بر وزن هستند) اندازه‌گیری کنند. آن‌ها روش جدید خود را با روش‌های متداول مقایسه کرده و نشان

¹ Computed tomography

بازدهی کوانتومی، حساسیت^۱، قدرت تفکیک^۲ فضایی، نوفه^۳، محدوده دینامیکی، یکنواختی، سرعت جمع‌آوری داده، وزن و هزینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این سیستم از یک آشکارساز صفحه تخت با ابعاد 472×472 میلی‌متر مربع استفاده شده تا امکان تصویربرداری از نمونه‌های بزرگ فراهم شود. این آشکارساز شامل 3072×3072 پیکسل است که در مجموع $9,437,184$ پیکسل را تشکیل می‌دهند. تعداد بالای پیکسل‌ها موجب افزایش دقت و وضوح تصاویر حاصل می‌شود که به‌ویژه در مقطع‌نگاری و تصویربرداری با جزئیات بالا اهمیت دارد. اندازه هر پیکسل 140×140 میکرومتر مربع است که امکان ثبت جزئیات ریز و دستیابی به تصاویر با وضوح بالا را فراهم می‌کند. عمق بیت^۴ این آشکارساز ۱۶ بیت است که امکان نمایش طیف گسترده‌ای از سطوح خاکستری و در نتیجه تفکیک بهتر اختلافات ظریف در شدت پرتو ایکس را فراهم می‌سازد. همچنین، پیکسل‌های کوچک‌تر امکان ثبت جزئیات ریزتر را فراهم می‌کنند و به بهبود وضوح مکانی تصاویر کمک می‌کنند. جزئیات ریزتر را شناسایی کرده و تصاویر با کیفیت بالاتری تولید کنند. این آشکارساز از مواد سوسوزن CSI ساخته شده است، که به دلیل توانایی بالای جذب اشعه ایکس و تبدیل آن به سیگنال‌های الکتریکی، انتخاب شده‌اند و تصاویر واضح و دقیقی از ساختار داخلی اجسام ارائه می‌دهند.

با توجه به شار بالای مولد ایکس، مدت زمان پرتودهی برای ایجاد هر تصویر در حدود ۴۰ میلی‌ثانیه بود (۲۵ فریم بر ثانیه). کوتاه بودن زمان پرتودهی موجب کاهش احتمال ایجاد تاری حرکتی و ثبت تصاویر با قدرت تفکیک مناسب می‌شود. از طرفی، زمان پرتودهی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که تعداد فوتون‌های کافی به آشکارساز برسد؛ زیرا کاهش بیش از حد زمان پرتودهی می‌تواند تعداد فوتون‌های دریافتی را کاهش داده و باعث افزایش نویز کوانتومی و کاهش کیفیت تصویر شود. بنابراین، انتخاب زمان پرتودهی ۵۰ میلی‌ثانیه با توجه به شار بالای مولد، امکان دستیابی به تصاویر با کیفیت مناسب، قدرت تفکیک بالا و نویز قابل قبول را فراهم می‌کند.

۲. سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر

برای دریافت تصاویر اولیه از آشکارساز، از نرم‌افزار

۳. مولد ایکس
مولد اشعه ایکس، اصلی‌ترین جزء سامانه پرتونگاری مبتنی بر پرتو ایکس است. در این پژوهش، از یک مولد پرتو ایکس مجهز به مدار تنظیم آنالوگ استفاده شد که امکان کنترل دقیق ولتاژ و جریان لامپ را فراهم می‌کرد. این مولد با نقطه کانونی ۳ میلی‌متر و انرژی کاری ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت تنظیم شد و تیوب اشعه ایکس در فاصله ۱ متری از آشکارساز قرار گرفت. این مولد به دلیل قابلیت اطمینان بالا و کیفیت مناسب، در پروژه‌های مختلف صنعتی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای خنک‌سازی این مولد، از سیستم خنک‌کننده آب‌گرد استفاده شده است. این سیستم با به‌کارگیری آب به‌عنوان ماده خنک‌کننده، باعث حفظ دمای مولد در شرایط ایمن و پایدار می‌شود که برای عملکرد مداوم و بدون وقفه آن بسیار ضروری است.

۴. المانهای آزمون

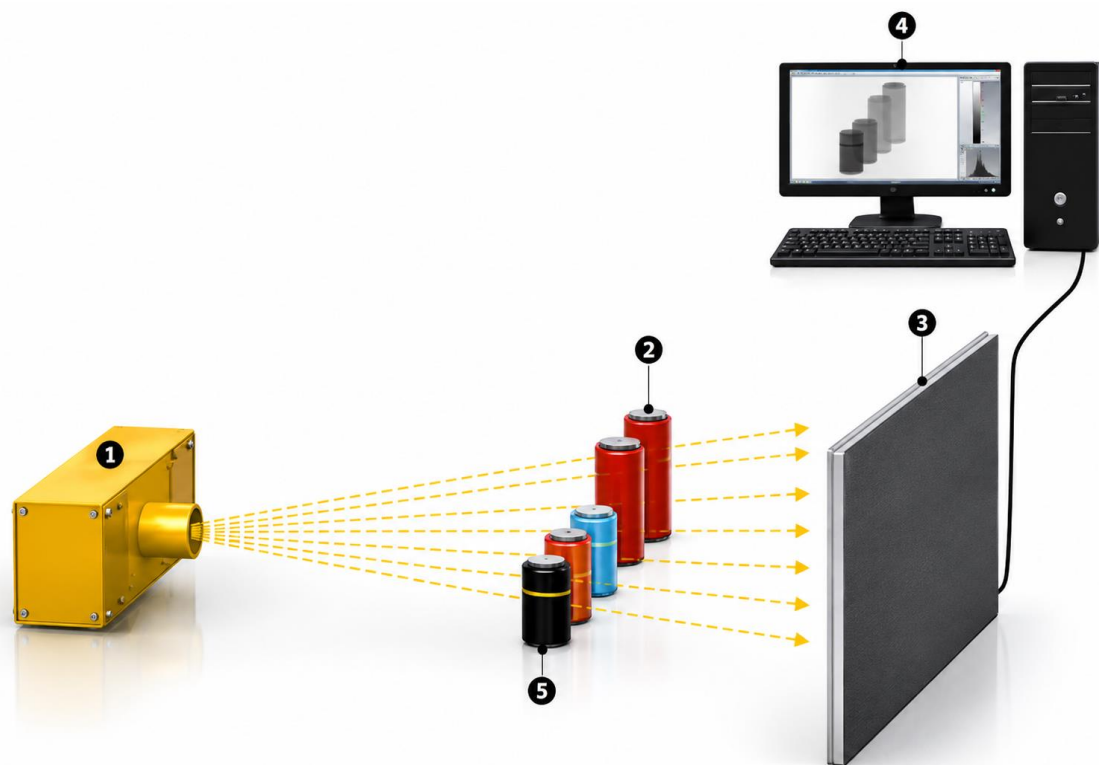
در این آزمایش از ۵ قوطی افشانه با ابعاد و محتوای حجمی متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات سیلندرها و مواد داخل آنها در جدول ۱ لیست گردید.

³ Noise

⁴ Bit Depth

¹ Sensitivity

² Resolution



شکل (۱) طرحواره هندسه تجربی سیستم (۱) مولد پرتوی ایکس (۲) نمونه های افشانه، (۳) آشکارساز صفحه-تخت و (۴) واحد پردازش داده



شکل (۲) تصویری از نمونه قوطی‌های افشانه

جدول (۱) مشخصات قوطی‌های افشانه

شماره قوطی افشانه	وزن سیلندر/حجم	نوع افشانه	کاربرد
۱	۳۰۰ میلی لیتر	افشانه روان کننده	نظافت و روان کردن سطوحی مانند سویچ‌ها، سلکتور ها و موتورهای ظریف الکتریکی و الکترونیکی
۲	۳۰۰ میلی لیتر	افشانه روان کننده	نظافت و روان کردن سطوحی مانند سویچ‌ها، سلکتور ها و موتورهای ظریف الکتریکی و الکترونیکی
۳	۲۰۰ میلی لیتر	افشانه چسب ۱۲۳	اتصال سریع و قوی سطوح مختلف
۴	۲۰۰ میلی لیتر	تستر آشکارساز دود	یک محیط برای شبیه سازی وجود دود با غلظت های مناسب جهت بررسی عملکرد صحیح سیستم آشکارساز دود
۵	۱۵۰ میلیتر	افشانه بدن	آرایی - بهداشتی

۳- نتایج

در قوطی‌ها تهیه شده، به دلیل خام بودن، جزئیات دقیقی از اجزای داخلی قوطی‌ها را نشان نمی‌دهد، اما امکان تشخیص کلی شکل و ابعاد قوطی‌ها و همچنین بررسی وجود هرگونه ناهنجاری بزرگ در ساختار آن‌ها را فراهم می‌کند. برای بررسی دقیق‌تر و شناسایی جزئیات بیشتر، نیاز به پردازش و تحلیل بیشتر تصویر خواهد بود.

تصویر پرتونگاری خام (شکل ۳) که با استفاده از ولتاژ ۱۰۰ کیلوالکترون ولت و جریان ۱ میلی‌آمپر تهیه شده، نمونه‌هایی از قوطی‌های افشانه را نشان می‌دهد که در اندازه‌های مختلف در کنار هم قرار گرفته‌اند. این تصویر، که به منظور بررسی ساختار داخلی و شناسایی عیوب احتمالی



شکل (۳) تصویر خام استخراج شده

می‌شود که هرکدام با فرمول خاصی اعمال می‌شود. این روش‌ها به منظور تقویت یا کاهش تفاوت شدت‌های پیکسل‌ها در تصاویر به کار می‌روند. در ادامه به توضیح این روش‌ها همراه با فرمول‌های ریاضی مربوطه پرداخته شده است [۱۴]:

۱. تباين کششی^۲

این روش با گسترش محدوده شدت پیکسل‌ها، تباين تصویر را افزایش می‌دهد. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$I_{new}(x, y) = \frac{(I(x, y) - I_{min})(I_{max_{new}} - I_{min_{new}})}{I_{max} - I_{min}} + I_{min_{new}} \quad (1)$$

در این فرمول، $I(x, y)$ شدت پیکسل تصویر اصلی است و با گسترش آن در محدوده‌ای جدید، تباين افزایش می‌یابد.

۲. تنظيم خطی تباين^۳

در این روش، شدت پیکسل‌ها به صورت خطی تغییر می‌کند. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$I_{new}(x, y) = \alpha \cdot I(x, y) + \beta \quad (2)$$

که در آن α ضریب تباين است و β مقدار شیفت است. اگر $\alpha > 1$ باشد، تباين تصویر افزایش می‌یابد.

۳. تبدیل لگاریتمی^۴

این روش برای افزایش تباين در تصاویر با شدت‌های کم و نزدیک به هم استفاده می‌شود. فرمول این روش به صورت زیر است:

در ادامه، نتایج پرتونگاری و پردازش تصاویر ثبت‌شده از نمونه‌ها ارائه شده است. به منظور افزایش کیفیت بصری و قدرت تفکیک جزئیات تصاویر، از فیلتر تنظیم تباين^۱ استفاده شد. این فیلتر با بازتوزیع شدت روشنایی پیکسل‌ها، اختلاف بین نواحی روشن و تاریک را تشدید کرده و امکان شناسایی ویژگی‌های ریز و جزئیات پنهان در داخل نمونه‌ها را فراهم می‌آورد. استفاده از این روش در تصویربرداری از نمونه‌های صنعتی و آزمایشگاهی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا بسیاری از نقص‌ها، حباب‌ها یا تغییرات ساختاری ممکن است در تصاویر اولیه با تباين پایین قابل تشخیص نباشند. با به‌کارگیری این فیلتر، تصاویر نه‌تنها از نظر بصری بهبود می‌یابند، بلکه قابلیت تحلیل کمی و کیفی آن‌ها نیز ارتقا می‌یابد. علاوه بر این، این پردازش امکان ارتباط دقیق‌تر شدت پیکسل‌ها با تعداد فوتون‌های ثبت‌شده توسط آشکارساز را فراهم کرده و در نتیجه، اطلاعات دقیق‌تری درباره توزیع مواد و ساختار داخلی نمونه‌ها حاصل می‌شود. این روش ساده اما مؤثر، بستری مناسب برای مراحل بعدی پردازش تصویر و تحلیل داده‌ها فراهم می‌کند و تضمین می‌کند که جزئیات حیاتی بدون از دست رفتن اطلاعات اصلی تصویر در دسترس باشند.

تغییر تباين یکی از تکنیک‌های اساسی در پردازش تصویر است که به منظور بهبود کیفیت دیداری تصاویر و افزایش قابلیت تشخیص جزئیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. تباين تصویر به تفاوت بین روشن‌ترین و تاریک‌ترین نقاط تصویر اشاره دارد. افزایش تباين باعث می‌شود تا جزئیات تصویر بیشتر نمایان شوند، در حالی که کاهش تباين می‌تواند تصویر را یکنواخت‌تر کند.

این روش ساده‌ترین و پرکاربردترین روش برای تغییر تباين است. در این روش، مقادیر پیکسل‌ها به صورت خطی به یک محدوده جدید نگاشت می‌شوند. تغییر تباين تصویر، که برای بهبود دید جزئیات با تنظیم تفاوت بین روشن‌ترین و تاریک‌ترین نقاط انجام می‌شود، روش‌های مختلفی دارد:

برای تغییر تباين تصاویر، از روش‌های مختلفی استفاده

³ Linear Contrast Adjustment

⁴ Logarithmic Transformation

¹ contrast

² Contrast Stretching

$$H_{new}(x, y) = \sum_{k=0}^{I(x, y)} p(k) \quad (5)$$

که در آن $p(k)$ احتمال وقوع شدت k است و هدف این است که شدت‌های پیکسل به طور یکنواخت‌تری توزیع شوند.

۶. افزایش تباین با فیلتر^۳

این روش با استفاده از فیلترهایی مانند فیلتر لاپلاس، ویژگی‌های تصویر (مانند لبه‌ها) را تقویت کرده و تباین را افزایش می‌دهد. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$I_{new}(x, y) = I(x, y) - \alpha \cdot \nabla^2 I(x, y) \quad (6)$$

در اینجا، $\nabla^2 I(x, y)$ اپراتور لاپلاس است که تغییرات شدت پیکسل‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و α یک ضریب تنظیم است.

$$I_{new}(x, y) = c \cdot \log(1 + I(x, y)) \quad (3)$$

در این فرمول، c یک ثابت مقیاس است و $\log$ تابع لگاریتمی است که شدت‌های پیکسل‌ها را تغییر می‌دهد.

۴. تصحیح گاما^۱

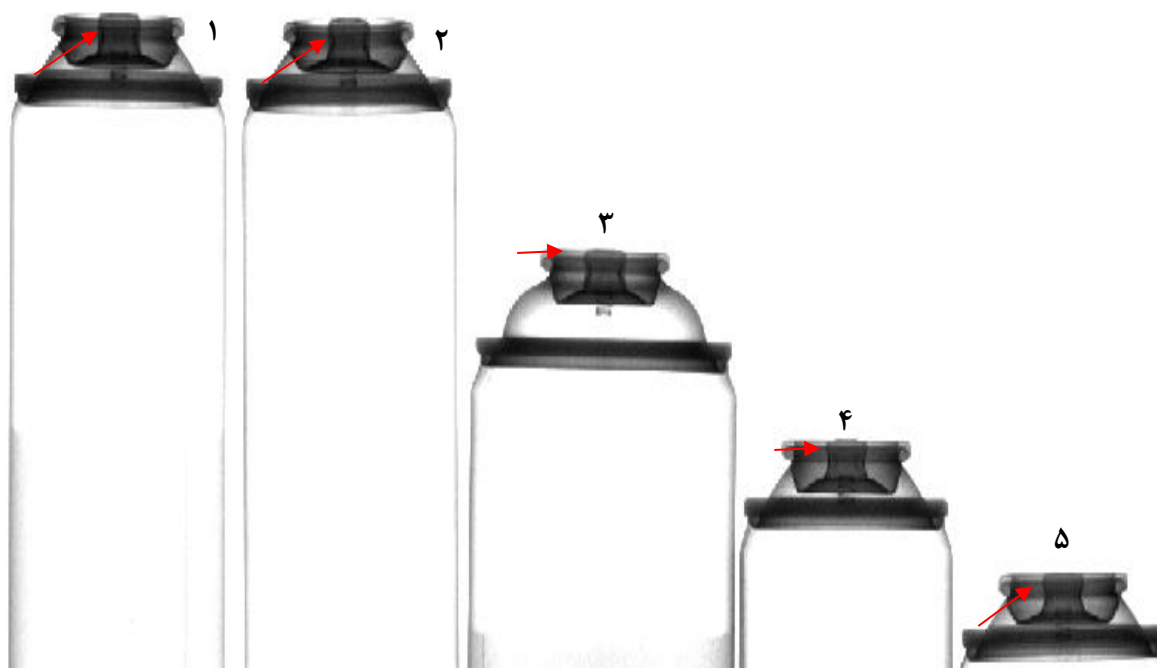
در این روش، شدت‌های پیکسل‌ها با استفاده از نمای γ تغییر می‌کنند. فرمول این روش به صورت زیر است:

$$I_{new}(x, y) = c \cdot I(x, y)^\gamma \quad (4)$$

در این فرمول، $\gamma > 1$ باعث افزایش تباین و $\gamma < 1$ باعث کاهش آن می‌شود.

۵. برابر سازی هیستوگرام^۲

این روش به طور عمده برای تصاویری که دارای توزیع شدت غیر یکنواخت هستند استفاده می‌شود. فرمول این روش به صورت زیر است:



شکل ۴) بررسی قسمت سر افشانه‌ها (بازرسی بخشهای چگال)

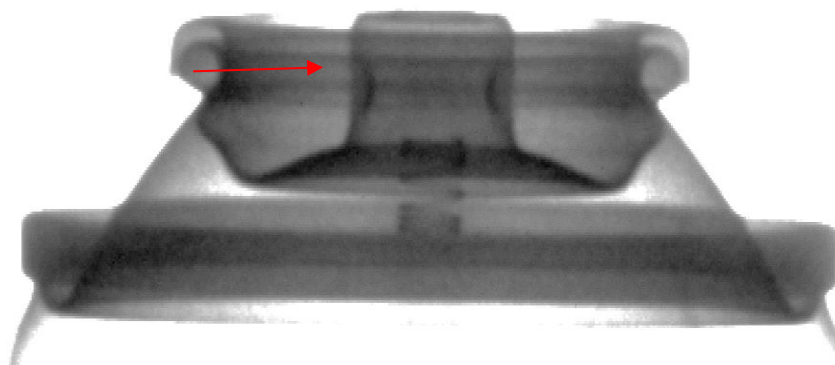
³ Contrast Enhancement using Filters

¹ Gamma Correction

² Histogram Equalization

به منظور نمایش جزئیات بیشتر، تصویر بزرگ‌نمایی شده‌ای از قسمت فلزی فوقانی یکی از افشانه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

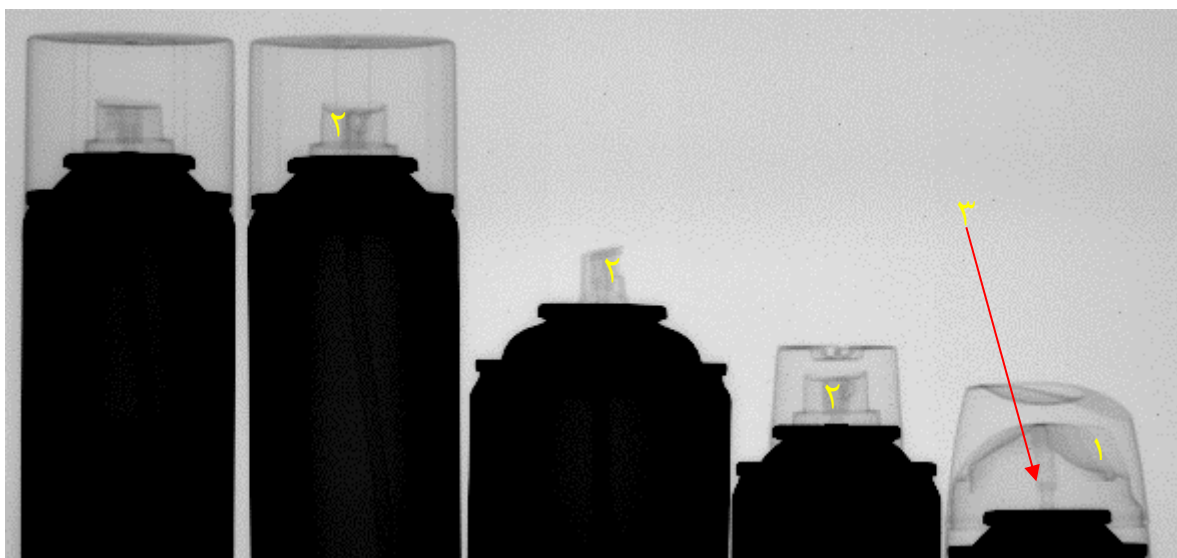
در تصویر فوق، با تنظیم تباین، قسمت فلزی سر نمونه‌ها نمایش داده شده است. تصاویر نشان می‌دهند که قسمت بالایی افشانه‌ها ریا، غیر از افشانه شماره ۳ دارای ساختار مشابهی دارند و فنر فلزی در تمامی آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۵) بررسی قسمت سر افشانه‌ها فنر با بردار قرمز رنگ نشان داده شده است. (بازرسی بخش چگال)

باشد. پرتونگاری این امکان را فراهم کرد تا وضعیت فنر، از جمله وجود هرگونه شکستگی، تغییر شکل، یا جابجایی، به دقت بررسی شود. علاوه بر فنر، سایر اجزای داخلی سر افشانه، مانند مجراهای عبور مواد و نازل خروجی، نیز در تصویر قابل مشاهده هستند. با بررسی این اجزاء می‌توان از عدم وجود هرگونه گرفتگی، انسداد، یا نقص ساختاری اطمینان حاصل کرد.

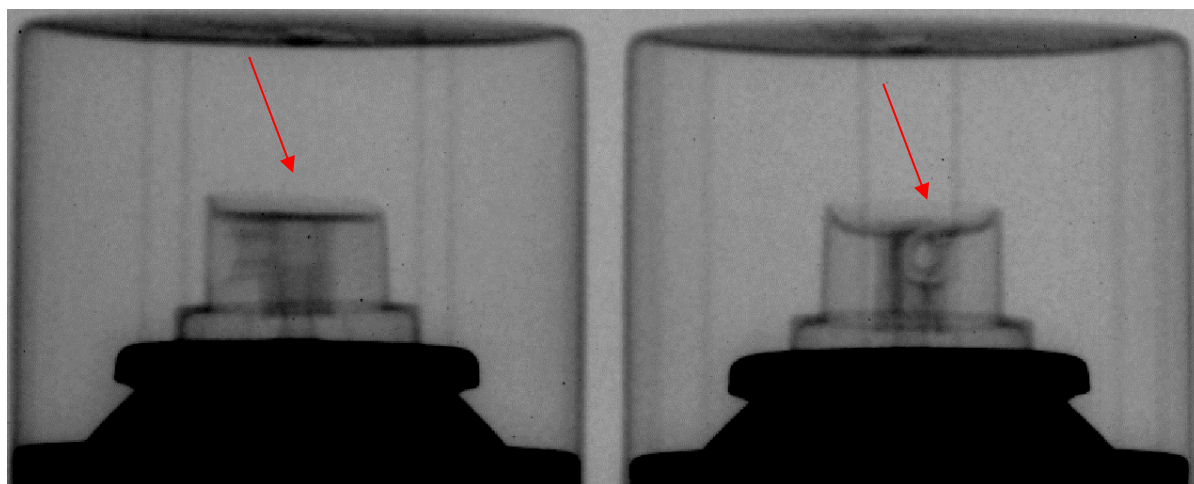
تصویر پرتونگاری شکل ۵ ارائه شده، نمایی از قسمت سر افشانه یکی از قوطیهای افشانه را به نمایش می‌گذارد و هدف آن بررسی و بازرسی بخش‌های چگال این قسمت است. در این تصویر، یک فنر (که با بردار قرمز رنگ مشخص شده است) به وضوح قابل مشاهده است. این فنر، که نقش مهمی در عملکرد صحیح مکانیزم افشانه دارد، باید از جنس و ابعاد مناسبی برخوردار باشد و به درستی در محل خود قرار گرفته



شکل ۶) خط اتصال قالب در درپوش پلاستیکی، بخش خروجی پلاستیکی افشانه، طرح پله‌ای محل قرارگیری انگشت و روزنه خروجی افشانه قابل مشاهده است. محل اتصال لوله به خروجی افشانه نیز مشخص است (بازرسی بخشهای کم چگال)

روزنه خروجی افشانه (مشخص شده با شماره ۱) نیز در تصویر قابل تشخیص است. این طراحی ارگونومیک، استفاده آسان و راحت از قوطی افشانه را برای مصرف‌کننده فراهم می‌کند. محل اتصال لوله به خروجی افشانه نیز در این تصویر مشخص است. این اتصال، که وظیفه انتقال مواد از داخل قوطی به بیرون را بر عهده دارد، باید محکم و بدون نشتی باشد تا از هدر رفتن مواد و کاهش فشار جلوگیری شود. پرتونگاری این امکان را فراهم می‌کند تا این اتصال و سایر بخش‌های کم‌چگال در درپوش پلاستیکی به دقت بازرسی شوند و هرگونه نقص یا عیبی در آن‌ها شناسایی شود. این بازرسی غیرمخرب، به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا کیفیت محصولات خود را بهبود بخشند و از بروز مشکلات احتمالی در حین استفاده جلوگیری کنند.

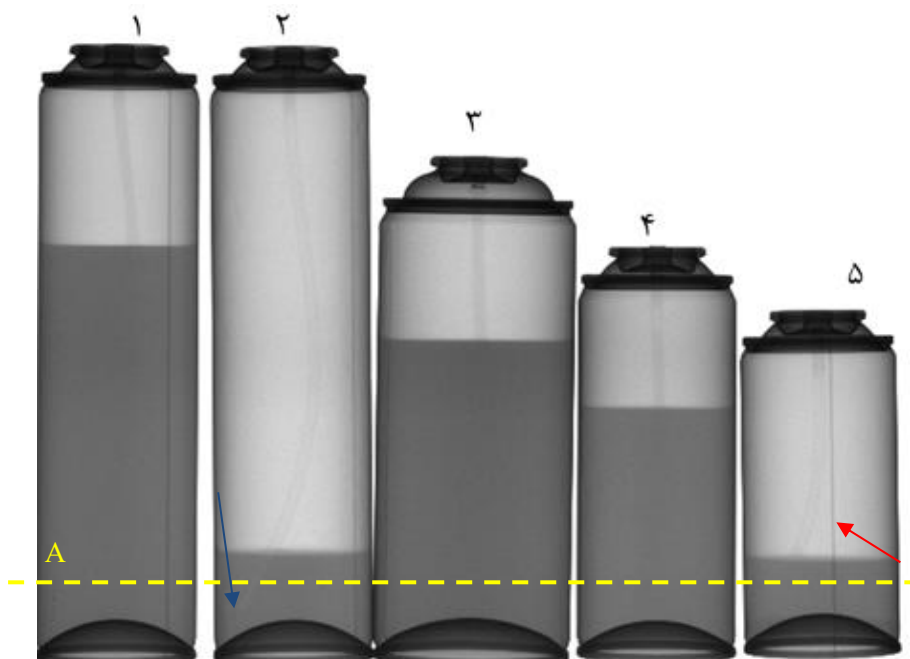
تصویر پرتونگاری شکل ۶ ارائه شده، نمایی دقیق از درپوش‌های پلاستیکی قوطی‌های افشانه را به نمایش می‌گذارد و جزئیات مهمی از ساختار و فرآیند تولید آن‌ها را آشکار می‌سازد. در این تصویر، خط اتصال قالب (مشخص شده با شماره ۳) به وضوح قابل مشاهده است. این خط، که در محل اتصال دو نیمه قالب در فرآیند قالب‌گیری تزریقی ایجاد می‌شود، می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت قالب‌گیری و هم‌ترازی دقیق دو نیمه قالب باشد. ناهمواری یا عدم یکنواختی در این خط می‌تواند نشان‌دهنده مشکلاتی در فرآیند تولید باشد. بخش خروجی پلاستیکی افشانه (مشخص شده با شماره ۲)، که وظیفه هدایت و پخش مواد افشانه شده را بر عهده دارد، نیز در تصویر قابل مشاهده است. طراحی این بخش، به ویژه شکل و اندازه روزنه خروجی، نقش مهمی در کیفیت افشانه و الگوی پخش مواد دارد. طرح پله‌ای محل قرارگیری انگشت و



شکل ۷) قسمت درپوش افشانه (بازرسی بخش‌های کم چگال)

بالاتر، مانند مکانیزم‌های شیر و پایه قوطی‌ها هستند، در حالی که نواحی روشن‌تر نشان‌دهنده چگالی کمتر، نمایانگر پیش‌رانه و بدنه قوطی هستند. اجزای داخلی، از جمله لوله مکش و مجموعه شیر، قابل تشخیص هستند و هرگونه ناهنجاری در موقعیت یا یکپارچگی آن‌ها می‌تواند نشان‌دهنده نقص‌های ساختاری یا آسیب باشد.

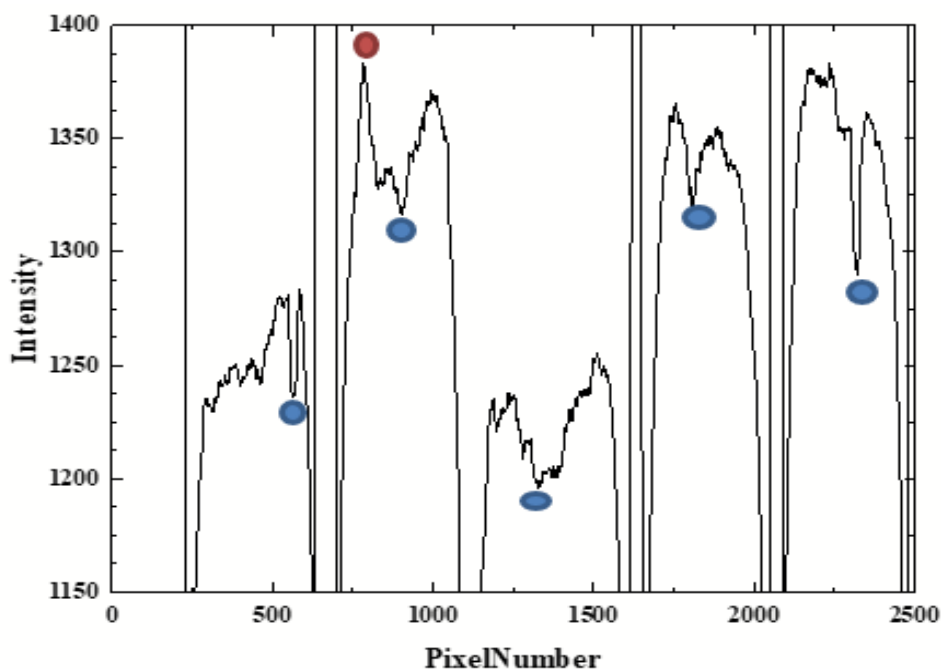
شکل ۷ دو درپوش پلاستیکی قوطی افشانه را نشان می‌دهد که با استفاده از قالب تزریقی تولید شده‌اند. خطوط عمودی روی درپوش‌ها، ناشی از خط قالب‌گیری تزریقی هستند و تصاویر پرتونگاری به وضوح این خطوط را نشان می‌دهند. این تصاویر، به همراه مشخصات دیگر، امکان تشخیص هرگونه حفره احتمالی در درپوش پلاستیکی را فراهم می‌سازند. نواحی تیره‌تر نشان‌دهنده مناطق با چگالی



شکل ۸) مشاهده بخشهای نسبتاً چگال افشانه‌ها نسبت به بخشهای پلاستیکی فوقانی افشانه‌ها

دیده می‌شوند. خط عمودی روی بدنه، نشان‌دهنده خط ایجاد شده در فرآیند نورد و خمش ورق سازنده است که در تصویر پرتونگاری مشخص است.

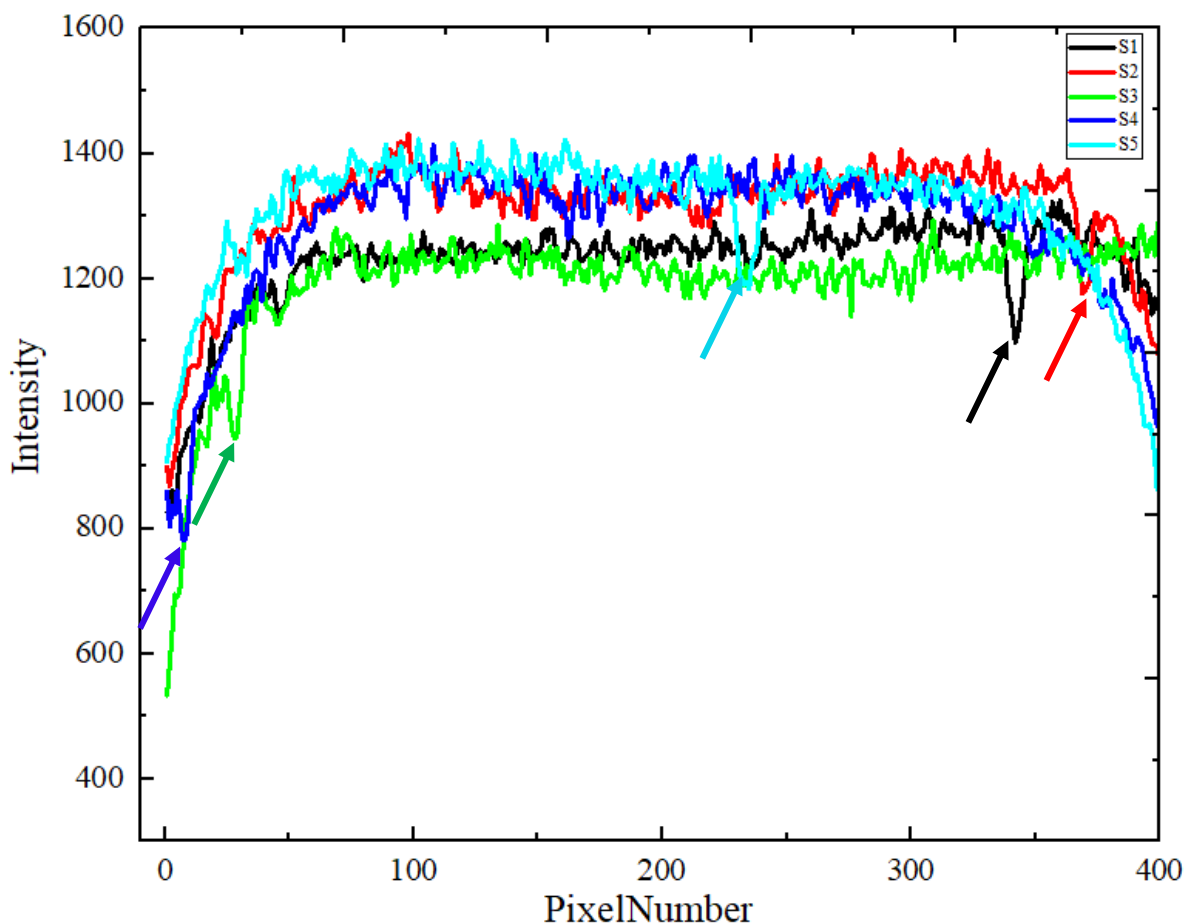
شکل ۸ مسیر شلنگ‌های باریک داخل افشانه‌ها مشخص است. لوله فقط در افشانه شماره ۲ کامل دیده می‌شود (بردار آبی). در بقیه، شلنگ فقط در قسمت خالی قابل مشاهده است که احتمالاً به دلیل چگالی کم ماده داخل افشانه در قوطی شماره ۲ است. خط جوش (بردار قرمز) و کف افشانه‌ها هم



شکل ۹) تغییرات شدت در راستای خط افقی نشان داده شده در شکل ۸ در راستای یک خط گذرنده، افت شدت به سبب حضور خط جوش (دوایر آبی)، خیز شدت به سبب حضور هوا و شلنگ درون ماده افشانه (دایره قرمز)

افشانه شماره ۵، به احتمال زیاد ناشی از حضور خط جوش بر روی بدنه‌ی آن است که می‌تواند مرتبط با فرآیند ساخت باشد. پس از آن، افشانه شماره ۱ بیشترین تضعیف را به دلیل خط جوش بدنه نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش شدت ثبت‌شده در طیف‌ها، به حضور شلنگ و مسیر آن در داخل قوطی‌ها نسبت داده می‌شود. در هر نمونه، یک افزایش شدت مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده‌ی چگالی کمتر شلنگ در مقایسه با ماده‌ی اصلی در آن مسیر است و در نتیجه، منجر به افزایش شدت پرتو می‌شود.

در طیف ثبت‌شده، افت ناشی از وجود خط جوش در بدنه افشانه‌ها به وضوح قابل تشخیص است. این پدیده به دلیل چگالی بالاتر ناحیه جوش در بدنه نمونه‌ها رخ داده است. تحلیل طیف حاصله از خط گذرنده از تصویر شکل ۸ امکان ارزیابی و مقایسه‌ی تراکم ماده‌ی موجود در افشانه‌های مشابه را فراهم می‌آورد. بر اساس میزان تضعیف شدت پرتو، افشانه‌ها به ترتیب زیر رتبه‌بندی می‌شوند: ۳، ۱، ۴، ۵ و ۲. افشانه شماره ۳ بیشترین میزان تضعیف و کمترین میزان عبور پرتو را نشان می‌دهد. بیشترین میزان تضعیف مشاهده‌شده در



شکل ۱۰) مقایسه تغییرات شدت ثبت شده در آشکارساز به ازای خط افقی در پنج نمونه در راستای خط گذرنده A به تفکیک افشانه ها (بردارها نشان‌دهنده افت در شدت ثبت شده به سبب حضور خط جوش روی بدنه)

نشان می‌دهند، اطلاعات مفیدی در مورد ساختار و کیفیت هر قوطی ارائه می‌دهند. افت شدت در یک موقعیت خاص نشان‌دهنده‌ی افزایش چگالی ماده (مانند وجود خط جوش یا ناخالصی) و خیز شدت نشان‌دهنده‌ی کاهش چگالی (مانند

شکل ۱۰ تحلیل طیف‌های شدت پرتو عبوری از پنج قوطی افشانه (۱ تا ۵) امکان ارزیابی و مقایسه‌ی تراکم ماده‌ی موجود در آن‌ها را فراهم می‌آورد. این طیف‌ها، که شدت پرتو را بر حسب موقعیت مکانی در طول قوطی (شماره پیکسل)

از نظر وزنی ارائه می‌دهند، روش پرتونگاری پرتو ایکس امکان مشاهده و تحلیل غیرمخرب فضای داخلی قوطی را فراهم می‌آورد. این قابلیت، امکان تعیین دقیق مرز بین فازهای مختلف (مایع و گاز)، شناسایی نواقص احتمالی (مانند ترک‌ها، حفره‌ها، یا ناخالصی‌ها)، بررسی یکنواختی پرشدگی، و تحلیل ساختار داخلی و اجزای سازنده (مانند لوله مکش، شیر، و نازل) را با دقت بالا ایجاد می‌کند.

نتایج حاصل از ارزیابی پنج قوطی افشانه با حجم‌ها و ابعاد مختلف، نشان داد که پرتونگاری پرتو ایکس نسبت به روش‌های وزنی سنتی، اطلاعات حجمی دقیق‌تر و تحلیل ساختاری کامل‌تری ارائه می‌دهد. این روش، نه تنها در کنترل کیفیت و شناسایی محصولات معیوب، بلکه در استانداردسازی و بهبود فرایندهای تولید محصولات آئروسل نیز بسیار کارآمد است. با استفاده از اطلاعات دقیق و جامعی که از طریق پرتونگاری پرتو ایکس به دست می‌آید، می‌توان فرایندهای تولید را بهینه‌سازی نمود، میزان ضایعات را کاهش داد، و کیفیت محصولات آئروسل را به طور قابل توجهی ارتقا بخشید. علاوه بر این، این روش می‌تواند در طراحی و توسعه محصولات جدید آئروسل نیز مورد استفاده قرار گیرد، زیرا امکان بررسی و ارزیابی دقیق ساختار داخلی و عملکرد اجزای مختلف را فراهم می‌سازد. در نهایت، این پژوهش نشان داد که پرتونگاری پرتو ایکس می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند و کارآمد در صنعت تولید قوطی‌های آئروسل مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود کیفیت، ایمنی، و کارایی این محصولات کمک شایانی نماید.

۵- منابع

- [1] Falah, Somaya, Alaa Mhawish, Ali H. Omar, Meytar Sorek-Hamer, Alexei I. Lyapustin, Tirthankar Banerjee, Fadi Kizel, and David M. Broday. "Intercomparison of Aerosol Types Reported as Part of Aerosol Product Retrieval Over Diverse Geographic Regions." *Remote Sensing* 14, no. 15 (2022): 3667.
- [2] Hinds, William C., and Yifang Zhu. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons, 2022.
- [3] Niemiec, Katarzyna, Anna Fitrzyk, and Cezary Grabowik. "Methods of Manufacture and Innovations in Steel Aerosol Cans"

وجود شلنگ یا فضای خالی) است. به طور کلی، قوطی ۳ کمترین شدت پرتو عبوری را نشان می‌دهد که حاکی از چگالی بیشتر ماده در این قوطی است. در مقابل، قوطی ۵ در قسمت میانی طیف، شدت بیشتری را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از وجود فضای خالی یا ماده کم‌چگال‌تر باشد. با این حال، افت شدید شدت در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی طیف ۵، احتمال وجود خط جوش در این نواحی را مطرح می‌کند. قوطی ۱ نیز در قسمت میانی طیف، شدت نسبتاً کمی دارد که ممکن است نشان‌دهنده وجود خط جوش یا ماده متراکم‌تر باشد. قوطی‌های ۲ و ۴ رفتار مشابهی دارند و شدت پرتو عبوری از آن‌ها در محدوده متوسط قرار دارد. افزایش شدت مشاهده‌شده در طیف‌ها، به حضور شلنگ و مسیر آن در داخل قوطی‌ها نسبت داده می‌شود. چگالی کمتر شلنگ در مقایسه با ماده‌ی اصلی، منجر به افزایش شدت پرتو در این نواحی می‌شود.

حجم نسبی ماده پرشده در قوطی‌ها با استفاده از تصاویر پرتونگاری X-ray و تعیین ارتفاع ناحیه پرشده اندازه‌گیری شد. با توجه به استوانه‌ای بودن قوطی‌ها، حجم بخش پرشده از رابطه ساده زیر به دست می‌آید:

$$V = \pi r^2 h \quad (7)$$

که در آن r شعاع داخلی قوطی و h ارتفاع ناحیه پرشده است. ارتفاع h از روی تصویر X-ray و با استفاده از مقیاس تصویر تعیین شد. بنابراین، با ثابت بودن قطر قوطی، ارتفاع سطح ماده مستقیماً معیار مناسبی برای مقایسه حجم پرشده قوطی‌ها است. دقت اندازه‌گیری نیز به وضوح تصویر، اندازه پیکسل و دقت تعیین مرز بین ماده و فضای خالی وابسته است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارتقای فرایندهای ارزیابی و کنترل کیفیت در صنعت تولید قوطی‌های آئروسل، یک رویکرد نوین مبتنی بر پرتونگاری پرتو ایکس را برای تعیین دقیق محتوای حجمی و بررسی ساختار داخلی این محصولات ارائه نمود. در حالی که روش‌های متداول صنعتی، عمدتاً متکی بر اندازه‌گیری وزن خالص محصول پس از کسر وزن بسته‌بندی هستند و تنها اطلاعات محدودی در مورد میزان ماده موجود

- Production." *International Journal of Modern Manufacturing Technologies (IJMMT)* 13 (2021).
- [4] Fitrzyk, Anna, and Katarzyna Niemiec. "Quality Control in Aerosol Production." *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering* 1, no. 1 (2018): 85-91.
- [5] Knyziak, Adrian Bozydar, Witold R zodkiewicz, Ewa Kaczorowska, and Michal Derlacinski. "New X-Ray Testing Methods of Aerosol Products for Industrial Radiography." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 844 (2017): 141-146.
- [6] Ou, Xiangyu, Xue Chen, Xianning Xu, Lili Xie, Xiaofeng Chen, Zhongzhu Hong, Hua Bai, et al. "Recent Development in X-Ray Imaging Technology: Future and Challenges." *Research* (2021).
- [7] Della-Giustina, Daniel E. *Fire Safety Management Handbook*. CRC Press, 2014.
- [8] K. Mesbah, M. Darouich, and S. Mimount. "Advancements in Certification Standards and Training for Non-Destructive Testing (NDT) in Civil Engineering: A Review." *Journal Name* Volume (2025).
- [9] Patel, Ramesh J. "Digital Applications of Radiography." *Proceedings of the 3rd MENDT, Manama, Bahrain* (2005): 210-215.
- [10] Knyziak, Adrian Bozydar, Witold R zodkiewicz, Ewa Kaczorowska, and Michal Derlacinski. "New X-Ray Testing Methods of Aerosol Products for Industrial Radiography." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 844 (2017): 141-146.
- [11] Garcia-Martin, Roberto, Alfonso González-Briones, and Juan M. Corchado. "Smartfire: Intelligent Platform for Monitoring Fire Extinguishers and Their Building Environment." *Sensors* 19, no. 10 (2019): 2390.
- [12] Heinbach, Jan-Hendrik, and Angelina Aziz. "Visual Partial Inspection of Fire Safety Equipment Using Machine Learning." 34. *ForumBauinformatik* (2023).
- [13] Jiang, Y., Gong, J.M. and Tang, P.J. "Corrosion Induced Explosion of a High-Pressure Fire-Extinguishing Gas Cylinder." *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14 (2014): 564-568.
- [14] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. (2004). *Digital Image Processing Using MATLAB*.