

Contrast Enhancement for NDT Images of Turbine Blades by Means of X-ray/Neutron Radiography

Amir Movafeghi¹  | Behrouz Rokrok¹ | Effat Yahaghi² | Nafiseh Araghian¹ | Zeinab Naghshnejad¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. E-mail: amovafeghi@aeoi.org.ir
2. Department of Physics, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Article Information:

Research Article

Received 23 Dec. 2022

Revised 09 February 2023

Accepted 24 Feb. 2023

Keywords:

Nondestructive testing,
X-ray and neutron
Radiography,
turbine blades,
Gadolinium tagging,
Image processing,
Gaussian convolution.

ABSTRACT

Obstruction of turbine blade in different turbines can lead to dangerous accidents, and it is important to check these blades during construction and operation. Due to blockage of air channels, hot spots can lead to blade damage. In this research, X-ray and neutron radiography are used to examine the blades. Reviews of radiographs show that neutrons produce better images, and internal canals and defects are better seen in these images than X-ray images. It is worth emphasizing that neutron radiography with gadolinium tagging can determine the obstruction of blade and evaluate the density of ceramic materials inside the blade. Regarding neutron radiography with film, it can be emphasized that in addition to determining the obstruction of air ducts, the density of ceramic materials inside the ducts can also be evaluated. Also, by tagging with neutron absorbing materials, the contrast of the remaining materials from the ceramic muscle can be increased. Boron, indium and gadolinium can be named as important neutron absorbers. To improve the quality of neutron radiography images, Gadolinium is mainly used as a high neutron absorber. Although the contrast has increased in the reconstructed images, the reconstructed images from neutron radiography still show their superiority in showing the ducts and channel blockages. Different image processing methods can be implemented for the contrast enhancement. In this research, Gaussian convolution method is used to increase the contrast of the radiographs. Although contrast has increased in the reconstructed images by the Gaussian convolution method, the reconstructed images from neutron radiography show the blade structure and its channel blockages accurately. The opinion of radiography specialists also shows that the neutron radiography method gives 60% more information than the X-ray method, and the reconstructed images increased the contrast of the images between 10 to 20%.

Cite this article: Movafeghi, A., Rokrok, B., Yahaghi, E., Araghian, N., & Naghshnejad, Z. (2023). Contrast Enhancement for NDT Images of Turbine Blades by Means of X-ray/Neutron Radiography. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 39-48. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.398668.1119>

افزایش تباین تصاویر پرتونگاری در آزمون غیر مخرب پره‌های توربین با پرتوهای ایکس و نوترون

امیر موافقی^۱ | بهروز رک‌ک^۱ | عفت یاحقی^۲ | نفیسه عراقیان^۱ | زینب نقش نژاد^۱

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. رایانامه: ramovafeghi@aeoi.org.i
 ۲. گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

چکیده:

انسداد مجاری خنک‌سازی پره‌های توربین‌ها که در دمای بالا کار می‌کنند می‌تواند منجر به ایجاد نقاط داغ و خرابی و نهایتاً حوادث خطرناکی شود. یکی از عوامل گرفتگی باقی‌ماندن قطعات ماهیچه در حین ریخته‌گری است و بنابراین بررسی این مجاری در حین ساخت و بهره‌برداری اهمیت دارند. معمولاً از آزمون‌های غیرمخرب پرتونگاری ایکس و نوترون برای بررسی مجراها استفاده می‌شود. تصاویر پرتونگاری نوترون تباین بهتری به دلیل سبک بودن جنس ماهیچه ایجاد می‌کنند؛ اما منابع نوترونی کمتر در دسترس هستند. تصاویر ایکس تباین کمتری حاصل می‌کنند. در این تحقیق برای افزایش تباین تصاویر پرتونگاری از روش کانولوشن گوسی استفاده شده است. بررسی رادیوگراف‌ها نشان می‌دهد که نوترون‌ها تصاویر بهتری را ایجاد کرده‌اند و کانال و مجاری داخلی در این تصاویر بهتر از تصاویر پرتونگاری ایکس دیده می‌شوند. لازم به ذکر است در پرتونگاری نوترونی با فیلم علاوه بر مشخص شدن انسداد مجاری، چگالی مواد سرامیکی داخل مجرا نیز قابل‌ارزیابی است. در خصوص پرتونگاری نوترونی با فیلم قابل تأکید است که علاوه بر مشخص شدن انسداد مجاری، چگالی مواد سرامیکی داخل مجرا نیز قابل‌ارزیابی است. همچنین با استفاده از نشانه‌گذاری با مواد جاذب نوترون می‌توان تباین مواد باقیمانده از ماهیچه سرامیکی را افزایش داد. از جمله جاذب‌های مهم نوترونی می‌توان به بور، ایندیم و گادولینیوم اشاره کرد. برای بهبود کیفیت تصاویر پرتونگاری نوترونی عمدتاً از گادولینیوم به‌عنوان جاذب بالای نوترونی استفاده می‌شود. هرچند در تصاویر بازسازی‌شده تباین افزایش پیدا کرده؛ ولی همچنان تصاویر بازسازی‌شده از پرتونگاری نوترونی برتری خود را در نشان‌دادن دقیق‌تر مجاری و گرفتگی کانال‌ها نشان می‌دهند. نظر متخصصین رادیوگرافی نیز نشان می‌دهد که روش پرتونگاری نوترونی ۶۰٪ اطلاعات بیشتری نسبت به روش ایکس از این پرها می‌دهد و پردازش تصاویر بازسازی‌شده نیز ۱۰ تا ۲۰٪ وضوح تصاویر بالا می‌برند.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۲/۰۵

کلیدواژگان:

آزمون‌های غیرمخرب،
 پرتونگاری صنعتی ایکس و
 پرتونگاری نوترون،
 نشانه‌گذاری گادولینیوم،
 پره توربین،
 پردازش تصویر،
 کانولوشن گوسی

استناد: موافقی، امیر؛ رک، بهروز؛ یاحقی، عفت؛ عراقیان، نفیسه؛ و نقش نژاد، زینب. (۱۴۰۱). افزایش تباین تصاویر پرتونگاری در آزمون غیر مخرب پره‌های توربین با پرتوهای ایکس و نوترون. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۲)، ۳۹-۴۸.
<http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.398668.1119>

۱- مقدمه

پره توربین بخش مهمی از یک توربین گازی یا توربین بخار را تشکیل می‌دهد. این تیغه‌ها وظیفه استخراج انرژی تولیدی توسط احتراق بالا را دارند و در دما و فشار بالا کار می‌کنند. عملکرد صحیح این پره‌های بسیار اهمیت دارد و بیشترین محدودیت را در توربین‌های گازی ایجاد می‌کنند [۱-۲]. با توجه به فشار و دمای بالا، پره‌های توربین با روش‌های مختلف سرمایه‌ش داخلی و خارجی و پوشش‌های حرارتی خنک می‌شوند. خسستگی مهم‌ترین عامل خرابی توربین‌های بخار و توربین‌های گازی است که ناشی از تنش به وجود آمده از دما، فشار، لرزش و صوت در پره‌های توربین است [۳-۵]. پره‌های توربین در اطراف قالب و ماهیچه‌های سرامیکی ریخته می‌شوند و کلنال‌های خنک‌کننده‌ای را تشکیل می‌دهند که با گردش هوا از ذوب‌شدن تیغه‌ها در مواجهه با دماهای بالای محیط کاری خود جلوگیری می‌کند. ممکن است، این کلنال‌های خنک‌کننده در هنگام تولید یا پس از تولید اولیه به خوبی تخلیه نشوند و با قطعات سرامیکی مسدود شوند یا مسدود شده باشند. مخصوصاً در پره‌های با سایز کوچک احتمال وقوع این اتفاق بیشتر است. چنین پره‌ای که کانال‌های خنک‌کننده آن مسدود شده در حین کار ممکن است شکسته یا حتی ذوب شود. آسیب تیغه به طور مؤثری به توربین آسیب می‌زند، بنابراین پره‌های توربین باید با دقت طراحی شوند تا در برابر شرایط دمای بالا، فشار زیاد و تنش مقاومت کنند. امروزه استفاده از ابرآلیاژهای ترکیبی با نیکل کروم، کبالت و رنیوم و پوشش محافظ حرارتی (TBC) برای بالابردن مقاومت پره‌ها معمول شده است [۶-۸].

همچنین در ساخت پره‌های توربین از کامپوزیت‌های سرامیکی (CMC)، که الیافی از سرامیک مشتق شده از پلیمر هستند، نیز استفاده می‌شوند. مهم‌ترین مزیت CMC نسبت به سوپراآلیاژهای معمولی، وزن سبک و قابلیت تحمل دمای بالاتر است. کامپوزیت‌های سیلیکون کاربید-سیلیکون کاربید (SiC-SiC matrix composite) متشکل از سیلیکون تقویت شده توسط الیاف کاربید سیلیکون ساخته می‌شوند که آنها در برابر دمای ۱۰۰-۲۰۰ درجه سلسیوس بالاتر از آلیاژهای نیکل است [۹].

در پره‌ها علاوه بر ترک و آسیب‌های ناشی از تنش و فشار، خوردگی در دمای بالا به علت تماس با گاز داغ دارای آلاینده‌های ایجاد می‌شود. برای اطمینان از سالم بودن پره‌ها، استفاده از آزمون‌های غیر مخرب پرتونگاری ایکس و نوترون معمول است تا انسداد و آسیب‌های درونی پره‌ها مورد بررسی قرار گیرد. چنین نقص‌هایی باید با اطمینان ۱۰۰٪ شناسایی شوند [۱۰-۱۱].

پرتونگاری نوترونی از ماهیچه‌های سرامیکی مورد استفاده در ریخته‌گری به دلیل جذب نوترون (سطح مقطع بزرگ جذب نوترون)، می‌تواند برتری منحصر به فردی نسبت به پرتونگاری ایکس و گاما داشته باشند. همچنین با استفاده از نشانه گذاری با مواد جاذب نوترون می‌توان تباین مواد باقیمانده از ماهیچه سرامیکی را افزایش داد. از جمله جاذب‌های مهم نوترونی می‌توان به بور، ایندیم و گادولینیوم اشاره کرد. گادولینیوم و سایر جاذب‌های نوترون به دلیل تمایل به جذب نوترون‌ها نسبت به تصویربرداری نوترون بسیار مات هستند؛ بنابراین به ابزاری قدرتمند برای بسیاری از کاربردهای پرتونگاری نوترونی، مانند تضمین کیفیت پره‌های توربین تبدیل می‌شوند. یافتن ترک‌ها، ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های تنش‌ی در قطعات ساخته شده و بازرسی میله‌های سوخت هسته‌ای مصرف شده از جمله این کاربردها هستند [۱۱-۱۸].

یکی از مفیدترین کاربردهای نشانگر گادولینیوم در پرتونگاری نوترونی در بازرسی پره‌های توربین است. پره‌های توربین از ریختن فلزات سبکی که نقطه ذوبشان کمتر از دمای محیط عملیاتی آنهاست درست می‌شود. در ساخت آنها باید کانال‌های خنک‌کننده هوا بررسی شود تا از شکستن یا ذوب‌شدن آنها جلوگیری شود. اگر قطعاتی از قالب سرامیکی در کانال‌های خنک‌کننده و تیغه باقی بماند، تیغه از کار می‌افتد و خطر آسیب جدی به توربین‌های جت هواپیما، خلبان و مسافران آن می‌شود و یا خرابی توربین‌های مولد انرژی با خسارت‌های مادی بزرگ را همراه خواهد شد [۲-۳].

جاذب‌های نوترون نقش مهمی در کمک به سازندگان پره‌های توربین برای ریشه‌یابی این عیوب دارند. در هر دو روش پرتونگاری نوترونی و پرتونگاری ایکس، فلز سبک پره‌های توربین و قطعات سرامیکی دارای سطح مقطع



شکل (۱) تصویر یک پره توربین

در شکل ۲ نمایی از چیدمان مجموعه برای پرتونگاری ایکس نشان داده شده است. برای تهیه تصاویر پرتونگاری ایکس از یک دستگاه مولد اشعه ایکس با ولتاژ متغیر در محدوده ۱۰۰ تا ۲۲۰ کیلوولت و جریان حدود ۵/۰ تا ۳ میلی آمپر استفاده شده است. ماهیچه روی صفحه تصویرساز IP^۲ قرار گرفته و تصویربرداری با روش پرتونگاری رایانه‌ای CR^۳ انجام شده است. برای این پرتونگاری ولتاژ دستگاه ۱۳۰ کیلو ولت، جریان ۰/۶ میلی آمپر و زمان ۲ دقیقه بوده است. زیر صفحات IP صفحه سربی قرار گرفته تا پس پراکندگی پرتو از سطح زمین بر روی تصویر به حداقل برسد. از اسکنر لیزر مخصوص برای اسکن صفحات IP استفاده شده که دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰ میکرومتری است. در کلیه آزمایش‌های پرتونگاری الزامات استاندارد پرتونگاری دیجیتال مطابق با ISO-17636 رعایت شده است [۲۱].

مشابهی هستند، به این معنی که تباین بین آنها را نمی‌توان به راحتی تشخیص داد. با این حال، از آنجایی که گادولینیوم در برابر تشعشعات نوترونی مات است، نواحی غنی از گادولینیوم در تصویر نوترونی به صورت نقاط روشن بسیار قابل توجهی نشان داده می‌شوند [۱].

در این تحقیق نمونه‌هایی از پره‌های توربین با دو روش پرتونگاری ایکس و نوترون بررسی شده و نتایج حاصل از آن‌ها ارزیابی می‌شود. در تهیه تصاویر نوترونی از روش برجسب‌گذاری گادولینیوم استفاده شده است.

۲- روش‌ها

۲-۱ تصاویر پرتونگاری

برای این تحقیق از تصاویر پرتونگاری ایکس و نوترون سایت فونیکس^۱ و تصاویر تهیه شده در آزمایشگاه آزمون‌های غیر مخرب سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شده است. برای تهیه تصاویر نوترونی از یک شتابدهنده نوترونی استفاده شده است [۱۳]. با توجه به طول بزرگتر بیم خروجی و شار نوترونی بالاتر در راکتورها، کیفیت پرتونگاری نوترونی در راکتورهای تحقیقاتی معمولاً بهتر است. به عنوان مثال، خروجی بیم لاین نوترون پرتونگاری راکتور تهران که کلاس ۱ استاندارد ASTM را فراهم می‌سازد مشخصات بهتری را نسبت به شتابدهنده‌های نوترونی دارد. [۲۰-۱۹] تصاویر ایکس نیز با انرژی‌های مختلف توسط یک تیوپ اشعه ایکس تهیه شده است. در شکل ۱ نمونه ای از یک پره توربین نشان داده شده است. سوراخ‌ها در لبه مشخص هستند و با پیکان نشان داده شده‌اند. قسمت شیاردار نیز به محور توربین متصل است.

³ Computed Radiography

¹ www.phoenixwi.com

² Image Plate

۲-۳ پردازش تصاویر رادیوگرافی

علاوه بر گادولینیوم که فقط در تصویربرداری نوترونی قابل استفاده است روش‌های پردازش تصویر می‌توانند باعث بهبود تباین تصاویر پرتونگاری و شناسایی بهتر عیوب شوند. در این تحقیق از روش صافی گوسین مکانی برای پردازش تصاویر استفاده شده است تا با بهبود تباین تصاویر نواحی آسیب برای دو روش پرتونگاری نوترونی و پرتونگاری ایکس بهتر ارزیابی شوند. برای اعمال صافی گوسی می‌توان از دو حوزه مکانی و فرکانسی بهره برد. یکی از روش‌های معمول برای اعمال صافی گوسین در حوزه مکانی، استفاده روش کانولوشن است. به‌طور کلی برای اعمال صافی گوسی در حوزه مکانی از رابطه کانولوشن مقابل استفاده می‌شود [۲۲-۲۳]:

علاوه بر گادولینیوم که فقط در تصویربرداری نوترونی قابل استفاده است روش‌های پردازش تصویر می‌توانند باعث بهبود تباین تصاویر پرتونگاری و شناسایی بهتر عیوب شوند. در این تحقیق از روش صافی گوسین مکانی برای پردازش تصاویر استفاده شده است تا با بهبود تباین تصاویر نواحی آسیب برای دو روش نوترون پرتونگاری و ایکس پرتونگاری بهتر ارزیابی شوند. برای اعمال صافی گوسی می‌توان از دو حوزه مکانی و فرکانسی بهره برد. یکی از روش معمول برای اعمال صافی گوسین در حوزه مکانی، استفاده روش کانولوشن است. به‌طور کلی برای اعمال صافی گوسی در حوزه مکانی از رابطه کانولوشن مقابل استفاده می‌شود [۲۲-۲۳]:

$$u(x) = (G\sigma * f)(x) = \int_{R^d} G_\sigma(x-y)f(y)dy \quad (1)$$

که در آن f سیگنال ورودی است، u سیگنال پردازش شده، و G_σ تابع صافی گاوسی با انحراف استاندارد σ است [۱۷] که دارای رابطه زیر است:

$$G\sigma = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{d}{2}} \exp\left(-\frac{\|x\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

در این صافی سه پارامتر σ ، تکرار و اندازه پنجره انتخابی برای کانولوشن در تصاویر خروجی تاثیر دارند. افزایش σ در این الگوریتم باعث صاف‌تر شدن تصویر و از بین رفتن لبه‌های آن می‌شود. با افزایش پنجره تباین و همچنین با تکرار الگوریتم،



شکل ۲) چیدمان برای پرتونگاری ایکس

۲-۲ روش نشانه گذاری گادولینیوم

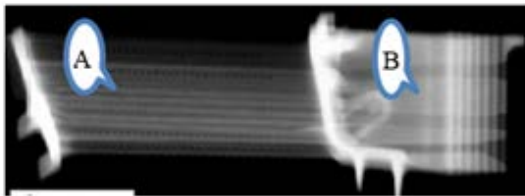
گادولینیوم می‌تواند برای نشانه‌گذاری سرامیک موجود در تیغه توربین استفاده شود و آن را به وضوح بر روی رادیوگراف نوترونی قابل مشاهده کند. قسمت‌هایی که باید تصویربرداری شوند با سوسپانسیونی از ذرات گادولینیوم در آب یا الکل شسته می‌شوند، سپس قبل از اینکه تمیز شوند برای چند دقیقه در محلول باقی می‌مانند. در حالی که قطعه آغشته به محلول است، محلول گادولینیوم به ساختار متخلخل قطعات سرامیکی نفوذ می‌کند و حتی پس از شسته شدن نیز بقیه گادولینیوم در آنجا باقی می‌ماند. پس از تصویربرداری از قطعه، قطعات سرامیکی غنی از گادولینیوم در تباین کامل با مواد اطراف ظاهر می‌شوند [۱۶-۱۸].

برچسب گذاری گادولینیوم، پرتونگاری نوترونی را به یک روش تضمین کیفیت ضروری برای سازندگان پره‌های توربین تبدیل می‌کند، زیرا این روش مطمئن‌ترین راه برای تشخیص این عیوب خطرناک است که می‌تواند در محصول آنها ظاهر شود؛ بنابراین، سازندگان پره‌های توربین کاملاً به خدمات پرتونگاری نوترونی برای ریشه‌یابی این عیوب / مشکلات نیاز دارند.

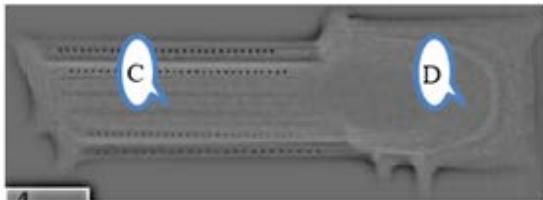
از آنجایی که کاربرد برچسب گادولینیوم در درجه اول به ترکیب متخلخل و اسفنجی مواد سرامیکی متکی است، موارد استفاده از آن به چند محصول خاص مانند پره‌های توربین و سایر قطعاتی که در قالب‌های سرامیکی ریخته می‌شوند، محدود شده است.



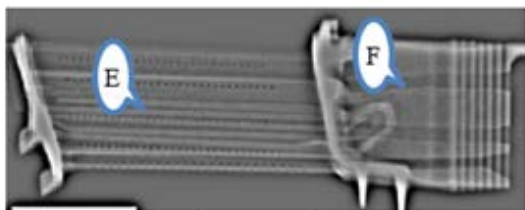
الف



ب



ج



د

شکل ۳ الف- تصویر رادیوگرافی ایکس ب- تصویر نوترون ج- و د تصاویر بازسازی شده شکل ۳- الف و ب با روش کانولوشن گوسی

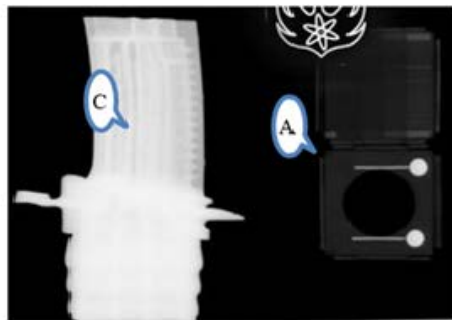
در شکل ۴ الف و ب پرتونگاری ایکس و نوترونی یک پره دیگر همراه با IQIهای نوترونی SI و BPI نشان داده شده است [۲۴-۲۶]. در تصاویر ۴- الف و ب استوانه‌های سربی و میله‌های کادمیومی بطور کامل مشخص است ولی ضخامت‌های متفاوت پله‌ها در تصویر رادیوگراف نوترونی به دلیل جنس پلی اتیلنی ماده IQI کاملاً قابل تشخیص است (نشانگر B) در تصویر ایکس قابل تفکیک نیستند (نشانگر A). مجاری و شکل تیغه‌ای پره‌ها در تصویر نوترونی مشخص است (نشانگر D) ولی در تصویر ایکس هاله‌ای از آنها دیده

تصویر تغییر کرده و با تغییر شدت روشنایی در لبه‌ها، تصویر مات‌تر می‌شود. کیفیت تصاویر در محیط برنامه نویسی MATLAB و با استفاده از پردازنده core-i9 با 16 Gbyte حافظه دینامیکی صورت گرفته است.

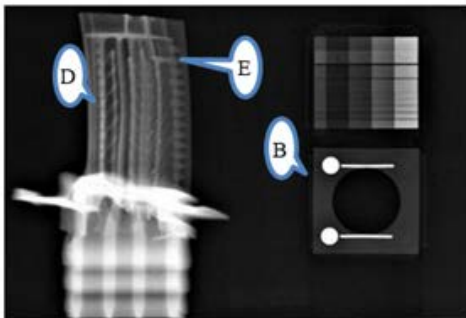
۳- نتایج

در بازرسی پره‌های توربین موتور جت (سری اول و دوم تصاویر پرتونگاری نوترونی) هدف بررسی کانال‌ها و سوراخ‌های پره‌هاست تا گرفتگی و انسداد نداشته باشند. برای این هدف از آزمون پرتونگاری با نوترون و ایکس استفاده می‌شود. در شکل ۳ تصاویر پرتونگاری ایکس و نوترون نشان داده شده‌اند. تصویر اشعه ایکس (۳-الف) نمی‌تواند کانال‌های خنک کننده را در تیغه‌ها به وضوح نشان دهد (نشانگر A) ولی در تصویر (۳-ب) کانال‌ها و مجاری انتقال گاز بسیار واضح‌تر نشان داده می‌شوند. در این تصویر ساختار توربین نیز مشخص‌تر دیده می‌شود (نشانگر B). در تصویر ایکس کانال‌ها ناواضح است (نشانگر A) و ساختار شیارها مشخص نیست (نشانگر B). در دو تصویر ۳-ج و د تصاویر بازسازی شده دو شکل ۳- الف و ب نشان داده شده است. این دو تصویر با روش کانولوشن گوسی و انحراف معیار یک و اندازه پنجره ۴۰ در ۴۰ و تعداد تکرار ۴۰ انجام شده است. برای بدست آوردن کنتراست مناسب روش حذف زمینه استفاده شده و تصویر مات شده از تصویر رادیوگرافی اصلی کم شده است. مقایسه تصاویر بازسازی شده و پرتونگاره‌های اصلی ایکس و نوترون نشان می‌دهد که تصاویر بازسازی شده بخاطر کم شدن مات شدگی و بالا رفتن کنتراست، ساختار قطعه را در نواحی مختلف بهتر نشان می‌دهند. کلنال‌ها در تصویر بازسازی شده ایکس کمی بهتر از تصویر رادیوگراف اصلی دیده می‌شوند (نشانگر C) ولی در ناحیه شیار اطلاعات خاصی دیده نمی‌شود و همچنان تصویر ناواضح است (نشانگر D). در تصویر بازسازی شده نوترونی (شکل ۳-د) کانال‌ها کاملاً واضح شده‌اند (نشانگر E) و اثری از گرفتگی و انسداد در آنها دیده نمی‌شود و شیارها نیز کاملاً مشخص هستند (نشانگر F) و بهتر از پرتونگاری شکل ۳-ب دیده می‌شوند

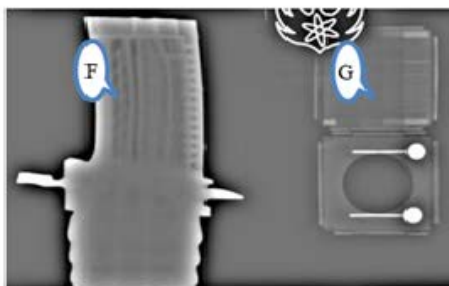
¹ Sensitivity Indicator and Beam Purity Indicator



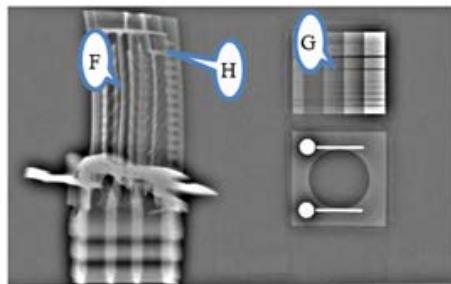
الف



ب



ج



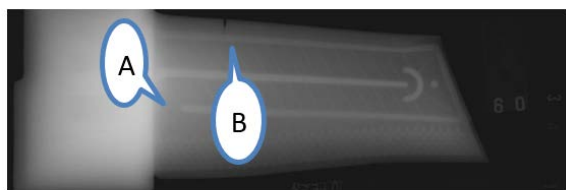
د

شکل ۴) الف- تصویر پرتونگاری ایکس ب- تصویر نوترون ج- و د تصاویر بازسازی شده شکل ۳- الف و ب با روش کانولوشن گوسی

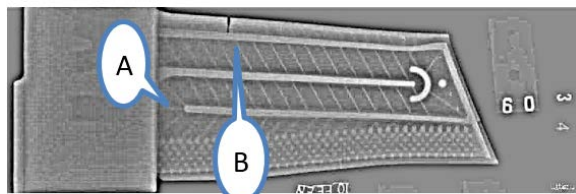
می‌شود (نشانگر C). در تصاویر بازسازی شده (شکل‌های ۴-ج و د) لبه‌ها واضح‌تر شده و تفاوت اجزا بهتر دیده می‌شوند. در نشانگر E انسداد مسیر روی تصویر در پره نشان داده شده است. در تصویر نوترونی (شکل ۴-د) علاوه بر کانال‌ها، مسیرهای مورب نیز بخوبی قابل تشخیص هستند (نشانگر F) و تفاوت روشنایی در پله‌های پلی‌اتیلنی نیز بهتر دیده می‌شوند (نشانگر G). ناحیه انسداد نیز در تصویر بازسازی شده بهتر دیده می‌شود (نشانگر H).

در شکل ۵-الف پرتونگاری یک قسمت از پره توربین با گادولونیم دیده می‌شود. به علت جذب گادولونیم که سطح مقطع جذب نوترونی بالا دارد، سرامیک بجا مانده در هنگام ساخت در کانال‌ها و مسیرهای گرفتگی کاملاً مشخص هستند و تمام کانال‌ها گرفتگی دارند (نشانگرهای A تا C) و حتی تراکم سرامیک کانال‌ها نیز قابل ارزیابی است. در محل نشانگر C تراکم خیلی کم است و گرفتگی جزئی است ولی در محل نشانگر B قسمت بزرگی از کانال گرفتگی دارد. تصویر بازسازی شده با روش کانولوشن گوسی در شکل ۵-ب مسیرهای انسداد را واضح‌تر نشان می‌دهد و تراکم ماده در قسمت‌های مختلف بهتر دیده می‌شود. شیارهای مورب نیز در این شکل بهتر دیده می‌شوند (نشانگر D).

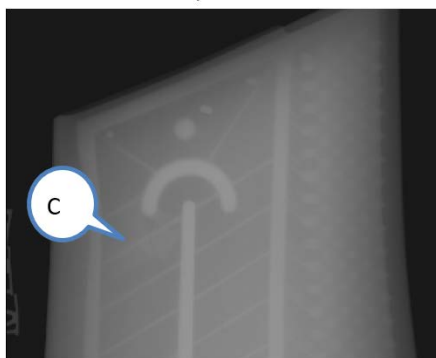
در شکل ۶ (سری سوم تصاویر پرتونگاری نوترونی) تصاویر الف و ج پرتونگاری دو پره توربین گازی مولد انرژی را نشان می‌دهد که با روش ایکس تصویربرداری شده‌اند. تصاویر این دو پره در آزمایشگاه آزمون‌های غیرمخرب سازمان انرژی اتمی تهیه شده‌اند. در شکل ۶-الف هر چند که ساختار کانال‌ها در تصاویر مشخص است (نشانگر A) ولی نواحی آسیب (نشانگر B) و حرف سربی کنار پره واضح نیستند. برای بهبود تباین، صافی کانولوشن گوسی اعمال شده، در تصویر بازسازی شده شکل ۶-ب کانال‌ها (نشانگر A) واضح دیده می‌شوند و ناحیه آسیب (نشانگر B) و پلاک کاملاً واضح هستند. در شکل ۶-ج پوسیدگی لایه‌ای (نشانگر C) روی پره بسختی دیده می‌شود و در شکل ۶-د در تصویر بازسازی شده این ناحیه کاملاً مشخص شده و ابعاد آن قابل بررسی است.



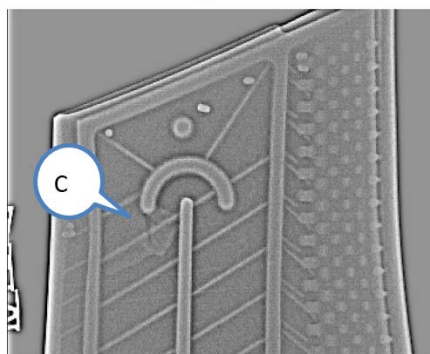
الف



ب



ج

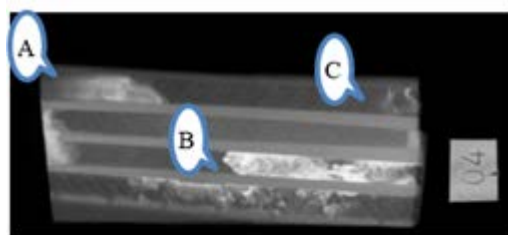


د

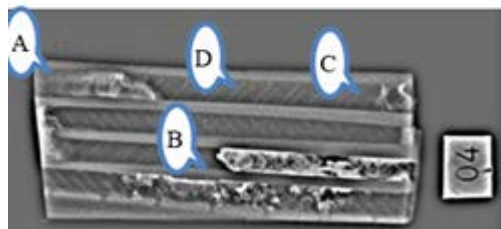
شکل ۶) الف و ج- پرتونگاری ایکس ری قسمت‌هایی از پره توربین ، ب و د- تصویر بازسازی شده آن با روش کانولوشن گوسی

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پرتونگاری ایکس و نوترون برای ۱۰ پره توربین‌های جت و مولد انرژی مورد بررسی قرار گرفته است تا آسیب‌های درونی و گرفتگی‌های کانال‌ها شناسایی شوند. برای بهتر شدن تباین تصاویر از روش کانولوشن گوسی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پرتونگاری



الف



ب

شکل ۵) الف- پرتونگاری نوترون یک قسمت از پره توربین با گادولونیم ، ب- تصویر بازسازی شده آن با روش کانولوشن گوسی

برای ارزیابی نتایج از ۴ متخصص در زمینه پرتونگاری استفاده شد. نواحی IQI ، شیارها، کانال‌ها و نواحی جذب گادولونیم توسط سرامیک برای مشخص شدن گرفتگی توسط آنها ارزیابی شد. تعداد تصاویر پرتونگاری پره‌های برای ایکس ۸ و برای نوترون ۱۰ عدد بوده‌اند. متوسط امتیازات داده شده توسط آنها بین ۱ تا ۱۰۰ در جدول ۱ آورده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نشان می‌دهد که قابلیت روش پرتونگاری نوترون برای این پره‌ها به علت مواد با عدد اتمی پایین بسیار بالاتر از پرتونگاری ایکس است. برای تمام نواحی تصاویر پرتونگاری نوترونی اطلاعات بیشتری را به متخصصان داده و مورد تأیید آنها بوده است. برای نواحی جذب گادولونیم توسط سرامیک تصاویر پرتونگاری ایکس تهیه نشده و در ارزیابی عددی در جدول به آنها اختصاص داده نشده است. از نظر متخصصین استفاده از روش کانولوشن گوسی برای بهتر کردن لبه‌ها و افزایش تباین مناسب بوده است و نواحی گرفتگی و تراکم مواد در تصاویر بازسازی شده بهتر دیده می‌شوند. از نظر متخصصین ساختار و پره‌ها و سوراخ‌های روی آنها نیز در تصاویر بازسازی شده مشخص تر هستند.

- corrosion influence on deformation and damage mechanisms in turbine blades made of IN-792 during service. *Eng. Fail. Anal.*, 96, 118–129.
- [6] Nagabandi K., Pujari A.K., Iyer D.S. (2020). Thermo-mechanical assessment of gas turbine combustor tile using locally varying thermal barrier coating thickness. *Appl. Therm. Eng.*, 179, 115657.
- [7] Wee S.; Do J.; Kim, K.; Lee C.; Seok C.; Choi B.-G.; Choi Y.; Kim, W. (2020). Review on Mechanical Thermal Properties of Superalloys and Thermal Barrier Coating Used in Gas Turbines. *Appl. Sci.*, 10, 5476.
- [8] Peters B.M.; Leyens C.; Schulz U.; Kaysser W.A. EB-PVD (2001). Thermal Barrier Coatings for Aeroengines and Gas Turbines. *Adv. Eng. Mater.*, 3, 193–204.
- [9] Russell J. Ch. H., Henager Ch. H. (2020). Influence of long-term thermal aging on the microstructural and tensile properties of all-oxide ceramic matrix composites, *Ceramics International* 46(9), DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.02.198
- [10] Liu H., Pei Ch., Yang J., , Yang Zh. (2020). Influence of long-term thermal aging on the microstructural and tensile properties of all-oxide ceramic matrix composites, *Ceramics International*, 46(9), DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.02.198
- [11] Carter T.J. (2005). Common failures in gas turbine blades. *Eng. Fail. Anal.* 12, 237–247.
- [12] Hou J.; Wicks, B.J., Antoniou R.A. (2002). An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis. *Eng. Fail. Anal.*, 9, 201–211.
- [13] <https://www.phoenixneutronimaging.com/aerospace>
- [14] Muralidhar S., Lukose N. and Subramanian M. P. (2006). Evaluation of turbine blades using computed tomography, in *Proceedings of the National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Hyderabad, India, December.
- [15] Fantidis J. G., Potolias C., and Bandekas D. V. (2011). Wind Turbine Blade Nondestructive Testing with a Transportable Radiography System, *Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations*, Article ID 347320, 6 pages doi:10.1155/2011/347320.
- [16] Sim Ch. M., Oh H. S., Kim T., Lee Y. S., Kim Y. K., Kwak S. S., Hwang Y. Ha. (2014). Detecting Internal Hot Corrosion of In-service Turbine Blades Using Neutron Tomography with Gd Tagging, *J Nondestruct Eval* 33:493–503, DOI:10.1007/s10921-014-0244-x.

نوترونی نسبت به پرتونگاری ایکس در خصوص گرفتنی کانال‌ها، سوراخ‌ها و آسیب‌های داخلی اطلاعات مناسبی را فراهم می‌کند. استفاده از روش کانولوشن گوسی نیز در وضوح لبه‌ها در نواحی داخلی کارا بوده و سبب افزایش تباین تصاویر شده است. در تصاویر بازسازی شده برای پرتونگاری با تزریق گادولونیم می‌توان تراکم جاملنده در پره را به خوبی بررسی کرد. ارزیابی نتایج توسط متخصصین، بهبود اطلاعات استخراج شده در نواحی مختلف مانند IQI و کانال‌ها را تأیید می‌کند.

جدول ۱. نتایج ارزیابی تصاویر بوسیله متخصصین

ناحیه	تصویر اصلی	تصویر اصلی پرتونگاری	تصویر بازسازی شده	تصویر بازسازی شده ایکس
IQI	٪۹۵	٪۱۰	٪۹۷	٪۱۵
شیارهای مورب	٪۷۵	٪۱۰	٪۹۰	٪۲۰
کانال‌ها	٪۶۷	٪۳۰	٪۹۵	٪۳۰
سرامیک و گادولونیم	٪۹۰	-	٪۹۵	-

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع^۱

- [1] Shahani A. R., Esmailpoor Hajilak Z. (2018). Simulation of crack growth rate in T56 jet engine compressor blade using Raju -Newman method, *Modares Mechanical Engineering*, 17(11), 21 -30, (in Persian)
- [2] Witek L. (2011). Crack propagation analysis of mechanically damaged compressor blades subjected to high cycle fatigue, *Engineering Failure Analysis*, 18 (4), 223 -1232.
- [3] Hu D., Wang R. (2013). Combined fatigue experiments on full scale turbine components, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 85 (1), 4 -9.
- [4] Skamniotis, C.; Courtis M., Cocks A.C.F. (2021). Multiscale analysis of thermomechanical stresses in double wall transpiration cooling systems for gas turbine blades. *Int. J. Mech. Sci.*, 207.
- [5] Kanesund J.; Brodin H.; Johansson S. (2018). Hot

¹ References

- [17] Sim Ch. M., Kim Y. K., Kim T., Lee K. H., Kim J. U. (2009) Detection of hidden shot balls in a gas-cooled turbine blade with gadolinium tagging method, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 605 175–178
- [18] BINDT, Neutron imaging: past, present and future, British Institute for NDT, December 2019, <https://www.bindt.org/News/December-2019/neutron-imaging-past-present-and-future/> retrieved 16 May 2023
- [۱۹] ا. موافقی، م. چوپان دستجردی، ب. رکرک، ع. یاحقی، ع. نگهدارزاده، ا. کشاورز خانی و آ. ضیا آبادی، "استفاده از روش نوترون رادیوگرافی برای تشخیص نقوش و آسیب‌های کوزه باستانی سمیران در راکتور تحقیقاتی تهران"، مجله تابش و فناوری هسته‌ای، صفحه ۲۲-۳۰، دوره ۴، شماره ۴، اسفند ۱۳۹۶
- [۲۰] ن. عراقیان، ا. موافقی، ب. رکرک، م. منصوری، ز. نقش نژاد و م. فرض مهدی، "بررسی تأثیر هندسه داده‌برداری و روش بازسازی بر تصاویر مقطع‌نگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران"، دوره ۴۴، شماره ۲، تیر ۱۴۰۲، صفحه ۱-۱۲
- [21] ISO standard, (2013). ISO 17636-2, Non-destructive testing of welds Radiographic testing-Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors,
- [22] Getreuer P. (2013). A survey of Gaussian convolution algorithms, *Image Processing On Line*, 286-310, 2013.
- [23] M. Basu, Gaussian-based edge-detection methods-a survey, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 32, no. 3, pp. 252-260, 2002.
- [24] ASTM, (2019). ASTM E748-19, Standard Guide for Thermal Neutron Radiography of Materials,
- [25] ASTM (2020). ASTM E2003-20, Standard Practice for Fabrication of the Neutron Radiographic Beam Purity Indicators,
- [26] ASTM, (2019). ASTM E2023-19, Standard Practice for Fabrication of Neutron Radiographic Sensitivity Indicators.