

Nondestructive Evaluation of Gas Turbine Blade Cooling Holes Blockage by Thermography

Ali Mohammad Kolagar¹, Mohammad Cheraghzadeh¹, Davood Akbari^{2*}, Mohammadreza Farahani³

1- Master of Material Science & Engineering, MavadKaran Engineering Company, Mapna Group, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Mechanical Engineering, Tarbiat modares University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

* daakbari@modares.ac.ir

Abstract

Turbine blades are one of the most sensitive and important hot parts of gas turbines, so that the efficiency and life of turbines are directly related to the operation of these components. Therefore, to prevent damage caused by high temperatures, they must be properly cooled. The common method of cooling these parts is to pass the cooling fluid through their complex internal channels. Nondestructive testing of thermography, is one of the new methods for detecting imperfections in these cooling paths which is considered in this article. Thermal loading is applied in an active manner by hot steam generator system. In order to identify the capability of this system in the detection of the residuals in the cooling system of blades, 3 kinds of different blades are studied and tested using active thermography. Results show the appropriateness of the system in detection of the blockages in all three blades. But it worth to notify that the success of the system is strongly related to the best detection of the system parameters as steam pressure, temperature and Fluid flow. So, the best parameters are chosen as: pressure of 2bars, ambient temperature of 25 °C and the maximum fluid of the hot steam.

Keywords: Nondestructive Evaluation, Thermography, Gas Turbine Blade.

ارزیابی غیرمخرب کانال‌های خنک‌کاری پره توربین گاز با استفاده از روش دمانگاری فروسرخ

علی محمد کلاگر^۱، محمد چراغزاده^۱، داود اکبری^{۲*}، محمدرضا فراهانی^۳

۱- کارشناس ارشد متالورژی، شرکت مهندسی مواد کاران، گروه مپنا، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

* daakbari@modares.ac.ir

چکیده

پره‌های توربین از حساس‌ترین و مهمترین قطعات داغ توربین گاز به شمار می‌روند به طوری که کارایی و عمر توربین‌ها به طور مستقیم با کارکرد این اجزا مرتبط است. لذا برای جلوگیری از تخریب ناشی از دمای بالا، بایستی به شیوه مناسب خنک‌کاری شوند. روش متداول خنک‌کاری پره‌ها، هدایت سیال خنک‌کننده از کانال‌های پیچیده داخلی آنها بوده که در مراحل اولیه ساخت به روش ماهیچه‌گذاری ایجاد می‌گردند. در فرایند تخلیه ماهیچه‌های سرامیکی گاهی ذرات سرامیکی بطور کامل از کانال‌های خنک‌کاری تخلیه نشده و بخشی از این ذرات در داخل پره‌ها محبوس و موجب انسداد کانال می‌گردد. این موضوع عملکرد پره‌ها و در نتیجه عمر مفید آنها را کاهش می‌دهد. در این مقاله، انسداد کانال‌های خنک‌کاری داخلی پره‌ها با استفاده از روش غیرمخرب دمانگاری فروسرخ برای تعدادی از پره‌های توربین گاز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا پس از آماده‌سازی چیدمان آزمون دمانگاری فعال با بخار داغ، نتایج دمایی در زمان‌های مختلف و با درصد‌های انسداد متفاوت که بطور مصنوعی در کانال‌های خنک‌کاری این پره‌ها ایجاد شده، اخذ و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش غیرمخرب دمانگاری فروسرخ در شناسایی مناطقی از کانال‌های خنک‌کاری پره‌ها که دارای انسداد مصنوعی هستند، موثر بوده و از کارایی مطلوبی برخوردار می‌باشد.

واژگان کلیدی: بازرسی غیرمخرب، دمانگاری فروسرخ، پره توربین گاز.

۱- مقدمه

از روش‌های غیرتماسی اندازه‌گیری دمای سطحی محسوب می‌گردد که در حوزه بازرسی غیرمخرب مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزایایی مانند سرعت بالا، بازرسی غیر تماسی، ایمنی از لحاظ فقدان پرتوهای مضر و محدوده وسیع کاربرد این روش باعث شده است که موضوع جایگزین کردن روش دمانگاری به جای سایر روش‌ها برای انجام بازرسی در برخی تجهیزات، مورد توجه قرار گیرد. یکی از موارد استفاده از دمانگاری، ارزیابی گرفتگی کانال‌های خنک‌کننده می‌باشد که قابلیت این روش در این حوزه، با توجه به سابقه فعالیت‌های قبلی اثبات شده است [۱-۳]. این کانال‌ها در تجهیزاتی که در دماهای بالا کار می‌کنند، به منظور گردش و جابجایی سیال خنک‌کننده کاربرد دارد. از نمونه موارد این کانال‌ها می‌توان به کانال‌های موجود در داخل پره‌های توربین گاز اشاره نمود که با عبور سیال هوا، خنک‌کنندگی پره توربین

دمانگاری فروسرخ^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های نوین در بررسی مواد و سازه‌ها، بر پایه اصل تابش جسم سیاه استوار است. اصطلاح جسم سیاه به ماده‌ای اطلاق می‌گردد که تمامی پرتو مادون قرمز دریافتی را در همه بسامدها و از همه زوایاها، از هر کجا و با هر شدتی که به آن می‌تابد جذب می‌کند. هیچ تابش الکترومغناطیسی از جسم سیاه باز نمی‌تابد یا نمی‌گذرد، و به همین دلیل جسم هنگامی که سرد است سیاه دیده می‌شود. طیف حاصل از تابش مستقل از جنس و شکل جسم است و تنها به دمای آن بستگی دارد. برای دریافت و پردازش پرتوهای مادون قرمز، ابزار دوربین مادون قرمز به کار برده می‌شود تا بتوان این پرتوهای نامرئی را مشاهده و اطلاعاتی را از میزان تابش جسم و در نتیجه دمای سطح آن به دست آورد. از این رو دمانگاری فروسرخ

¹ Infra-Red Thermography

یک نقشه دمایی تبدیل می‌شود. هر سطح انرژی (دما) توسط یک رنگ نمایش داده می‌شود و در انتها نقشه‌ای به نام گرمانگار یا تصویر گرمایی به دست می‌آید.

میزان انتشار پرتوهای فروسرخ از جسم تنها وابسته به دما نیست بلکه علاوه بر این مورد به دمای سطح، ضریب نشر و دمای محیط نیز وابسته است. شدت تشعشع مادون قرمز از جسم سیاه (قانون پلانک) با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

$$I_{\lambda,b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1} \quad (1)$$

در آن T دمای مطلق، h ثابت پلانک، c سرعت نور، K ثابت بولتزمن و λ طول موج ساطع شده می‌باشد. با انتگرال گیری از رابطه‌ی پلانک مجموع پرتو منتشر شده از جسم سیاه به دست می‌آید.

$$I = \sigma T^4 \quad (2)$$

که در این رابطه σ ثابت استفان-بولتزمن است. برای جسم غیرسیاه، ضریب نشر نسبت انرژی انتشار یافته از سطح جسم نسبت به جسم کاملاً سیاه تعریف می‌شود که بیانگر میزان راندمان سطح در انتشار انرژی مادون قرمز است.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{\lambda b}} \quad (3)$$

که در آن I_λ انرژی تابشی جسم در طول موج λ و $I_{\lambda b}$ انرژی تابشی جسم سیاه در همان طول موج است.

در دمانگاری فعال، از یک منبع حرارتی برای تحریک نمونه استفاده می‌شود. در این روش، بازرسی با یک سیستم تصویربرداری مادون قرمز، تحریک حرارتی و نظارت بر تغییرات دمای سطحی در طول گرمایش صورت می‌پذیرد. این روش بازرسی برای قطعات و نمونه‌هایی که جدا از مجموعه و به صورت مستقل ارزیابی می‌گردند، قابل استفاده است. در نمونه‌های مورد نظر در این مقاله که پره توربین گاز است، از این روش دمانگاری برای بازرسی انسداد کانال-های داخلی استفاده می‌گردد.

گاز را به عهده دارند. در نتیجه بازرسی اولیه و همچنین مستمر پره‌های توربین به منظور اطمینان از عدم وجود گرفتگی در این کانال‌ها امری ضروری می‌باشد [۴].

روشهای متداول فعلی برای بررسی انسداد کانالهای داخلی، شامل اندازه گیری افت فشار هوای عبوری از داخل کانالها و روش پرتو نگاری است که روش پرتو نگاری به دلیل زمانبر بودن و نیاز به تفسیر دقیق نتایج و روش افت فشار به دلیل نیاز به فیکسچرهای بسیار ویژه، حساسیت به آب بندی و دقت پایینتر در کانالهای پیچیده دارای محدودیت‌هایی است.

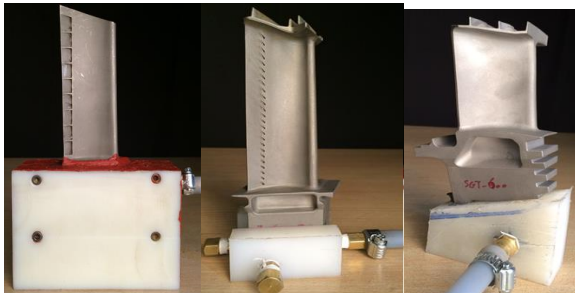
بر این اساس، در این مقاله به منظور بررسی و تأیید قابلیت‌های روش دمانگاری و تجهیزات مورد استفاده در تشخیص گرفتگی کانال‌های خنک کاری پره توربین گاز، قابلیت این روش در تشخیص گرفتگی کانال‌های ایجاد شده در چند نمونه پره به صورت عملی بررسی شده و با انجام آزمایشات مختلف، پارامترهای آزمون شناسایی و استخراج شده‌اند تا روش مناسب برای ارزیابی کانال‌های پره توربین تعیین گردد.

۲- اصول روش دمانگاری فروسرخ

دمانگاری فروسرخ یک روش تحلیلی است که برای تشخیص غیرتماسی دما، انرژی گرمایی ساطع شده در اجسامی که در طیف فروسرخ هستند را دریافت نموده و این انرژی را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل و نقشه دمایی سطح جسم را ارائه می‌دهد. این تکنیک دارای پتانسیلی قوی می‌باشد که در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال دمانگاری مادون قرمز در تشخیص (در حوزه پزشکی، معماری، نگهداری) [۷-۱۵]، یا درک پدیده‌های پیچیده دینامیکی سیال (بی‌ثباتی جریان، جدایش و اتصال مجدد سیال)، یا برای خواص مواد و ارزیابی فرایند ساخت و تولید که به ارتقای طراحی و ساخت محصولات کمک می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک سیستم عکسبرداری فروسرخ اساساً شامل یک دوربین و یک پردازنده است که با توجه به نوع مدل، ممکن است پردازنده در داخل خود دوربین قرار گیرد. مرکز دوربین دارای یک شناساگر فروسرخ است که انرژی ساطع شده توسط جسم را دریافت می‌کند. این انرژی توسط حسگر فروسرخ به یک سیگنال الکترونیکی ویدیویی و سرانجام به

(۱) پره‌های مورد آزمایش به همراه سیستم فیکسچرینگ طراحی شده نشان داده شده است. در پره‌های مورد بررسی در این مقاله، پیچیدگی پره‌ها در پره شماره ۲ بسیار زیاد، در پره شماره ۳ زیاد و در پره شماره ۱ کمتر است. فیکسچرینگ پره‌ها به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که بخار داغ از ورودی کانال‌ها با فشار وارد شده و پس از گرمایش، از سوراخ‌های خروجی بیرون رانده شود. لذا کلیه اتصالات مربوطه به خوبی آب بندی شد.



شکل ۱- پره‌های مورد آزمایش به همراه سیستم فیکسچرینگ

۳-۲- انجام آزمایش‌ها و استخراج نتایج

نتایج آزمایشات انجام گرفته نشان داد که استفاده از بخار اشباع با فشار ۲ bar برای انجام آزمون‌ها مناسب است. فشار بخار تعیین کننده میزان دبی عبوری از کانالها خواهد بود. استفاده از بخار در دمای اشباع به دلیل میعان بخار در داخل کانالها، اثر گرم کنندگی بسیار زیادی خواهد داشت. با این حال به دلیل مسائل ایمنی، طراحی سیستم تولید بخار برای تحمل فشار تا ۴bar انجام شد. با این توضیح که به دلیل کارکرد سیستم در دمای بالا و همچنین استفاده از سیستم بخاردهی در محیط بسته آزمایشگاهی و همچنین لزوم ارتباط مستقیم و نزدیک اپراتور با مجموعه آزمون، ضریب اطمینان مجموعه بایستی بسیار بالا در نظر گرفته شود. بنابراین برای ایجاد چیدمان، از تجهیزاتی با فشار عملکردی بسیار بالاتر از حد لازم در آزمون استفاده شد. چیدمان تجهیزات حرارت‌دهی و آزمون‌های عملی، در شکل (۲) نشان داده شده است.

۳- انجام آزمون‌های تجربی

۳-۱- معرفی و آماده‌سازی نمونه پره‌ها

پره‌های انتخاب شده برای انجام بازرسی در این مقاله، شامل سه نوع پره توربین گاز می‌باشد که از منظر پیچیدگی کانال‌های داخلی، در سطح متوسط تا پیچیده هستند. تمامی پره‌ها از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل بوده که با روش ریخته‌گری دقیق ساخته شده‌اند. در این روش برای ایجاد کانال‌های داخلی از روش ماهیچه گذاری در داخل پره استفاده شده و پس از اتمام عملیات ذوب ریزی، ماهیچه‌های سرامیکی توسط فرایند لیچینگ^۱ از داخل کانال‌ها خارج گردیده است. در این مرحله ممکن است عملیات کامل نشده و بخشی از ماهیچه در داخل پره باقی بماند که به صورت انسداد در کانال بایستی قابل مشاهده گردد.

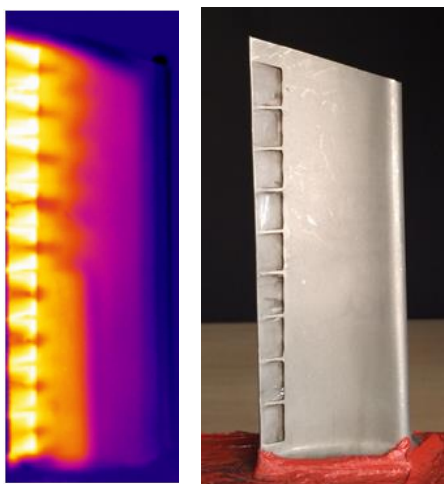
۳-۲- معرفی روش آزمون و آماده سازی چیدمان

روش‌های مختلف آزمون دمانگاری بر اساس موضوعات زیر دسته‌بندی می‌گردد [8]:

- (الف) وجود و یا عدم وجود منبع حرارت‌دهی خارجی (روش‌های فعال و غیرفعال)
- (ب) ثابت و یا متحرک بودن قطعه و یا دوربین دمانگاری (روش‌های استاتیک، دینامیک)
- (ج) تولید، عبور و یا بازتاب حرارت در نمونه مورد بازرسی (بازتابی، عبوری، داخلی)
- (د) روش اعمال انرژی به قطعه (نقطه‌ای، خطی، صفحه‌ای)
- (ه) نوع منبع حرارت‌دهی
- (و) نحوه تغییرات حرارت اعمالی و دمای اندازه‌گیری شده نسبت به زمان

برای معرفی سناریوی نهایی آزمون، علاوه بر توجه به پژوهش‌های پیشین و سابقه فعالیت‌های مشابه انجام شده، توجه به قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و امکانات مورد نیاز هر سناریو نیز ضروری است. از این رو در این مقاله با توجه به تحقیقات قبلی صورت گرفته و تجربیات حاصل از آزمون‌های نمونه‌های اولیه، سناریوی آزمون دمانگاری فعال با استفاده از تحریک بخار داغ به روش استاتیک و با تحلیل گذرای حرارتی مد نظر قرار گرفت. از این رو چیدمان نهایی آزمون شامل منبع تولید بخار، منبع حرارتی، سیستم تصویربرداری و فیکسچرینگ پره‌ها ساخته شد. در شکل

¹ Leaching



شکل ۳- نتیجه آزمایش دمانگاری برای یک نمونه پره بدون انسداد کانالها



شکل ۲- تجهیزات حرارت دهی و تصویر برداری در آزمایش دمانگاری فعال

کانتور دمایی نشان داده شده در شکل (۳) نشان دهنده توزیع دمای سطحی پره در حین عبور سیال داغ از داخل کانالها می باشد. چنانچه در هر یک از بخش های داخلی انسدادی وجود داشته باشد، این انسداد بایستی به صورت تمرکز دمایی (دمای بالا و یا پایین) در سطح مشاهده گردد.

۴-۳- ایجاد انسداد مصنوعی در کانالها و انجام آزمون

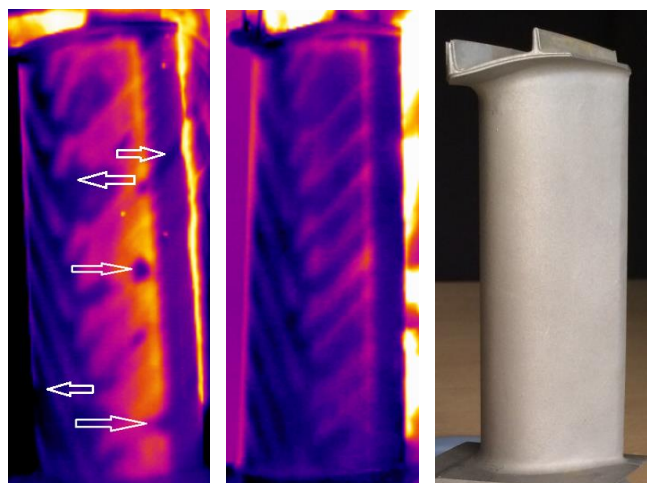
برای ارزیابی قابلیت روش دمانگاری در تعیین و تشخیص انسداد کانالها در هر یک از پره های ذکر شده در بخش قبل، انسداد مصنوعی با تزریق نوعی چسب در مسیر کانال های داخلی ایجاد شد. انسدادهای ایجاد شده در تمامی پره ها در بخش های مختلف و از سوراخ های خروج گاز انجام شد. پس از ایجاد انسداد مصنوعی، تمامی پره ها با سناریوی فعال ذکر شده مجدداً آزمایش شدند و کانتور دمایی در زمان های مختلف گرم شدن با کمک سیستم داده برداری حرارتی دریافت و ثبت شد.

۴- مشاهده و بررسی نتایج

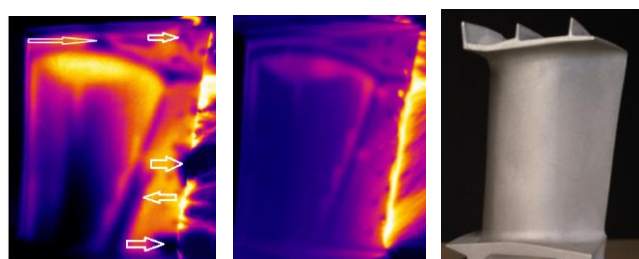
نتایج آزمایشها به صورت کانتور دمایی در زمان های مختلف دریافت و ثبت شده است. برای مشاهده پذیر کردن عیوب، تاریخچه دمای گذرای ثبت شده در هر آزمون مجدداً با استفاده از نرم افزار مخصوص دمانگاری مشاهده و بهترین زمان تحلیل حرارتی انتخاب شد. نتایج نشان دادند که

با توجه به چیدمان نشان داده شده در شکل ۲، در تمامی تستها دوربین کاملاً عمود بر سطح نمونه قرار گرفته و از تغییرات اندک زاویه دوربین صرف نظر شد. نکته قابل ذکر در آماده سازی پره ها این است که در این مرحله هیچ گونه عملیات اضافی نظیر پرداخت کاری و یا رنگ کاری بر روی سطح پره ها انجام نگرفت. اگرچه در آزمون حرارت نگاری چنانچه سطح نمونه با رنگ سیاه پوشانیده شود به دلیل ایجاد ضریب پخش حرارتی بالاتر نتایج بهتر می شوند، لکن از آنجا که در واقعیت رنگ کردن پره ها یک عملیات اضافی بوده و در برخی موارد مجاز نیست، سعی شد تا سطح پره ها بدون آماده سازی بررسی شوند.

پس از تهیه اجزا و تجهیز چیدمان آزمون و همچنین آماده سازی فیکسچر، هر یک از پره های معرفی شده براساس سناریوی انتخابی آزموده شد. در این مرحله و به منظور دستیابی به الگویی مناسب برای مقایسه، نمونه ها بدون ایجاد انسداد آزموده شدند. تمامی تستها در یک اتاق تاریک (محفظه تاریک) جهت به حداقل رسانی پرتوهای بازتابی انجام شد. بدین منظور تصاویر دمانگاری برای هر قطعه به صورت مجزا تهیه شد. محدوده دمایی محیط ۲۳ درجه سانتیگراد و دمای بخار، برابر دمای اشباع در هر فشار در نظر گرفته شد. در شکل (۳) نمونه تصویر دمانگاری حاصل از آزمایش یکی از نمونه پره ها نشان داده شده است.



شکل ۵- نتیجه آزمایش دمانگاری برای نمونه پره شماره ۲ با و بدون انسداد کانالها



شکل ۶- نتیجه آزمایش دمانگاری برای نمونه پره شماره ۳ با و بدون انسداد کانالها

۵- نتیجه گیری

در این مقاله جهت شناسایی انسداد در کانالهای خنک کاری پره های توربین گاز سه نمونه پره انتخاب و پس از ایجاد عیوب مصنوعی در داخل کانالهای خنک کاری، مورد آزمایش دمانگاری قرار گرفتند. با بررسی دقیق اثرات انسداد در هریک از پره ها نتایج نهایی به شرح ذیل می باشد:

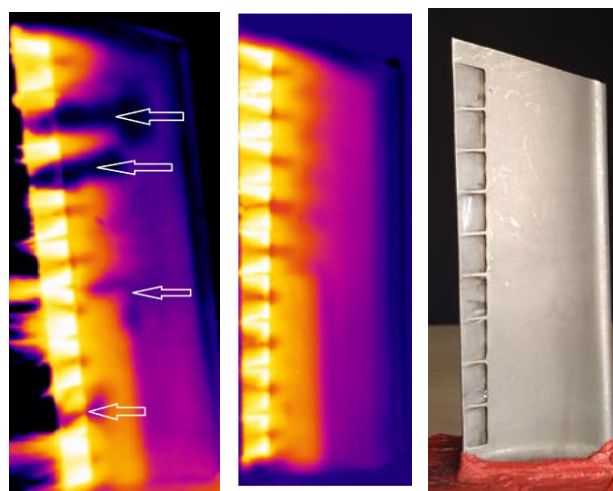
- ۱- جهت شناسایی انسداد در کانالهای خنک کاری در نمونه پره های مورد بررسی، بهترین نتایج در فشار ۲bar، دمای اولیه پره 25°C و جریان سیال ۱۰۰٪ (مسیر خروجی بخار کاملاً باز) تعیین شد.

۲- در نمونه پره شماره ۱ کلیه انسدادهای ایجاد شده به خوبی و با وضوح قابل قبول، مشاهده شد.

۳- با وجود پیچیدگی هندسه کانالها در مورد نمونه شماره ۲، انسداد در کانالهای خنک کننده شناسایی شد. در عین حال برای اطمینان بیشتر آزمون دمانگاری با دقت و تنظیم دقیق تر پارامترها از هر دو سمت نمونه صورت گرفت.

بهترین زمان تحلیل مربوط به زمانهای اولیه آزمون و در حد چند ثانیه (۱ تا ۲ ثانیه از شروع آزمون) می باشد. در شکل های (۴)، (۵) و (۶)، نتایج آزمون دمانگاری برای هر سه نمونه پره مورد نظر در این مقاله شامل نتایج مقایسه ای پره بدون انسداد و دارای انسداد نشان داده شده است. در هر یک از تصاویر محل فلش ها، نشان دهنده محل ایجاد عیوب مصنوعی در کانالها می باشد.

در نتایج مشاهده شده در نگاه اول، بسیاری از نقاط تیره و یا روشن در نمونه پره بدون عیب نیز ممکن است معیوب شناخته شده و یا تفاوت معنی داری در نقاط تیره و روشن نمونه های سالم و معیوب مشاهده نگردد، اما با انجام چندین آزمون آزمایشی در پره های بدون عیب (همانند آزمون های انجام شده در بخش اول این مقاله)، می توان الگوی مناسبی برای نمونه های بدون عیب ایجاد و نمونه های جدید را با مقایسه با آنها ارزیابی نمود. بدین ترتیب و تنها با انجام چند آزمایش، کلیه نقاط علامت گذاری شده در شکل های بالا به



شکل ۴- نتیجه آزمایش دمانگاری برای نمونه پره شماره ۱ با و بدون انسداد کانالها

عنوان انسدادهای کانالها شناخته می شوند. این موضوع به معنی موفقیت کامل روش آزمون معرفی شده در شناسایی انسداد کانالها در پره توربین گاز است. با این حال روش معرفی شده در این مقاله شامل محدودیتهایی از جمله هزینه اولیه نسبتاً بالا، لزوم ایجاد فیسکچر مناسب برای دمش سیال و همچنین دشواری تفسیر نتایج در برخی موارد است.

قدردانی و تشکر

بدینوسیله از کلیه دوستان و همکاران در شرکت مهندسی موادکاران، معاونت پژوهش و فناوری مپنا و دانشگاه فنی تهران که در اجرای این تحقیق همکاری نموده‌اند، کمال تشکر بعمل می‌آید.

۴-آزمون دمانگاری برای تشخیص انسداد در کانال‌های خنک کننده داخلی پره شماره ۳ بسیار مناسب بوده و انسداد در این نوع پره با دقت و وضوح بالایی تشخیص داده شد.

۵-بطور کلی قابلیت روش دمانگاری مادون قرمز با رعایت دستورالعمل ارائه شده در این مقاله برای شناسایی انسداد کانال‌های خنک‌کاری در انواع پره‌های توربین گاز بسیار مناسب ارزیابی می‌گردد.

۷- منابع

- [5]. Błachnio, J., "Analysis of technical condition assessment of gas turbine blades with non-destructive methods", *acta mechanica et automatica*, 7, (2013), pp 203-208.
- [6]. Wu, D., Rantala, J., Karpen, W., Zenzinger, G., Schönbach, B., Rippel, W., Steegmüller, R., Diener, L., Busse, G., "Applications of lockin-thermography methods, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Eds., Springer, (1996), pp 511-518.
- [7]. Titman, D.J., "Applications of thermography in non-destructive testing of structure", *J. NDT & E International*, 34, (2001), pp 149-154.
- [8]. Michael Y. Y. Hung, Yun Shen Chen, Siu Pang Ng, "Review and comparison of shearography and pulsed thermography for adhesive bond evaluation", *Optical Engineering J.*, 46, (2007), pp 1-7.
- [1]. Meola, C., Carlomagno, G.M., Di foggia, M., Natale, O., "Infrared thermography to detect residual ceramic in gas turbine blades", *J. Appl. Phys*, 91, (2008), pp 685-691.
- [2]. T., Cardone, G., de Luca, L., Carlomagno, G.M., "Some Experimental Investigations on Gas Turbine Cooling Performed with Infrared Thermography at Federico II", *International Journal of Rotating Machinery*, (2015), pp 1-16.
- [3]. Marinetti, S., Robba, D., Cernuschi, F., Bison, P., Grinzato, E., Thermographic inspection of TBC coated gas turbine blades: Discrimination between coating over-thicknesses and adhesion defects, *Infrared physics & technology*, 49, (2007), pp 281-285.
- [4]. Maldague, X., Cielo, P., Poussart, D., Emerson, P., "Thermographic nondestructive evaluation (NDE) of turbine blades: Methods and image processing". *J. industrial Metrology*, 1, (1990), pp 139-153.