



## گرمانگاری کانال‌های خنک کاری با استفاده از حرارت دهی با بخار

محمد مصطفی خلیلی<sup>۱</sup>، محمدرضا فراهانی<sup>۲\*</sup>، سعید اصغری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشیار، پژوهشکده مواد و انرژی، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۷۶۱۴۴۱۸، mrfarahani@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۷ تیر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: فروردین ۱۳۹۹

### کلیدواژه‌ها:

ترموگرافی

تست غیرمخرب

ترموگرافی پالسی

پره توربین

کانال‌های خنک کننده

### چکیده

آزمون ترموگرافی از مدرن‌ترین روش‌های تست غیرمخرب است که در سال‌های اخیر کاربرد آن در صنعت روز به روز در حال گسترش است. مزایایی چون سرعت بالای انجام تست در کنار دقت بالا و امکان انجام بازرسی بدون برقراری تماس از ویژگی‌های این روش است. مزایای این روش که منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت در تست و بازرسی می‌شود منجر شد تا با استفاده از این روش در تشخیص عیوب موجود در کانال‌های پره‌های توربین گازی بتوان دقت در تشخیص عیب را بالا برده و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش داد. توربین‌های گازی کاربرد بسیاری در صنعت دارند. راندمان این توربین‌ها با افزایش دمای احتراق افزایش می‌یابد. هدف دستیابی به راندمان هر چه بیشتر است اما برای رسیدن به این هدف محدودیت‌هایی وجود دارد. در مواردی که کانال‌های خنک‌کننده این پرها شکل هندسی پیچیده‌ای دارند ممکن است در مرحله ریخته‌گری، خروج ماهیچه سرامیکی این کانال‌ها به طور کامل صورت نپذیرد و در اصطلاح دچار شکستگی شود. باقی ماندن این ذرات در کانال‌های خنک‌کننده می‌تواند عملکرد توربین را تحت تاثیر جدی قرار دهد. بنابر این بسیار مهم است که بتوان این عیب را پیش از استفاده از پره معیوب تشخیص داد. در این مقاله هدف تشخیص کانال‌های موجود در قطعه و بررسی اثر فشار بخار آب تزریق شده در کانال‌ها به عنوان محرک دمایی و نیز بررسی تاثیر فاصله کانال از سطوح در نتایج بدست آمده از ترموگرافی بوده است.

## Thermography of the cooling channels using steam heating

Mohammad Mostafa Khalili<sup>1</sup>, Mohammadreza Farahani<sup>1\*</sup>, Saeed Asghari<sup>2</sup>

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2Institute of Materials and Energy, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1417614418 Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 13 February 2019  
Accepted 8 July 2019  
Available March 2020

### Keywords:

Thermography  
Non-destructive testing  
Pulse thermography  
Turbine blade  
Cooling channels

### Abstract

The thermography inspection is the most modern non-destructive test method that has been expanding in the industry in recent years. There are several benefits such as high-speed testing, along with high precision and the ability to inspecting without conduct. The advantages of this method, which leads to lower costs and increase accuracy in testing, makes us able to use this method to detect the defects in the gas turbine blade channels to increase the accuracy of the fault diagnosis and it reduces the maintenance costs. Gas turbines have many uses in the industry. The efficiency of these turbines increases with increasing combustion temperature. The goal is to achieve more efficiency, but there are limitations to this goal. When shape of cooling channels has a complex geometric shape, maybe the ceramic muscle cannot completely exit at the casting stage and it will break. Remaining these particles in the cooling channels can seriously affect the turbine performance. So it's very important to detect this defect before using a defective blade. In this paper, it was aimed to detect existed channels in the work piece to examine the effect of injected vapor pressure into the channels as temperature stimulus and to investigate the influence of channel distance from the surface from the results obtained by thermography.

### ۱- مقدمه

می‌شوند، قابل شناسایی خواهند بود. دوربین ترموگرافی وسیله‌ای است که توانایی اندازه‌گیری و نمایش محدوده خاصی از امواج مادون قرمز را دارد. امواج مادون قرمز جزئی از امواج الکترومغناطیس در محدوده ۰/۸ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند. محدوده ۸ تا ۱۵ میکرومتر محدوده اندازه‌گیری امواج الکترومغناطیس توسط دوربین‌های ترموگرافی صنعتی است. با

آنالیز ترموگرافی که به نام‌هایی چون گرمانگاری، ترموویژن و تصویربرداری حرارتی نیز شناخته می‌شود یکی از روش‌های مهم در زمینه تست‌های غیرمخرب است. داده‌برداری در این روش به کمک دوربین ترموگرافی صورت می‌پذیرد و به این طریق کلیه اشکالاتی که منجر به تغییر در الگوی توزیع دمای سطحی

اصطلاح دچار شکستگی شود. باقی ماندن این ذرات در کانال-های خنک‌کننده می‌تواند عملکرد توربین را تحت تاثیر جدی قرار دهد. بنابر این بسیار مهم است که بتوان این عیب را پیش از استفاده از پره معیوب تشخیص داد.

در سال ۲۰۰۸ متولا و همکاران [۱] با بررسی سه نوع پرهی توربین به وسیله روش ترموگرافی و مقایسه یافته‌های خود با نتایج حاصل از رادیوگرافی همان پره‌ها توانستند کارایی و توانایی این روش را در تشخیص عیوب موجود در پره‌های توربین اثبات کنند. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد ترموگرافی مادون قرمز می‌تواند قطعات کوچکی از سرامیک را کشف کند که توسط بازرسی اشعه ایکس شناسایی نشده است. به علاوه توسط روش ترموگرافی توانستند اطلاعاتی در مورد انواع دیگر عیوب مثل نقص‌های سطحی در طی یک مرحله از آزمایش بدست آورند. نتایج بدست آمده بیانگر برتری روش ترموگرافی نسبت به رادیوگرافی هم در توان تشخیص و هم در زمینه صرفه جویی در زمان و هزینه داشت. آنها از دو روش ترموگرافی پالسی و لاک-این برای بازرسی پره‌ها بهره بردند. در روش ترموگرافی پالسی هم از لامپ هالوژنی و هم بخار آب برای تحریک استفاده کردند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که ترموگرافی مادون قرمز قادر به تشخیص سرامیک باقی مانده در داخل کانال‌های خنک‌کننده انواع پره‌های توربین است. خصوصا در روش لاک-این و در حالی که هر چه حرارت اعمال شده بیشتر بود و سرعت عکس‌برداری دوربین ۶۰ هرتز باشد. همچنین در مواردی ذرات کوچکی از سرامیک که در روش رادیوگرافی تشخیص داده نشده بودند در این روش کشف شد. آنها به این نتیجه رسیدند که بهترین راه برای تشخیص قطعات کوچک سرامیک در نوک کانال‌های غیر مستقیم استفاده از بخار آب به عنوان محرک حرارتی در روش پالسی است.

آرتور [۲] و همکارش تلاش کردند تا به بررسی مقایسه‌ی روش ترموگرافی با بازرسی‌های چشمی و ویدئوسکوپی و متالوگرافی بپردازند. آنها نشان دادند که روش ترموگرافی به عنوان یکی از روش‌های جدید در تست‌های غیرمخرب قادر به تشخیص تغییرات در وضعیت تیغه و تشخیص مراحل اولیه‌ی آسیب به تیغه توربین است. آنها به این نتیجه رسیدند که روش ترموگرافی پالسی در مقایسه با سایر روش‌های اشاره شده یک جایگزین مناسب برای بازرسی تیغه‌های توربین است. به این وسیله می‌توان با هزینه کمتر و در زمان کوتاه‌تر به نتیجه‌ی مطلوب و دلخواه رسید.

بلاچنیو [۳] سعی کرد تا ترموگرافی را به عنوان تکنیکی

توجه به اینکه کلیه اجسامی که دمای بالاتر از صفر مطلق دارند این امواج را از خود ساطع می‌کنند، اندازه‌گیری شدت ساطع شدن این امواج متناسب با دمای آن نقطه است. برای انجام تست ترموگرافی به منبع انرژی حرارتی و سیستم تصویربرداری مادون قرمز نیاز می‌باشد. از هوای گرم و یا لامپ و یا هر چیز دیگری که بتوان به قطعه کار حرارت داد، می‌توان به عنوان منبع انرژی حرارتی استفاده کرد. اندازه‌گیری حرارت نقاط مختلف ماده بوسیله دوربین مادون قرمز و ایجاد نقشه‌های حرارتی به دو قسمت تقسیم می‌شود. ۱- ترموگرافی غیرفعال ۲- ترموگرافی فعال، در ترموگرافی غیر فعال دمای قطعه بدون تحریک دمایی خارجی، اندازه‌گیری و بررسی می‌شود، وجود ناهمگنی‌ها در مسیر جریان حرارتی باعث بهم خوردگی شار حرارتی در داخل جسم می‌شود. از کاربردهای آن می‌توان به بررسی نشتی حرارتی ساختمان‌ها، فرآیندها، تعمیرات، و ارزیابی خواص اشاره کرد. به وسیله این دوربین می‌توان یاتاقان‌ها و بیرینگ‌های موجود در یک واحد تولیدی را به دقت بازرسی و کنترل نمود. بیرینگ‌ها در حالت ایده‌آل دمای کاری خاص و تعریف شده‌ای دارند، هر گونه افزایش دمای غیر عادی نشانه‌ای برای وجود عیب است. در ترموگرافی فعال قطعه مورد آزمایش باید تحریک دمایی شود. برای این منظور از یک منبع حرارتی مثل لامپ و یا یک سیال داغ استفاده می‌شود. رفتار قطعه در پاسخ به این تحریک باعث شناسایی عیوب خواهد شد. ترموگرافی پالسی یکی از روش‌های متداول اعمال حرارت در گرمانگاری می‌باشد که در این حالت حرارت به صورت پالس‌های چند میلی‌ثانیه برای مواد با رسانایی حرارتی بالا و چند ثانیه برای مواد با رسانایی پایین اعمال می‌شود. در بازرسی‌های ترموگرافیکی تحریک با پالس نوری به سادگی قابل استفاده بوده و معمولا نیاز به تطبیق خاص سیستم دوربین ندارد.

توربین‌های گازی کاربرد بسیاری در صنعت دارند. راندمان این توربین‌ها با افزایش دمای احتراق افزایش می‌یابد. هدف دستیابی به راندمان هر چه بیشتر است اما برای رسیدن به این هدف محدودیت‌هایی وجود دارد. دو پارامتر مهم برای افزایش دمای کاری توربین‌های گازی، تولید و استفاده از آلیاژهایی است که بتوانند دمای بالایی در رنج تقریبی ۱۱۰۰ تا ۱۶۰۰ [۱] و [۲] درجه را تحمل کنند و نیز ایجاد کانال‌هایی که بتوانند هرچه بیشتر و مطلوب‌تر فرآیند خنک‌کاری را سرعت ببخشند. در مواردی که کانال‌های خنک‌کننده این پره‌ها شکل هندسی پیچیده‌ای دارند ممکن است در مرحله ریخته‌گری، خروج ماهیچه سرامیکی این کانال‌ها به طور کامل صورت نپذیرد و در

Ss304 اثر فشار بخار و عمق کانال بر نتایج بدست آمده از ترموگرافی پالسی بررسی شد.

## ۲- نمونه سازی و انجام آزمایشات

در این تحقیق برای انجام تست ترموگرافی قطعه‌ای مطابق شکل ۱ از جنس فولاد زنگ نزن Ss304 ساخته شد. در این قطعه چهار کانال به قطر ۳ میلی‌متر و با فاصله‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر از سطح ایجاد شد. دلیل انتخاب فولاد زنگ نزن Ss304 با رسانندگی گرمایی در حدود ۱۵ (W.K-1.m-1) برای ساخت نمونه آزمایشی، نزدیکی رسانندگی گرمایی این جنس به اینکونل است که جنس تشکیل دهنده پره‌های توربین است. رسانندگی گرمایی که در فیزیک با  $k$  نمایش داده می‌شود خاصیتی از مواد است که بیانگر توانایی آنها در انتقال گرما است. یکای رسانندگی گرمایی در دستگاه SI وات بر کلین متر (W.K-1.m-1) است. جهت غلبه بر انعکاس تصاویر محیطی در تصویربرداری حرارتی سطح قطعه کار با استفاده از رنگ مشکی مات به صورت یکنواخت رنگ شد.

برای تأمین بخار آب مورد نیاز برای تزریق در کانال‌ها سیستمی مطابق شکل ۲ ساخته شد. از کپسول CO<sub>2</sub> برای ساخت مخزن استفاده شد. ایمنی بالای این مخازن از دلایل این انتخاب بود. این مخازن استحکام بالایی دارند و تا فشاری در حدود ۲۰۰ بار تست می‌شوند. ابتدا نازل کلگی مخزن جدا شد و سپس با نصب یک منی‌فولد بجای آن خروجی‌های مختلفی اصل گردید. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود یکی از خروجی‌ها به نصب شیر اطمینان اختصاص داده شد.

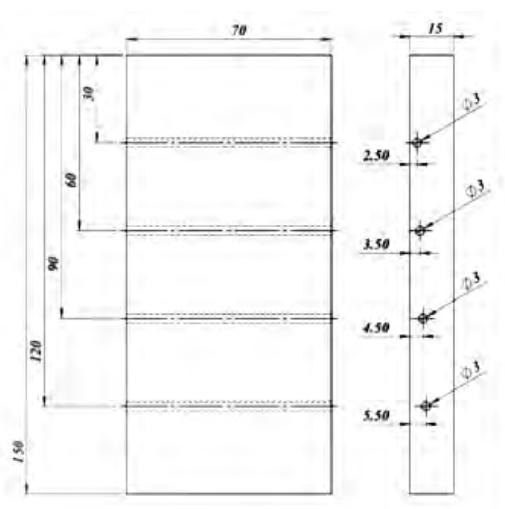


Fig 1 Schematic of the prepared test sample.

شکل ۱ نقشه قطعه ساخته شده برای تست.

برای بازرسی پره‌های توربین بکار گیرد و بتواند مقایسه‌ای میان این تکنیک و سایر تکنیک‌های متداول در عرصه بازرسی پره‌های توربین انجام دهد. او به شرح و چگونگی انجام تست به وسیله‌ی ویدئوسکوپ، ترموگرافی پالسی و ترموگرافی ایکس-ری پرداخت. او به این نتیجه رسید که ترموگرافی حساستر و قابل اطمینان‌تر است اما لازمه انجام تست ترموگرافی دمونتاز پره‌ها و سپس تست آنهاست. ترموگرافی کامپیوتری هم مانند ترموگرافی از اعتبار و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بود. به علاوه این روش هم مانند ترموگرافی پالسی نیازمند دمونتاز پره‌های توربین است. در ضمن هزینه بر بودن و خطرات احتمالی استفاده از اشعه ایکس از دیگر ضعف‌های این روش نسبت به دو روش دیگر است.

ماتیاس و همکارش [۴] به اهمیت دقت ابعادی و دقت قرارگیری کانال‌های خنک‌کننده در پره توربین پرداخت. اگر در مرحله ریخته‌گری ماهیچه‌های ایجاد کننده کانال‌ها در جای خود قرار نگیرند دیواره یک طرف نازک‌تر و طرف دیگر ضخیم‌تر از حالت طراحی شده و استاندارد می‌شود. در توربین‌های گازی تیغه‌های ردیف اول بیش از سایر تیغه‌ها در معرض حرارت و تغییرات ناگهانی دما قرار می‌گیرند. آنها به بررسی اندازه‌گیری ضخامت و ابعاد به روش آلتراسونیک پرداختند که روش مرسوم برای کنترل ابعادی و سنجش ضخامت بود. سطح منحنی پره یکی از مشکلاتی بود که باعث می‌شد پراب آلتراسونیک نتواند جای دقیق و مناسبی را برای استقرار داشته باشد لذا نتایج اندازه‌گیری‌ها در این روش از اپراتوری به اپراتور دیگر متفاوت بود. همچنین این تکنیک قابلیت انجام در چند نقطه را دارد و نمی‌تواند یک تصویر کلی به ما ارائه دهد. آنها ابتدا از فلش لامپ به عنوان محرک در ترموگرافی استفاده کردند. در مرحله بعد از هوای گرم تحت فشار به عنوان محرک حرارتی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تحریک توسط هوای گرم نتایجی با وضوح بهتر و مطمئن‌تر را ارائه می‌دهد.

در سال ۲۰۰۳ لیو و همکاران [۵] از ترموگرافی برای شناسایی نقص‌ها و ترک‌های داخلی پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت استفاده کردند. پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت (TBCs) به طور گسترده‌ای در انواع توربین‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها توانستند عیوب با اندازه کوچکتر از ۱ میلی‌متر را هم مشاهده کنند. همچنین به این نتیجه رسیدند که دمای بیشتر تشخیص را راحت‌تر می‌کند.

در این مقاله با استفاده از بخار آب به عنوان محرک دمایی و عبور آن از داخل کانال‌های یک قطعه از جنس فولاد زنگ نزن

دوربین مورد استفاده در این مقاله Flir A325Sc با رزولیشن  $۲۴۰ \times ۳۲۰$  پیکسل با حساسیت حرارتی  $۰/۰۵$  درجه سانتی‌گراد و فرکانس  $۶۰$  هرتز با دقت اندازه‌گیری  $\pm ۲$  درجه می‌باشد. در این پژوهش، زاویه دوربین نسبت به سطح قطعه کار به صورت عمودی تنظیم گردید تا حداقل اختلاف در تخمین ابعاد کانال حاصل از تصویربرداری حرارتی ایجاد شود.

### ۳- ارائه نتایج و بحث

بخار آب در سه فشار مختلف در کانال‌های این قطعه اعمال شد. در جدول ۱ تصاویر ترموگرافی بدست آمده از این فرآیند در زمان بندی مشخص ارائه شده است. واضح است که در هر فشار با گذشت زمان، طول بیشتر از هر کانال و تعداد بیشتری از کانال‌های هر قطعه قابل مشاهده است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است هر چه فاصله کانال از سطح بیشتر باشد، زمان بیشتری برای انتقال حرارت از سطح داخلی کانال به سطح قطعه کار لازم است که همین مسأله باعث می‌شود که کانال در تصویر حرارتی دیرتر دیده شود و دمایی کمتری داشته باشد. اما با کمی دقت در تصاویر می‌توان متوجه تفاوت میان عکس‌ها در زمان ثابت و فشارهای متفاوت شد.

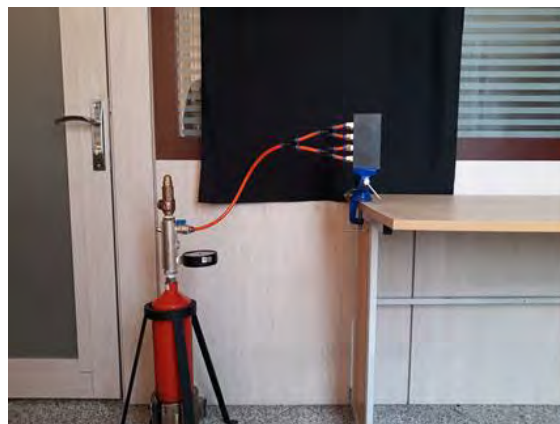


Fig 1 Thermography test setup

شکل ۲ سامانه آزمون ترموگرافی

شیر اطمینان قابلیت تنظیم تا  $۱۰$  بار فشار را داشت که برای ایمنی بیشتر آن بر روی  $۴$  بار تنظیم شد. با نصب یک دماسنج و فشارسنج روی یک خروجی این امکان فراهم گردید که دما و فشار مخزن مشاهده و کنترل شود. دماسنج قابلیت نمایش دما را تا  $۱۲۰$  درجه سانتی‌گراد و فشارسنج تا  $۶$  بار را دارا بودند. همچنین یک انشعاب جهت شارژ آب درون مخزن اختصاص داده شد که با درپوشی در هنگام تست مسدود می‌شد. خروجی اصلی ما که بخار آب را توسط اتصالات و شلنگ‌های پنوماتیک به داخل قطعه کار تزریق میکرد آخرین انشعاب منی‌فولد بود.

جدول ۱ توزیع دما در مسیر عمود بر کانال‌های  $\text{Ø}3\text{-Ss}304$  در سه فشار

Table 1 Temperature distribution on prependicular path in  $\text{Ø}3\text{-Ss}304$  at 3 different pressures.

P	$T_0$	$T_1= 3/60s$	$T_2= 6/60s$	$T_3= 10/60s$	$T_4= 15/60s$	$T_5= 25/60s$	$T_6= 35/60s$	$T_7= 45/60s$
0.5 bar								
1 bar								
2 bar								

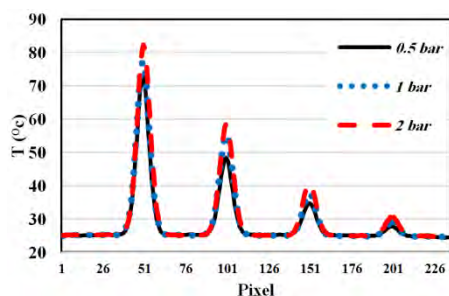


Fig 3 Temperature distribution on prepedicator path in Ø3-Ss304 at 3 different pressures.

شکل ۳ توزیع دما در مسیر عمود بر کانالهای Ø3-Ss304 در سه فشار

هر چند نمودارهای شکل ۳ بسیار واضح و نتایج بدست آمده طبق انتظار است اما واقعیت آن است که در این نمودارها فقط یک خط عمود بر کانال مشاهده و تحلیل شده است و نمی‌تواند تحلیل درستی از تغییرات دمایی در طول کانال ارائه دهد، به همین منظور در ادامه با رسم خطوطی در طول چهار کانال، به بررسی و تحلیل دمایی کانال‌ها در طول آنها پرداخته شده است. نمودارهای شکل ۴ بیانگر تغییرات دمایی در طول هر یک از چهار کانال موجود در قطعه در سه فشار بخار است که بر همدیگر منطبق شده‌اند. نمودارهای به رنگ قرمز مربوط به کانال با عمق ۱ میلی‌متر، رنگ آبی مخصوص کانال با عمق ۲ میلی‌متر، مشکی متعلق به کانال عمق ۳ میلی‌متر و رنگ سبز به کانال عمق ۴ میلی‌متر اختصاص داده شده است. فشار بخار ۰/۵ بار با خط، ۱ بار توسط نقطه چین و ۲ بار به وسیله خط چین نمایش داده شده است. در نمودار شکل ۴ افت دمایی سطحی کانال با افزایش عمق به وضوح دیده می‌شود همچنین افزایش سطح دمایی در هر کانال با افزایش فشار قابل تشخیص است. مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش فشار بخار در سطح دمایی کانال با افزایش عمق کمرنگ شده است، به طور مثال افزایش فشار کمترین اثر را در افزایش سطح دمایی عمق ۴ و بیشترین اثر را در عمق ۱ میلی‌متر دارد. به طور خلاصه می‌توان گفت:

- افزایش فشار باعث افزایش دما در کانال‌ها می‌شود، این اختلاف با افزایش عمق کاهش یافته است.
- افزایش فشار باعث یکنواختی دما در طول کانال و کم شدن شیب نمودار در هر عمق می‌شود.
- رفتار نمودارها در فشار ۱ و ۲ بار بسیار شبیه به هم است با این اختلاف که در فشار ۲ بار سطح دمایی بالاتر است.
- تغییرات فشار بیشترین اثر را در کانال ۱ میلی‌متر و کمترین اثر را در کانال عمق ۴ میلی‌متر دارد.
- شیب نمودارها که همان اتلاف حرارت در طول کانال است با افزایش عمق در فشار ثابت و افزایش فشار در عمق ثابت کمتر

به طور مثال در زمان T1 با افزایش فشار افزایش طول قابل شناسایی در کانال اول مشاهده شد یا در زمان T2 با افزایش فشار قدرت تشخیص ما در کانال دوم افزایش یافته است، در زمان‌های دیگر نظیر T3 نیز این موضوع قابل مشاهده است. به طور کلی با دیدن عکس‌های ترموگرافی در این قطعه می‌توان نتیجه گرفت:

- هر چه فاصله کانال از سطح کمتر باشد سریعتر قابل تشخیص است و دمای بیشتری را خواهد داشت.
- هر چه فشار بخار بیشتر باشد می‌توان در زمان کمتری به نتیجه رسید یعنی زمان تشخیص هر چهار کانال در قطعه کمتر می‌شود، به طور مثال بنظر می‌رسد آنچه در زمان T7 در فشار بخار ۰/۵ بار مشاهده می‌شود در فشار ۱ بار در زمان T6 و در فشار ۲ بار در زمان T5 قابل مشاهده است.
- با افزایش فشار، دما در طول هر کانال یکنواخت تر بنظر می‌رسد این مطلب از مقایسه عکس‌های لحظه T7 در سه فشار قابل درک است.

برای درک بهتر و تحلیل دقیقتر، نمودار دمایی بدست آمده از سه فشار رسم و با هم مقایسه شد. سه کانتور دمایی بدست آمده از این قطعه در لحظه T7 با هم مقایسه شد. خطی عمود بر کانال‌ها در دو سانتی متری انتهایی رسم و نمودارهای بدست آمده از این خطوط را با یکدیگر مقایسه کرد.

در شکل ۳ نمودارهای دمایی بدست آمده از این خط فرضی در سه فشار بر هم منطبق شده است. کانال‌ها در این نمودارها و در هر سه فشار به راحتی قابل تشخیص هستند. چهار قله دمایی در هر فشار تغییرات دمایی عمود بر هر کانال را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق کانال دما کاهش یافته است همچنین در هر قله دمایی با افزایش فشار تست افزایش نسبی دما مشاهده می‌شود. به طور خلاصه با مشاهده نمودارهای بدست آمده از قطعه شماره یک می‌توان گفت:

- با افزایش عمق کانال، دمایی سطحی کانال در هر سه فشار کاهش یافته است.
- افزایش فشار بخار باعث افزایش دمایی هر قله شده است، چراکه سرعت بالاتر سیال در فشار بالاتر منجر به انتقال حرارت همرفتی بیشتری به سطح کانال خواهد شد.
- افزایش فشار بخار باعث شده که منطقه بیشتری از اطراف کانال متأثر از حرارت شود، این موضوع در عمق ۴ میلی‌متر وضوح بیشتری دارد، با دقت در نمودارها در قله چهارم مشاهده می‌شود که با افزایش فشار بخار، دامنه قله افزایش یافته است.

می‌شود.

- در هر زمانی بیشترین دما مختص نزدیکترین کانال به سطح و کمترین دما متعلق به دورترین کانال تا سطح قطعه است.

- افزایش فشار باعث می‌شود که زمان تشخیص کانال‌ها کم شود. در صورت مقایسه سه فشار در زمانی ثابت، افزایش سطح دمایی با افزایش فشار مشاهده می‌شود.

- افزایش فشار باعث می‌شود که دما در طول کانال یکنواخت‌تر شود و شیب نمودار طولی کم شود.

- افزایش عمق باعث کاهش اثر فشار بخار می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] C. Meola, G. M. Carlomagno, M. Difoggia, O. Natale. 2008, "Infrared thermography to detect residual ceramic in gas turbine blades ", Material Science & Processing, 685–691.
- [2] A. Kulaszka, J. Blachnio. 2013, "Analysis of applicability of thermography to assess health of gas turbine blades", Journal of Kones Powertrain and Transport.
- [3] J. Blachnio. 2013, "Analysis of technical condition assessment of gas turbine blades whit non-destructive methods", Acta Mechanica et Automatica.
- [4] M. Goldammer, W. Heinrich. 2006, "Active Thermography for Dimensional Measurements on Gas Turbine Components", ECNDT.
- [5] H. Lio, M. Sakamoto, M. Difoggia, O. Natale. 2003, "Detection of Defects in Thermal Barrier Coatings by Thermography Analyses", Materials Transactions, 1845–1850.

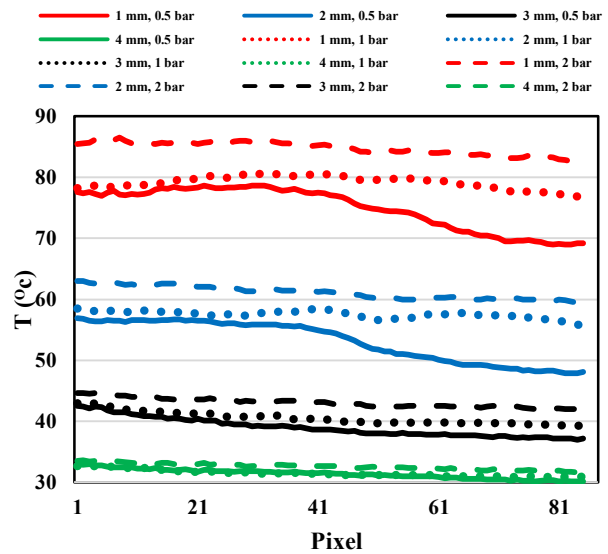


Fig 4 Temperature distribution on prependicular path in Ø3-Ss304 at 3 different pressures.

شکل ۴ توزیع دما در مسیر عمود بر کانال‌های Ø3-Ss304 در سه فشار

#### ۴- نتیجه‌گیری

- با استفاده از روش ترموگرافی و تکنیک استفاده از بخار آب به عنوان محرک دمایی به راحتی می‌توان کانال‌های موجود در قطعه را در هر ۴ عمق تشخیص داد.

- در هر سه فشار بخار استفاده شده نه تنها می‌توان کانال‌ها را تشخیص داد بلکه به وضوح اختلاف ۱ میلی‌متری عمق آنها قابل تمایز است.