

Risk Assessment of Non-Destructive Testing in Smart Production Lines Using Risk Matrix and HAZOP Approach

Nazila Adabavazeh¹, Mehdi Rafie^{2*}

1- Department of Industrial Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, n.adabavazeh@iau.ac.ir

2-Department of Materials Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, m.rafi@iau.ac.ir

Abstract:

In welding and metallic structures industries, the quality and safety of components play a decisive role in the overall performance of equipment. Non-destructive testing (NDT), as an essential part of the technical inspection system, provides an effective tool for detecting discontinuities and hidden defects without causing damage to the component. With the expansion of smart technologies and implementation of Industry 4.0 principles, traditional inspection methods require systematic risk assessment and revision to ensure accuracy, repeatability, and compliance with international standards. In this study, potential risks in NDT processes—including ultrasonic testing, radiographic testing, liquid penetrant testing, and magnetic particle testing—were identified and analyzed. The assessment approach was designed based on standards, and the severity, probability, and consequences of each risk were determined using a risk matrix and the HAZOP model. The results indicated that the highest risks are associated with human error, environmental conditions, and equipment defects, which can be controlled through the implementation of a quality management system in accordance with ISO 9001 and continuous inspector training. The proposed framework for risk management in NDT processes can enhance reliability, reduce human errors, and improve safety in the welding industry.

Keywords: Risk, Non-Destructive Testing, Smart Manufacturing, Risk Matrix, HAZOP.

ارزیابی ریسک آزمایش‌های غیرمخرب در خطوط تولید هوشمند با رویکرد ماتریس ریسک و HAZOP

نازیلا ادب آوازه^۱، مهدی رفیعی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، n.adabavazeh@iau.ac.ir

^{۲*} دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، m.rafiiei@iau.ac.ir

چکیده

در صنایع جوش و سازه‌های فلزی، کیفیت و ایمنی قطعات، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی تجهیزات دارد. آزمایش‌های غیرمخرب به عنوان بخش اساسی نظام بازرسی فنی، ابزاری کارآمد برای شناسایی ناپیوستگی‌ها و عیوب پنهان بدون آسیب به قطعه محسوب می‌شوند. با گسترش فناوری‌های هوشمند و پیاده‌سازی اصول صنعت چهارم، روش‌های سنتی بازرسی نیازمند بازنگری و ارزیابی ریسک سیستماتیک هستند تا اطمینان از دقت، قابلیت تکرار و انطباق با استانداردهای بین‌المللی حاصل شود. در این پژوهش، ریسک‌های بالقوه در فرایندهای آزمایش‌های غیرمخرب «فراصوتی، پرتونگاری، مایع نافذ، ذرات مغناطیسی» شناسایی و تحلیل شده‌اند. رویکرد ارزیابی بر پایه استانداردها طراحی و شدت، احتمال و پیامد هر ریسک با استفاده از ماتریس ریسک و مدل HAZOP تعیین گردید. نتایج نشان داد بیشترین ریسک‌ها به «خطای انسانی، شرایط محیطی و نقص تجهیزات» مربوط می‌شوند که با استقرار نظام مدیریت کیفیت مطابق با ISO 9001 و آموزش مستمر بازرسان قابل کنترل است. چارچوب پیشنهادی ارائه شده برای مدیریت ریسک در فرایندهای NDT، می‌تواند به ارتقای قابلیت اطمینان، کاهش خطاهای انسانی و افزایش ایمنی در صنعت جوش منجر شود.

کلمات کلیدی: ریسک، آزمایش‌های غیرمخرب، تولید هوشمند، ماتریس ریسک، HAZOP.

۱- مقدمه

تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان سازه‌ها در صنایع مختلف، از اهمیت حیاتی برخوردار است. بازرسی مبتنی بر ریسک به عنوان رویکردی نوین، در حال تبدیل شدن به استاندارد صنعتی برای مدیریت یکپارچگی تجهیزات است. هدف اصلی این روش، تعیین احتمال وقوع خرابی و پیامدهای ناشی از آن است تا بتوان با ترکیب احتمال و پیامدهای احتمالی، میزان ریسک یک فرایند یا سازه را به صورت کمی ارزیابی نمود. در این میان، آزمایش‌های غیرمخرب یکی از مهمترین ابزارها برای ارزیابی وضعیت تجهیزات، شناسایی عیوب و محاسبه قابلیت اطمینان سازه‌ها به شمار می‌روند. آزمایش‌های غیرمخرب برای تشخیص ترک‌ها، ناپیوستگی‌ها و سایر نقص‌ها استفاده می‌شوند. احتمال تشخیص به نوع روش آزمایش‌های غیرمخرب مورد استفاده، دقت تجهیزات و مهارت بازرسان بستگی دارد. اطلاعات حاصل از این آزمایش‌ها، امکان پیش‌بینی عمر باقیمانده سازه و برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه را فراهم می‌کند [۱].

آزمایش‌های غیرمخرب نقش حیاتی در تضمین یکپارچگی ساختاری و ایمنی سیستم‌های حیاتی در خطوط تولید پیشرفته دارند و با شناسایی زود هنگام نقص‌ها از بروز خرابی‌های زودرس جلوگیری می‌کنند [۲]. این نقص‌ها می‌توانند در مراحل مختلف تولید یا در طول عمر مفید سازه به دلیل محدودیت فناوری، اجرای نادرست جوش، خستگی، ضربه‌های مکانیکی یا شرایط محیطی ایجاد شوند و عملکرد سازه را بطور چشمگیری کاهش دهند [۳]. از این رو انجام صحیح این آزمایش‌ها توسط بازرسان واجد صلاحیت، برای جلوگیری از تفسیر نادرست داده‌ها و کاهش خطاهای انسانی ضروری است [۴].

با پیشرفت فناوری و ظهور مواد مهندسی شده با معماری‌های پیچیده‌تر، روش‌های سنتی NDT با محدودیت‌هایی در حساسیت، دقت و قابلیت اطمینان مواجه شده‌اند. ظهور مواد مرکب، ساختارهای چندلایه و فناوری‌های جوش پیشرفته، نیاز به بازرسی‌های دقیق‌تر و تحلیل ریسک جامع‌تر را افزایش داده است [۵].

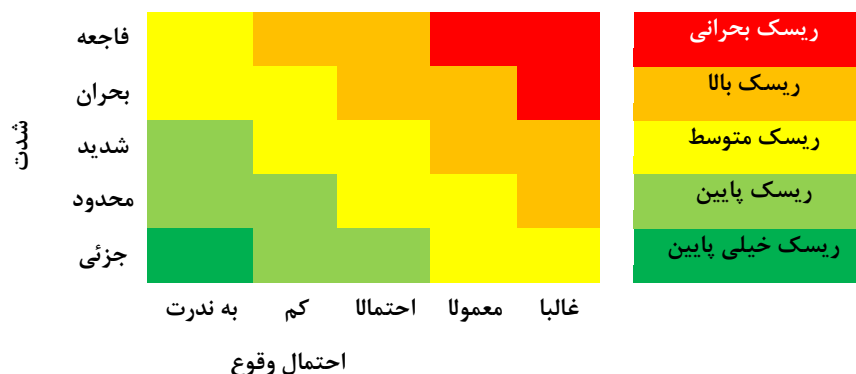
با توسعه فناوری‌های دیجیتال و ظهور صنعت ۴/۰، آزمایش‌های غیرمخرب نیز به سمت خودکارسازی، تحلیل داده‌محور و هوشمندسازی پیش می‌روند. در چنین محیطی، ارزیابی ریسک به‌صورت پویا و هوشمند اهمیت دوچندان می‌یابد؛ زیرا ارتباط میان تجهیزات، حسگرها و داده‌های بلادرنگ، نیازمند مدلی دقیق برای پایش و تصمیم‌گیری ایمن است.

ارزیابی ریسک فرایند سیستماتیکی است که درک علل و پیامد احتمالی حوادث را با کمک ماتریس ارزیابی ریسک به صورت بصری فراهم می‌کند. ماتریس ارزیابی ریسک دوبعدی به طور گسترده برای تعریف سطوح مختلف ریسک استفاده می‌شود. ماتریس ریسک می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر تخمین ریسک و تصمیم‌های مدیریت ایمنی داشته باشد [۶]. استفاده از ماتریس ریسک در فرایندهای بازرسی باعث می‌شود تصمیم‌گیری‌ها درباره اقدامات کنترلی، تخصیص منابع و بهبود ایمنی مبتنی بر داده و تحلیل علمی باشد.

برای تحلیل دقیق‌تر ریسک‌های بحرانی و شناسایی علل ریشه‌ای و پیامدهای احتمالی عملیات، از روش مطالعه مخاطرات و قابلیت بهره‌برداری^۲ نیز استفاده می‌شود. HAZOP به عنوان یک ابزار تیمی، امکان بررسی ترکیب عوامل انسانی، تجهیزات و شرایط محیطی را فراهم کرده و پایه‌ای برای طراحی اقدامات پیشگیرانه و کاهش ریسک ارائه می‌دهد. این پژوهش با هدف توسعه چارچوب ارزیابی ریسک فرایندهای آزمایش‌های غیرمخرب انجام شده است تا ضمن بهبود کیفیت بازرسی و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، هزینه‌های توقف تولید و خطرات ناشی از خرابی را نیز کاهش دهد.

۲- روش‌شناسی

این مطالعه از نوع تحلیلی-توصیفی و مقطعی می‌باشد. جامعه آماری پژوهش شامل تجهیزات، اپراتورها و بخش‌های فعال در فرایندهای آزمایش‌های غیرمخرب در خطوط تولید هوشمند می‌باشد. داده‌ها در دوره زمانی پاییز ۱۴۰۴ شامل ریسک‌های روش‌های NDT نظیر «فراصوتی، رادیوگرافی، ذرات مغناطیسی، مایع نافذ» جمع‌آوری شده است. در گام اول، تمام ریسک‌های مرتبط با تجهیزات، اپراتور، محیط و در صورت وجود ریسک‌های فناوری و هوشمند شناسایی شده است. سپس با استفاده از ماتریس ریسک استاندارد، ریسک‌ها ارزیابی و اولویت‌بندی گردیده تا ریسک‌های بحرانی مشخص شوند. در گام دوم، برای تحلیل دقیق‌تر ریسک‌های با اولویت بالا، HAZOP توسط کارشنان خبره اجرا شده است تا علل ریشه‌ای، پیامدهای احتمالی و تعاملات عملیاتی هر ریسک شناسایی شود. داده‌های جمع‌آوری شده مبتنی بر مستندات استانداردهای بین‌المللی و دستورالعمل‌های داخلی بوده است. نتایج این مطالعه، پایه‌ای برای طراحی اقدامات پیشگیرانه و کاهش ریسک، بهبود ایمنی، کیفیت و قابلیت اطمینان فرایندهای NDT در خطوط تولید فراهم می‌نماید و امکان شناسایی نقاط ضعف و بهینه‌سازی فرایندها را فراهم می‌نماید. ماتریس ریسک مورد استفاده در پژوهش که از ترکیب سطوح احتمال وقوع و پیامد ریسک محاسبه شده است مطابق با جدول (۱) و شکل (۱) است.



شکل (۱). ماتریس تجزیه و تحلیل ریسک [۷]

جدول (۱). سطوح احتمال وقوع و پیامد ریسک [۷]

پیامد ریسک		احتمال وقوع ریسک	
ردیف	سطح	ردیف	سطح
۱	جزئی (بدون اثر بر عملکرد)	۱	به ندرت
۲	متوسط (نیاز به تعمیر کم)	۲	احتمال کم
۳	شدید (توقف جزئی خط تولید)	۳	احتمالا
۴	بحرانی (خرابی عمده یا توقف تولید)	۴	معمولا
۵	تهدید سلامت/آسیارت فاجعه‌آمیز	۵	غالبا

۳- یافته‌ها

ارزیابی ریسک در آزمایش‌های غیرمخرب، فرایندی نظام‌مند برای شناسایی، تحلیل و اولویت‌بندی خطرات بالقوه در حین انجام بازرسی‌ها است. هدف از این ارزیابی، کاهش احتمال بروز خطا در تشخیص عیوب، افزایش قابلیت اطمینان نتایج و ارتقای سطح ایمنی و کیفیت در فرایندهای بازرسی فنی می‌باشد. هر یک از روش‌های آزمایش‌های غیرمخرب دارای ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و ریسک‌های خاص خود هستند که بسته به نوع ماده، شرایط کاری، تجهیزات و مهارت اپراتور می‌توانند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشند. ارزیابی ریسک هر روش بر اساس «شدت، احتمال وقوع و سطح ریسک» در ادامه به تفکیک ارائه شده است.

۳-۱- آزمایش فراصوتی

آزمایش فراصوتی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تشخیص عیوب داخلی جوش و فلزات در صنایع مختلف است. جدول (۲) ارزیابی ریسک روش آزمایش فراصوتی را بر اساس شدت، احتمال وقوع و سطح ریسک نشان می‌دهد.

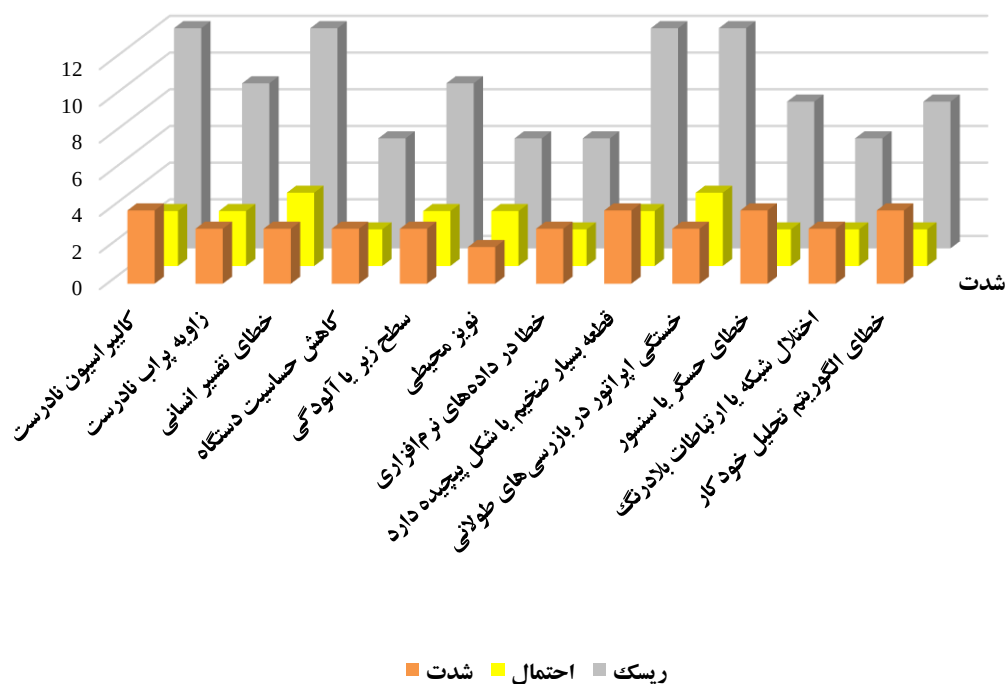
جدول (۲). ارزیابی ریسک روش آزمایش فراصوتی

ردیف	ریسک	علت وقوع	شدت	احتمال	ریسک	استاندارد از
فراصوتی (UT)						
۱	کالیبراسیون نادرست	تنظیم اشتباه یا کالیبره نکردن دستگاه	۴	۳	۱۲	[8]
۲	زاویه پراب نادرست	بی‌دقتی در نصب حسگر	۳	۳	۹	[8]
۳	خطای تفسیر انسانی	تجربه کم، خستگی	۳	۴	۱۲	[9]
۴	کاهش حساسیت دستگاه	دمای زیاد یا خرابی داخلی	۳	۲	۶	[10]
۵	سطح زبر یا آلوده	چربی، زنگ‌زدگی یا رنگ	۳	۳	۹	[8]
۶	نویز محیطی	ماشین‌آلات مجاور، کابل‌های نامناسب	۲	۳	۶	[10]
۷	خطا در داده‌های نرم‌افزاری	خرابی نرم‌افزار یا سیستم ذخیره‌سازی	۳	۲	۶	[11]
۸	قطعه بسیار ضخیم است یا شکل پیچیده دارد	محدودیت نفوذ امواج	۴	۳	۱۲	[8]
۹	خستگی اپراتور در بازرسی‌های طولانی	فشار کاری بالا، شیفت طولانی	۳	۴	۱۲	[9]
۱۰	خطای سنسور	خرابی یا عدم کالیبراسیون حسگرهای هوشمند	۴	۲	۸	[12]
۱۱	اختلال شبکه یا ارتباطات بلادرنگ	عدم انتقال داده سنسورها به سیستم تحلیل	۳	۲	۶	
۱۲	خطای الگوریتم تحلیل خودکار	تشخیص اشتباه نرم‌افزار هوشمند	۴	۲	۸	

نتایج این روش به‌طور مستقیم تحت تأثیر ریسک‌های مرتبط با کالیبراسیون تجهیزات، تفسیر انسانی، خستگی اپراتور در بازرسی‌های طولانی، شرایط سطح، تنظیمات پراب و محدودیت‌های هندسی قطعه قرار دارد. عوامل انسانی مانند خستگی اپراتور و تجربه ناکافی نیز سهم قابل توجهی در افزایش احتمال خطا دارند که مطابق با الزامات استاندارد [9] ISO 9712 باید مدیریت و کنترل شوند. بروز خطا در هر یک از این موارد می‌تواند منجر به عدم تشخیص ناپیوستگی‌های بحرانی یا تشخیص اشتباه عیوب شود. همچنین در سیستم‌های UT

دیجیتال، عملکرد نرم افزار، پایداری سنسورها و صحت الگوریتم های تحلیل خودکار نقش مهمی در حفظ کیفیت نتایج دارند. بنابراین، جهت کاهش سطح ریسک در آزمایش UT، اجرای اقدامات کلیدی مانند کالیبراسیون منظم، آموزش و صلاحیت سنجی دقیق پرسنل، آماده سازی صحیح سطح، کنترل شرایط محیطی، نظارت بر عملکرد تجهیزات دیجیتال و انجام بازبینی های دوره ای ضروری است. رعایت این موارد موجب افزایش قابلیت اطمینان و صحت ارزیابی عیوب در فرایند بازرسی می شود.

در روش فراصوتی، ریسک ها عمدتاً ناشی از خطای انسانی و تنظیمات پروب هستند. با توجه به شدت و احتمال ریسک ها، نمودار ریسک (شکل ۲) نشان می دهد که مواردی مانند کالیبراسیون نادرست، خطای تفسیر و خستگی اپراتور در زمره ریسک های بحرانی قرار دارند. برای این دسته از ریسک ها، تحلیل HAZOP انجام شد تا علت ها، پیامدها و اقدامات کنترلی بررسی شوند. جدول (۳) تحلیل HAZOP ریسک های روش آزمایش فراصوتی را مورد بررسی قرار می دهد.



شکل (۲). نمودار ارزیابی ریسک آزمایش فراصوتی

روش HAZOP یک ابزار سیستماتیک برای شناسایی انحرافات احتمالی از شرایط مطلوب فرایند است. در این روش، هر گره^۳ که نمایانگر یک بخش مشخص از فرایند است انتخاب شده و با استفاده از واژگان راهنما^۴ مانند کاهش/افزایش (More/Less)، عدم انجام (No)، معکوس (Reverse) و بخشی از (Part of)، انحرافات^۵ احتمالی تحلیل می شود. سپس برای هر انحراف، علت های ممکن، پیامدها و اقدامات اصلاحی یا پیشگیرانه/توصیه^۶ تعیین می گردد. این ساختار باعث می شود ریشه خطاها و اثرات آنها به صورت شفاف و قابل ردیابی مطابق با جدول (۳) مشخص شود. در این مطالعه، گره های HAZOP بر اساس مراحل اصلی فرایندهای NDT شامل «تجهیزات»، «فرایند بازرسی» و «شرایط محیطی» تعریف شده اند. عوامل انسانی (مانند اپراتور) یا عناصر مدیریتی به عنوان گره مستقل در HAZOP در نظر گرفته نمی شوند و نقش آنها تنها در بخش «علت انحراف» یا «اقدام کنترلی» ثبت شده است.

3- Node

4- Guide Words

5- Deviation

6- Control Measures / Recommendations

جدول (۳). HAZOP برای آزمایش فراصوتی

ردیف	گروه	واژه راهنما	انحراف	علت احتمالی	پیامد	اقدامات کنترلی / توصیه
۱	مرحله کالیبراسیون دستگاه	Less / No	کالیبراسیون ناقص یا انجام نشده	بی‌توجهی، کمبود تجربه، نبود دستورالعمل	قرارت اشتباه، از دست رفتن عیوب	کالیبراسیون دوره‌ای، چک لیست پیش از کار
۲	مرحله تنظیم پروپ	Less	زاویه یا تماس ناکافی پروپ	نصب نادرست، سطح نامناسب	عدم تشخیص ترک‌های بحرانی	استفاده از نگهدارنده، آموزش تنظیم
۳	مرحله تفسیر سیگنال	More / Wrong	خطای تفسیر انسانی	تجربه کم، خستگی	Accept/Reject اشتباه	بازبینی نتایج، آزمون دوم‌کرز
۴	تجهیزات الکترونیکی	Less	کاهش حساسیت	خرابی داخلی، دمای زیاد	کاهش دامنه سیگنال و خطای تشخیص	تعمیرات دوره‌ای، کنترل دما
۵	سطح قطعه	Part of	آماده‌سازی ناقص سطح	زنگ، چربی، زبری	تضعیف امواج، اکوی کاذب	آماده‌سازی سطح، تمیزکاری
۶	محیط کار	More	نویز الکترومغناطیسی بالا	ماشین‌آلات مجاور، کابل‌های نامناسب	سیگنال کاذب، تداخل	جداسازی کابل، ارزیابی محیط
۷	نرم‌افزار دستگاه	Wrong	داده اشتباه/خرابی حافظه	خطای نرم‌افزار	فایل اشتباه، تحلیل غلط	تست نرم‌افزار، بک‌آپ‌گیری
۸	قطعه مورد آزمون	Less	نفوذ ناکافی امواج در قطعات ضخیم	محدودیت هندسی	عدم تشخیص عیوب عمقی	انتخاب پروپ دیگر، زاویه مناسب
۹	اپراتور	More	خستگی و خطای انسانی	فشار کاری بالا، شیفت طولانی	تفسیر اشتباه نتایج	تقسیم شیفت، استراحت کافی
۱۰	سنسورهای هوشمند	Wrong	خروجی اشتباه حسگر	خرابی، کالیبره نبودن	داده غلط و تحلیل خطا	تست سنسور، کالیبراسیون
۱۱	شبکه و انتقال داده	No	عدم ارسال داده به‌لایه	اختلال شبکه	از دست رفتن داده	پایش شبکه، تجهیزات پایدار
۱۲	الگوریتم هوشمند	Wrong	تشخیص اشتباه نرم‌افزار	ضعف الگوریتم	False Alarm یا Missed Defect	اعتبارسنجی الگوریتم، بازبینی انسانی

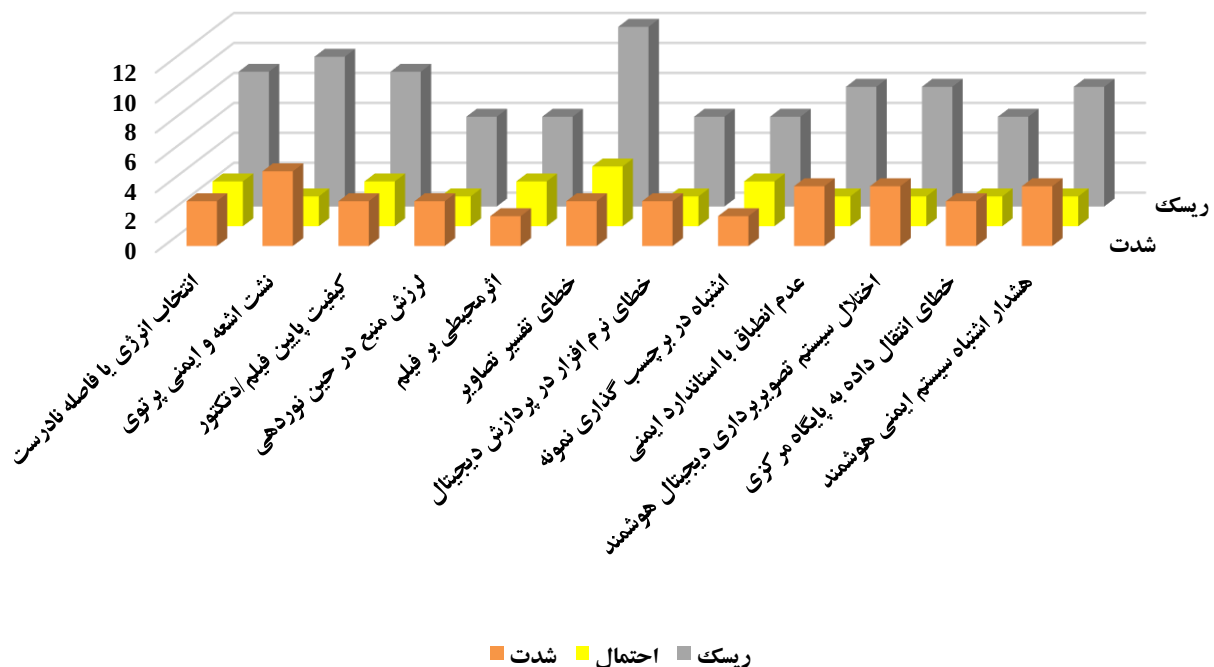
۳-۲- آزمایش رادیوگرافی

در ارزیابی ریسک روش رادیوگرافی صنعتی، ریسک‌های مرتبط با ایمنی پرتویی و پارامترهای کنترلی تابش بالاترین اهمیت را دارند. در جدول (۴) و شکل (۳) ریسک‌های این روش بررسی و ارزیابی شده است.

جدول (۴). ارزیابی ریسک روش آزمایش رادیوگرافی

ردیف	ریسک	علت وقوع	شدت	احتمال	ریسک	استناد از
رادیوگرافی (RT)						
۱	انتخاب انرژی یا فاصله نادرست	تجربه کم یا نبود دستورالعمل	۳	۳	۹	[13]
۲	نشت اشعه و ایمنی پرتوی	خرابی حفاظ یا خطای انسانی	۵	۲	۱۰	[14]
۳	کیفیت پایین فیلم/دکتور	تنظیم نادرست دستگاه	۳	۳	۹	[15]
۴	لرزش منبع در حین نوردهی	حرکت دستگاه یا قطعه	۳	۲	۶	[13, 16]
۵	اثر محیطی بر فیلم	شرایط محیطی نامناسب	۲	۳	۶	[13]
۶	خطای تفسیر تصاویر	خطای انسانی در تفسیر	۳	۴	۱۲	[13]
۷	خطای نرم افزار تحلیل دیجیتال	خطای برنامه یا سیستم	۳	۲	۶	[17, 18]
۸	اشتباه در برچسب گذاری نمونه	بی‌دقتی اپراتور	۲	۳	۶	[9]
۹	عدم انطباق با استاندارد ایمنی	ناآگاهی از دستورالعمل	۴	۲	۸	
۱۰	اختلال سیستم تصویربرداری دیجیتال هوشمند	خطای نرم‌افزار پردازش خودکار تصاویر	۴	۲	۸	[19, 20]
۱۱	خطای انتقال داده به پایگاه مرکزی	عدم دریافت اطلاعات از سنسور به سرور	۳	۲	۶	[21]
۱۲	هشدار اشتباه سیستم ایمنی هوشمند	هشدار نادرست سیستم ایمنی پرتویی خودکار	۴	۲	۸	

خطای تفسیر تصاویر، نشت اشعه، انتخاب نادرست انرژی و فاصله منبع و کیفیت پایین فیلم/دکتور از مهم‌ترین خطرات شناسایی شده هستند که می‌توانند به نتایج اشتباه، تکرار آزمایش و حتی تهدید سلامت اپراتور منجر شوند. همچنین خطاهای مرتبط با انتقال داده، شرایط محیطی و برچسب‌گذاری نمونه از ریسک‌های متوسط محسوب می‌شوند که در صورت عدم مدیریت مناسب، افزایش عدم قطعیت در تشخیص عیوب را به همراه دارند. نتایج نشان می‌دهد اجرای دقیق استانداردهای فنی و ایمنی ([13,15] ISO 17636, [14] ISO 3999, [18,19] ISO 16371 و غیره)، همراه با آموزش مستمر اپراتور و پایش تجهیزات، مؤثرترین راهکار برای کاهش احتمال و شدت ریسک‌ها است. در مجموع، کنترل صحیح شرایط تابش، ایمنی پرتویی و مدیریت داده‌های دیجیتال سه محور اصلی کاهش ریسک در روش رادیوگرافی صنعتی را تشکیل می‌دهند.



شکل (۳). نمودار ارزیابی ریسک آزمایش رادیوگرافی

تحلیل خطر و عملیاتی روش آزمایش رادیوگرافی در جدول (۵) قابل مشاهده است.

جدول (۵). HAZOP برای آزمایش رادیوگرافی

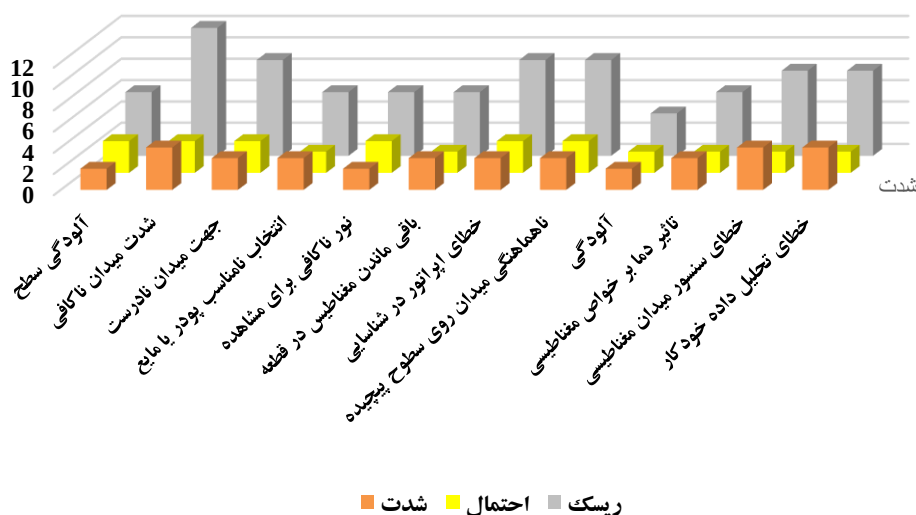
ردیف	گروه	واژه راهنما	انحراف	علت احتمالی	اثر/پیامد	اقدامات کنترلی/توصیه
۱	تنظیم انرژی/فاصله	Wrong	انتخاب انرژی یا فاصله نامناسب	تجربه کم، عدم رعایت دستورالعمل	تصویر کم کیفیت، عدم تشخیص عیوب	آموزش اپراتور، دستورالعمل دقیق
۲	سیستم حفاظ پرتویی	Less	کاهش حفاظ یا نشت اشعه	خرابی حفاظ، خطای انسانی	آسیب پرتویی، خطر ایمنی	تست حفاظ، دزیمتر، آموزش ایمنی
۳	فیلم/دکتکتور	Less	حساسیت کم یا تنظیم نادرست	خرابی دستگاه، آلودگی	تصویر تار یا کم کنتراست	کالیبراسیون و تست کیفیت
۴	مرحله نوردهی	Reverse	حرکت منبع یا قطعه	لرزش دستگاه	محوشدگی تصویر	تثبیت دستگاه، پایه مقاوم
۵	شرایط محیطی	More	اثر رطوبت/دما بر فیلم	کنترل ناکافی	افت کیفیت فیلم	کنترل محیط، اتاق تاریک استاندارد
۶	تفسیر تصاویر	Wrong	تفسیر نادرست عیوب	خستگی، تجربه کم	قبول قطعه معیوب	آموزش، بازبینی دومرحله‌ای
۷	نرم افزار دیجیتال	Wrong	خطای پردازش تصویر	باگ نرم افزار	تولید تصویر اشتباه	اعتبارسنجی نرم افزار، بکاپ
۸	برچسب گذاری	No	عدم درج برچسب یا اشتباه	بی دقتی اپراتور	اشتباه در نسبت دادن عیب به قطعه	سیستم رهگیری دیجیتال
۹	دستورالعمل ایمنی	Less	رعایت نشدن آیین نامه	ناآگاهی	خطر پرتوی	آموزش ایمنی، نظارت
۱۰	تصویربرداری دیجیتال	Wrong	اختلال سیستم هوشمند	خرابی الگوریتم، بدافزار	تشخیص اشتباه	تست دوره‌ای
۱۱	شبکه داده	No	قطع ارتباط با سرور	نقص شبکه	عدم ذخیره داده	مانیتورینگ شبکه
۱۲	سیستم هشدار پرتویی	Wrong	هشدار اشتباه یا عدم هشدار	خرابی سنسور	توقف بی مورد یا بی خطر شدن فرایند	تست دوره‌ای سیستم ایمنی

۳-۳- روش آزمایش ذرات مغناطیسی

در ارزیابی ریسک روش ذرات مغناطیسی، بیشترین عوامل خطا به پارامترهای میدان و عملکرد اپراتور مربوط می شوند که در استانداردها نیز به عنوان نقاط بحرانی تأکید شده اند. ریسک های شناسایی شده این روش در جدول (۶) و شکل (۴) ارائه شده است.

جدول (۶). ارزیابی ریسک روش آزمایش ذرات مغناطیسی

ردیف	ریسک	علت وقوع	شدت	احتمال	ریسک	استاندارد از
ذرات مغناطیسی (MT)						
۱	آلودگی سطح	گرد و غبار یا رنگ	۲	۳	۶	[22]
۲	شدت میدان ناکافی	دستگاه تنظیم نشده	۴	۳	۱۲	[23]
۳	جهت میدان نادرست	بی توجهی اپراتور	۳	۳	۹	
۴	انتخاب نامناسب پودر یا مایع	آلودگی مایع یا پودر	۳	۲	۶	[24]
۵	نور ناکافی برای مشاهده	محیط تاریک یا کم نور	۲	۳	۶	[25]
۶	باقی ماندن مغناطیس در قطعه	حذف مغناطیس انجام نشده	۳	۲	۶	[23]
۷	خطای اپراتور در شناسایی	تجربه کم	۳	۳	۹	[9]
۸	ناهماهنگی میدان روی سطوح پیچیده	میدان یکنواخت نیست	۳	۳	۹	[23]
۹	آلودگی	نگهداری نادرست	۲	۲	۴	[25]
۱۰	تأثیر دما بر خواص مغناطیسی	تأثیر دما بر مغناطیس	۳	۲	۶	
۱۱	خطای سنسور میدان مغناطیسی	خرابی حسگر کنترل شدت و جهت میدان	۴	۲	۸	[23]
۱۲	خطای تحلیل داده خودکار	تشخیص اشتباه نقص توسط سیستم هوشمند	۴	۲	۸	



شکل (۴). نمودار ارزیابی ریسک آزمایش ذرات مغناطیسی

بررسی جدول نشان می‌دهد ریسک‌هایی مانند «شدت میدان ناکافی، جهت میدان نادرست، خطای اپراتور، ناهماهنگی میدان روی سطح پیچیده» به دلیل ارتباط مستقیم با شناسایی عیوب، اثرگذاری بیشتری بر عدم شناسایی عیب داشته و بنابراین کنترل‌های دقیق‌تری می‌طلبند. نقش اپراتور در کیفیت نتایج بسیار برجسته است و استانداردها مانند ISO 9712 [9] و EN 4179 [32] به خوبی نشان می‌دهند که سطح مهارت می‌تواند تفاوت چشمگیری در دقت تشخیص ایجاد کند. ریسک‌های نوظهور مثل خطای تحلیل خودکار نرم‌افزار NDT نیز اهمیت روزافزونی دارند، زیرا اتوماسیون بدون اعتبارسنجی می‌تواند باعث خطاهای نوع جدید شود. از سوی دیگر، مواردی مانند آلودگی سطح یا آلوده مواد مصرفی اگرچه شدت کمتری دارند، اما در صورت تکرار، قابلیت اعتماد فرایند را کاهش می‌دهند. در مجموع، ترکیب کنترل‌های فنی (میدان، نور، تجهیزات) و کنترل‌های انسانی (آموزش، صلاحیت، بازبینی) می‌تواند ریسک روش MT را به طور مؤثر مدیریت و نتایج پایدار و قابل اتکا ایجاد کند. در ادامه، جدول (۷) HAZOP ارزیابی ریسک روش ذرات مغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول (۷). HAZOP برای آزمایش ذرات مغناطیسی

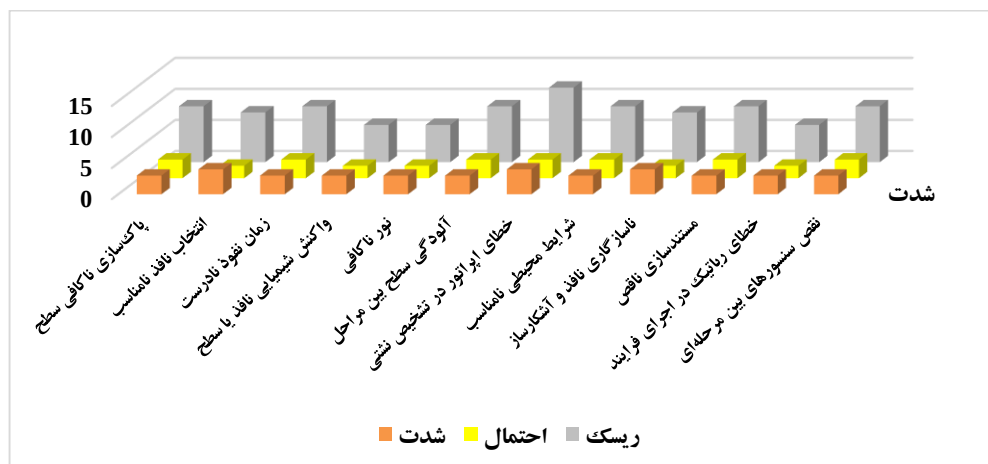
ردیف	گره	واژه راهنما	انحراف	علت احتمالی	اثر/پیامد	اقدامات کنترلی/توصیه
۱	سطح قطعه	Part of	سطح نامناسب آلوده	چربی، گرد و غبار، رنگ	کاهش حساسیت آشکارسازی	تمیزکاری و آماده سازی کامل
۲	شدت میدان	Less	میدان ناکافی	تنظیم نادرست، خرابی دستگاه	عدم آشکارسازی ترک	کالیبراسیون میدان
۳	جهت میدان	Wrong	جهت دهی نادرست	عدم توجه اپراتور	مخفی شدن عیوب عرضی	آموزش اپراتور
۴	مواد مصرفی	Wrong	پودر نامیغ نامناسب	آلودگی یا انتخاب غلط	ردگیری ناقص ترک‌ها	کنترل کیفیت مواد
۵	نور محیط	Less	نور ناکافی	محیط تاریک	اختلال در مشاهده الگو	نور استاندارد مطابق ISO 3059
۶	حذف مغناطیس	No	عدم دمگنتایز	بی توجهی	مغناطیس باقیمانده	اجرای دمگنتایز کامل
۷	تشخیص بصری	Wrong	خطای اپراتور	تجربه کم	پذیرش ترک سطحی	بازبینی دوم
۸	سطوح پیچیده	Part of	میدان غیر یکنواخت	هندسه مشکل	عدم مشاهده ترک	اعمال چندجهته میدان
۹	نظافت تجهیزات	Less	آلودگی تجهیزات	نگهداری ضعیف	نتایج متغیر	نظافت/نگهداری دوره‌ای
۱۰	دما	More	دمای زیاد	محیط یا قطعه داغ	تغییر رفتار مغناطیسی	کنترل دما قبل از آزمون
۱۱	سنسور میدان	Wrong	داده اشتباه	خرابی سنسور	میدان نامناسب	تست و تعویض سنسور
۱۲	تحلیل خودکار	Wrong	تشخیص اشتباه سیستم	خطای الگوریتم	هشدار غلط/تشخیص ندادن عیب	اعتبارسنجی و بازبینی انسانی

۳-۴-آزمایش مایع نافذ

ریسک‌های روش آزمایش مایع نافذ در شکل (۵) و جدول (۸) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

جدول (۸). ارزیابی ریسک روش آزمایش مایع نافذ

ردیف	ریسک	علت وقوع	شدت	احتمال	ریسک	استاندارد از
مایع نافذ (PT)						
۱	پاک‌سازی ناکافی سطح	آلودگی یا چربی باقیمانده	۳	۳	۹	[26]
۲	انتخاب نافذ نامناسب	نوع فلز یا رنگ سطح متفاوت	۴	۲	۸	[27]
۳	زمان نفوذ نادرست	بی توجهی اپراتور	۳	۳	۹	[28]
۴	واکنش شیمیایی نافذ با سطح	ناسازگاری مواد	۳	۲	۶	[27]
۵	نور ناکافی	محیط تاریک	۳	۲	۶	[29]
۶	آلودگی سطح بین مراحل	حمل نادرست قطعات	۳	۳	۹	[26]
۷	خطای اپراتور در تشخیص نشئی	بی دقتی یا خستگی	۴	۳	۱۲	[9]
۸	شرایط محیطی نامناسب	تاثیر بر عملکرد مایع	۳	۳	۹	[29]
۹	ناسازگاری نافذ و آشکارساز	استفاده از مواد اشتباه	۴	۲	۸	[30]
۱۰	مستندسازی ناقص	نداشتن کنترل کیفی	۳	۳	۹	[31]
۱۱	خطای سیستم خودکار در اجرای فرایند PT	خطا در مقدار یا زمان تزریق مایع	۳	۲	۶	[28]
۱۲	نقص سنسورهای بین مرحله‌ای	تشخیص اشتباه تمیزی سطح توسط حسگر	۳	۳	۹	[26]



شکل (۵). نمودار ارزیابی ریسک آزمایش مایع نافذ

خطای اپراتور در تشخیص نشستی یا خستگی وی می تواند منجر به ثبت نتایج اشتباه و پذیرش قطعات معیوب شود، بنابراین آموزش و نظارت مستمر ضروری است. **آلودگی سطح** بین مراحل یا واکنش شیمیایی ناخواسته با مواد سطحی ممکن است اثر نافذ را کاهش دهد و نیاز به کنترل دقیق فرایند دارد. **مستندسازی ناقص** یا عدم ثبت دقیق داده ها ردیابی عیوب و اقدامات اصلاحی را دشوار می کند و خطرات احتمالی برای ایمنی و کیفیت ایجاد می کند. در صورت **انتخاب نافذ نامناسب یا ناسازگاری بین نافذ و آشکارساز**، ترک ها و عیوب ممکن است به طور کامل آشکار نشوند و نتایج آزمایش قابل اعتماد نخواهد بود. همچنین، نور ناکافی یا شرایط محیطی نامطلوب می تواند تشخیص عیوب سطح را دچار خطا کند و دقت بازرسی را کاهش دهد. استفاده از تجهیزات خودکار و سنسورهای کنترل کیفیت، همراه با نگهداری منظم، می تواند ریسک خطاهای مکانیکی و سیستم خودکار را کاهش دهد و اطمینان از دقت آزمایش را افزایش دهد. در ادامه، جدول (۹) ارزیابی HAZOP آزمایش مایع نافذ را نشان می دهد.

جدول (۹). HAZOP برای آزمایش مایع نافذ

ردیف	گره	واژه راهنما	انحراف	علت احتمالی	اثر/پیامد	اقدامات کنترلی/توصیه
۱	آماده سازی سطح	Less	تمیزکاری ناکافی	چربی/آلودگی باقیمانده	عدم نفوذ مایع نافذ	تمیزکاری استاندارد
۲	انتخاب نافذ	Wrong	نافذ نامناسب	ناسازگاری با جنس قطعه	کاهش حساسیت	انتخاب ماده سازگار
۳	زمان نافذ	Less/More	زمان نفوذ اشتباه	بی توجهی اپراتور	نفوذ ناقص یا بیش از حد	رعایت زمان استاندارد
۴	واکنش شیمیایی	Wrong	ناسازگاری نافذ و سطح	ماده نامناسب	لکه یا تداخل در تصاویر	تست سازگاری قبل کار
۵	نور	Less	نور ناکافی	محیط تاریک	مشاهده ناقص نشر	نور UV/سفید استاندارد
۶	حمل قطعه	Part of	آلودگی بین مراحل	حمل نادرست	تخریب الگوی ترک	کنترل حمل و نقل
۷	تشخیص نهایی	Wrong	خطای اپراتور	خستگی، تجربه کم	گزارش غلط	بازبینی توسط نفر دوم
۸	شرایط محیط	More	دما/رطوبت نامناسب	محیط غیر کنترل شده	اختلال عملکرد نافذ	کنترل محیط مطابق استاندارد
۹	سازگاری نافذ/آشکارساز	Wrong	عدم سازگاری مواد	انتخاب غلط	خطای انتشار ترک	استفاده از ست سازگار
۱۰	مستندسازی	No	ثبت ناقص داده ها	بی دقتی	ردیابی ناقص نتایج	فرم استاندارد گزارش
۱۱	ریات تزریق	Less/Wrong	تزریق نادرست	خطای ربات	نفوذ اشتباه	تست و کالیبراسیون ربات
۱۲	سنسور تمیزی سطح	Wrong	تشخیص اشتباه	خرابی حسگر	اجرای مرحله بعد بدون تمیزی	تست سنسور و تعویض

بررسی ریسک در تمامی روش های آزمایش های غیرمخرب نشان داد:

- در همه روش های آزمایش غیرمخرب، دو عامل اصلی «**خطای انسانی و نقص تجهیزات**» بیشترین تأثیر را در افزایش ریسک داشتند.
- در روش فراصوتی، **خطای تفسیر و کالیبراسیون نادرست** دستگاه بیشترین تأثیر را دارند.
- در رادیوگرافی، **خطای تفسیر تصاویر و نشت اشعه و ایمنی پرتوی** اهمیت فراوان دارد.
- در روش ذرات مغناطیسی **شدت میدان ناکافی، جهت میدان نادرست، خطای اپراتور در شناسایی، ناهماهنگی میدان روی سطوح پیچیده** دارای بیشترین تأثیر هستند.
- در روش مایع نافذ، **خطای اپراتور در تشخیص نشستی**، دارای بیشترین اهمیت است.
- کنترل منظم تجهیزات، آموزش مستمر بازرسان و رعایت استانداردها** باعث کاهش قابل توجه ریسک ها می شود.
- استفاده از **فناوری های هوشمند و سامانه های پایش بلادرنگ** می تواند ایمنی و دقت در محیط های تولید هوشمند را ارتقا دهد.

۴- نتیجه گیری

ارزیابی ریسک آزمایش های غیرمخرب (NDT) در خطوط تولید هوشمند با استفاده از ماتریس ریسک و روش HAZOP نشان داد که در آزمایش فراصوتی (UT)، عوامل انسانی مانند خطای تفسیر و خستگی اپراتور و همچنین کالیبراسیون نادرست دستگاه، بیشترین تأثیر را بر دقت بازرسی دارند. در روش رادیوگرافی (RT)، ایمنی پرتویی، کیفیت تجهیزات تصویربرداری و تنظیمات منبع تابش از مهم ترین ریسک ها محسوب می شوند. برای آزمایش ذرات مغناطیسی (MT)، شدت و جهت میدان و عملکرد اپراتور، محور اصلی ریسک ها را تشکیل

می‌دهند. در آزمایش مایع نافذ (PT)، انتخاب نافذ مناسب، شرایط محیطی و خطای اپراتور مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر صحت نتایج هستند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در همه روش‌های آزمایش غیرمخرب، دو عامل اصلی «خطای انسانی و نقص تجهیزات» بیشترین تأثیر را در افزایش ریسک دارند. استفاده از فناوری‌های هوشمند، سامانه‌های پایش بلادرنگ و آموزش مستمر بازرسان می‌تواند به کاهش قابل توجه این ریسک‌ها در محیط‌های تولید هوشمند منجر شود.

استفاده از HAZOP امکان شناسایی علت‌ها، پیامدها و اقدامات کنترلی را فراهم می‌کند و راهکارهای پیشگیرانه و اصلاحی را پیشنهاد می‌دهد. ترکیب ماتریس ریسک و HAZOP، تحلیل جامعی از شدت، احتمال و سطح ریسک ارائه می‌کند و امکان اولویت‌بندی اقدامات کنترل را فراهم می‌سازد. کنترل فنی تجهیزات، آموزش و صلاحیت اپراتورها، و پایش مستمر فرایندها، مؤثرترین راهکار کاهش ریسک‌ها هستند. این رویکرد موجب افزایش قابلیت اطمینان، دقت بازرسی و ایمنی در خطوط تولید هوشمند می‌شود. در نهایت، استفاده همزمان از ماتریس ریسک و HAZOP، چارچوبی سیستماتیک برای مدیریت ریسک‌های NDT فراهم کرده و امکان بهبود مستمر فرایندهای بازرسی را تضمین می‌کند.

منابع

- 1-Van den Abeele, F., & Goes, P. (2012). Non-destructive testing techniques for risk-based inspection. International Journal of Sustainable Construction & Design, 2, 161–171.
<https://doi.org/10.21825/scad.v2i2.20512>
- 2-Gupta, M., Khan, M., Butola, R., & Singari, R. (2021). Advances in applications of non-destructive testing (NDT): A review. Advances in Materials and Processing Technologies, 8, 1–22.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>
- 3-Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., & Dewidar, M. (2025). Challenges and developments in wire arc additive manufacturing of steel: A review. Results in Engineering, 26, Article 104657.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104657>
- 4-Hardy, T., Arora, A., Pawlak-Kruczek, H., Rafajłowicz, W., Wietrzyk, J., Niedźwiecki, Ł., Vishwajeet, & Mościcki, K. (2021). Non-destructive diagnostic methods for fire-side corrosion risk assessment of industrial scale boilers burning low quality solid biofuels: A mini review. Energies, 14(21), 7132.
<https://doi.org/10.3390/en14217132>
- 5-Abdollahi-Mamoudan, F., Ibarra-Castaneda, C., & Maldague, X. P. V. (2025). Non-destructive testing and evaluation of hybrid and advanced structures: A comprehensive review of methods, applications, and emerging trends. Sensors, 25(12), 3635.
<https://doi.org/10.3390/s25123635>
- ۶-محمدیان، م.، احمدی، ع.، یاسری، م.، و کریمی، ع. (۱۴۰۳). کاربرد رویکرد ماتریس ریسک سه‌بعدی به‌منظور ارزیابی ریسک آسیب‌های شغلی در یک صنعت خودروسازی. فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، ۱۴(۲)، ۳۱۶–۳۳۳.
- ۷-ظفری، ح.، و زرین، ج. (۱۳۹۹). شناسایی و اولویت‌بندی مخاطرات و تهدیدات مبتنی بر الگوی ماتریس ریسک. فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۰(۱)، ۲۳–۳۷.
- 8-ISO 17640:2018- Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Techniques, testing levels, and assessment.
- 9-ISO 9712:2021- Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel.
- 10-ISO 22232-1:2020- Non-destructive testing — Characterization and verification of ultrasonic test equipment, Part 1: Instruments.
- 11-ISO 23279:2017-Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Characterization of discontinuities in welds.
- 12-ISO 22232-2:2020-Non-destructive testing — Characterization and verification of ultrasonic test equipment, Part 2: Probes.
- 13- ISO 17636-1:2022 Non-destructive testing of welds — Radiographic testing, Part 1: X- and gamma-ray techniques with film.
- 14- ISO 3999:2004 Radiation protection — Apparatus for industrial gamma radiography — Specifications for performance, design and tests.
- 15-ISO 17636-2:2022 Non-destructive testing of welds — Radiographic testing, Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors.

- 16- ASTM E94/E94M-17:2022-Standard Guide for Radiographic Examination Using Industrial Radiographic Film.
- 17- ASTM E2737-10(2018)-Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability.
- 18-ISO 16371-1:2011 Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates, Part 1: Classification of systems.
- 19-ISO 16371-2:2017 Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays.
- 20- ASTM E2698-18e1:2018-Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays.
- 21-ISO 19232-5:2018 Non-destructive testing — Image quality of radiographs, Part 5: Determination of the image unsharpness and basic spatial resolution value using duplex wire-type image quality indicators.
- 22- ISO 9934-1:2016 Non-destructive testing — Magnetic particle testing, Part 1: General principles.
- 23-ISO 9934-3:2015 Non-destructive testing — Magnetic particle testing, Part 3: Equipment.
- 24- ISO 9934-2:2015 Non-destructive testing — Magnetic particle testing, Part 2: Detection media.
- 25- ASTM E1444/E1444M-22a:2025-Standard Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace
- 26- ISO 3452-1:2021 Non-destructive testing — Penetrant testing, Part 1: General principles
- 27-ISO 3452-2:2021 Non-destructive testing — Penetrant testing, Part 2: Testing of penetrant materials
- 28-ISO 3452-5:2008- Non-destructive testing — Penetrant testing, Part 5: Penetrant testing at temperatures higher than 50 degrees C.
- 29-ISO 3059:2012 Non-destructive testing — Penetrant testing and magnetic particle testing — Viewing conditions.
- 30-ISO 3452-6:2008 Non-destructive testing — Penetrant testing, Part 6: Penetrant testing at temperatures lower than 10 degrees C.
- 31- ISO 19011:2018 Guidelines for auditing management systems.
- 32-BS EN 4179:2021 - Aerospace series. Qualification and approval of personnel for non-destructive testing.