

## تعیین تجربی طول ترک در یک نمونه محل اتصال پره به دیسک در توربین گاز به کمک آزمون فراصوتی آرایه فازی

محمدحسین سورگی<sup>1\*</sup>، حسین صحاف نائینی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16765-1719، mh\_soorgee@sbu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 21 بهمن 1396  
پذیرش: 07 اردیبهشت 1397  
ارائه در سایت: 27 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

آزمون غیرمخرب فراصوتی  
آرایه فازی  
توربین گاز  
محل اتصال پره به دیسک

### چکیده

ماشین‌های دوار، به خصوص توربین‌های گازی و کمپرسورهای محوری، نقش بسیار حیاتی و مهمی را در صنایع تولید و انتقال انرژی ایفا می‌کنند؛ لذا، باید به‌موقع نسبت به تشخیص و تعیین اندازه عیوب احتمالی در آن‌ها اقدام شود، تا از بروز هزینه‌های بسیار سنگین تعمیرات جلوگیری به عمل آید. در مقاله حاضر، یک نمونه محل اتصال پره به دیسک توربین گاز، که از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌های یک توربین گاز می‌باشد، به کمک روش آزمون غیرمخرب فراصوتی آرایه فازی مورد بازرسی قرار گرفته است. در نمونه ساخته شده، طی دو مرحله، ترک‌هایی با طول‌های 4 و 8 میلی‌متر ایجاد شده و تأثیر طول آن بر نتایج بازرسی، مورد ارزیابی واقع شده است. مقایسه سیگنال‌های دریافتی در زوایای مختلف برای هر طول ترک، با سیگنال دریافتی از نمونه سالم در همان زوایا، به عنوان مقیاس و شاخصی برای تعیین طول ترک مورد استفاده قرار گرفته است. از افزایش دامنه سیگنال ناشی از ترک و کاهش دامنه سیگنال مربوط به دیواره پشت ترک، به ازای افزایش زاویه در آزمون فراصوتی آرایه فازی برای استخراج شاخصی جدید جهت تعیین طول ترک استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با استفاده از شاخص استخراج شده، می‌توان طول ترک موجود در محل اتصال پره به ریشه روی دیسک روتور توربین را، که دارای هندسه پیچیده کاجی شکل می‌باشد، با خطای کمتر از 10% تخمین زد.

## Experimental crack length evaluation in a gas turbine blade-disc connection using phased array ultrasonic testing

Mohammad Hossein Soorgee\*, Hossein Sahhaf Naeini

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16576-1719, Tehran, Iran, mh\_soorgee@sbu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 February 2018  
Accepted 27 April 2018  
Available Online 17 May 2018

#### Keywords:

Ultrasonic Non-Destructive Testing  
Phased Array  
Gas Turbine  
Blade-Disc Connection Area

### ABSTRACT

Turbomachinery, specially gas turbines and axial compressors, play an important and vital role in energy producing and transmission industries. Thus, probable defects must be detected and measured in a timely manner, in order to prevent expensive costs of repair and maintenance. In this paper, a gas turbine blade-disc connection model, that is one of the most important and sensitive gas turbine parts, has been inspected using phased array ultrasonic non-destructive testing method. In manufactured mockup specimen, a crack with 4 and 8 millimeters length, has been created in two steps, followed by the length effect study on inspection results. Comparison of acquired signals in different angles for each crack length with acquired signals got from the healthy model in the same angles, has been employed for crack sizing purposes. The increase in the amplitude of crack reflected signals and the decrease in the amplitude of signals related to the wall behind the crack versus increase in the inspection angle, in ultrasonic phased array testing, has been utilized for extracting a novel feature for crack length estimation. Experimental results show that it is possible to evaluate the crack length in the complicated fir-tree geometry of the disc connection area to the blade, with the amount of error less than 10%, using the extracted feature.

### 1- مقدمه

نیروگاه‌ها، ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، پالایشگاه‌ها پتروشیمی‌ها و صنایع گوناگونی که نیازمند انرژی هستند، کاربرد کلیدی دارند؛ به گونه‌ای که، هرگونه نقص و آسیب موجود در هریک از اجزای این ماشین‌ها، که منجر به توقف کل توربین یا توربوکمپرسور شود، هزینه‌های هنگفت تعمیرات و راه‌اندازی مجدد و نیز زیان ناشی از عدم بهره‌برداری از مجتمع صنعتی مرتبط

ماشین‌های دوار محدوده وسیعی از کاربرد را در صنعت شامل می‌شوند و در این حوزه نقش وسیعی را ایفا می‌نمایند. در این بین به توربین‌ها و کمپرسورهای محوری می‌توان اشاره نمود، که از جمله ماشین‌آلات پرکاربرد و گران‌بها در تولید و انتقال انرژی می‌باشند [1,2]. این ماشین‌های دوار در انواع

[18]. همچنین مولس و همکاران در سال 2005 مروری بر تکنیک‌های کاربردی آزمون آرایه فازی در بازرسی جوش مخازن تحت فشار و لوله انجام داده و در انتها نشان داده‌اند که بازرسی به روش آرایه فازی الزامات استانداردهای طراحی مخازن تحت فشار مانند ASME Sec. VII را برآورده می‌سازد [19]. ساتیانارایان و همکاران در سال 2007 به شبیه سازی روش آرایه فازی و مطالعه عددی پارامترهای مختلف این آزمون پرداخته‌اند [20]. ژو و همکارش در سال 2012، با به انجام رساندن شبیه‌سازی و آزمون تجربی، اجزای دارای گوشه را به روش آزمون فراصوتی آرایه فازی مورد بازرسی قرار داده است. آن‌ها با بهبود روش تفاضل محدود در حوزه زمان، حرکت موج فراصوتی را در یک محیط دولایه، شبیه سازی و مدل اجزای دارای گوشه را به روش آرایه فازی بازرسی نموده‌اند. سپس شبیه سازی انجام شده را با پیاده‌سازی بر روی یک بستر تجربی از جنس آلومینیوم صحت سنجی کرده اند [21]. یاره‌ای و همکارانش در سال 2016، به منظور بهبود تراگذارهای آرایه فازی، با انجام شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود، به بهینه سازی پارامترهای هندسی و تأخیرات زمانی در تحریک المان‌های پیزوالکتریک پرداخته است [22]. حجت و همکاران در همان سال، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی یک تراگذار آرایه فازی خطی در فرکانس پایین را مورد بررسی قرار داده و آن را به مرحله ساخت و مونتاژ رسانده‌اند [23]. وی و همکارانش مجدداً در همان سال، به بررسی پارامترهای هندسی یک تراگذار آرایه فازی خطی با تعداد 8 المان پیزوالکتریک، مانند عرض و ضخامت المان‌ها، فاصله بین آن‌ها و همچنین فرکانس کاری مناسب و ولتاژ تحریک المان‌ها و تأثیر آن‌ها بر فشار آکوستیکی ناحیه تمرکز با استفاده از روش عددی پرداخته است [24]. از موارد مهم در بازرسی به روش آرایه فازی، تعیین اندازه عیب است که در برخی پژوهش‌ها بدان پرداخته شده است. روش‌های مرسوم تشخیص اندازه عیب در آزمون فراصوتی روش‌های افت 6db و 20db هستند که در مراجع مختلف مانند [10, 25] معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما این روش‌ها در خصوص سازه‌های با هندسه پیچیده، دارای خطا می‌باشند که منجر به تحقیق بیشتر روی روش‌های تخمین اندازه عیب شده است. از جمله ژاکونس و همکاران در سال 2003 با استفاده از میانی روش TOFD به کمک تراگذار آرایه فازی، یک تکنیک جدید برای تخمین اندازه ترک قائم ارائه کرده‌اند [26]. ناردونی و همکاران (2008) با استفاده از انعکاس ناشی از پدیده پراش به تعیین نوع عیب، از حیث حجمی یا خطی بودن، پرداخته و نشان داده‌اند که از سیگنال ناشی از پدیده پراش نوک ترک می‌توان برای تعیین اندازه ترک در آزمون آرایه فازی بهره جست [27].

نظر به اهمیت تعیین طول ترک در بازرسی نشیمن‌گاه ریشه کاجی شکل پره توربین گاز، در این مقاله به بررسی تجربی تشخیص وجود و اندازه یک ترک، در محل نصب پره به دیسک یک روتور توربین پرداخته شده است. در این پژوهش ابتدا هندسه دیسک‌های توربین V94.2 که از پرتیراژترین توربین‌های مورد استفاده در صنعت برق کشور است، مورد بررسی قرار گرفته و پس از امکان‌سنجی استفاده از روش آرایه فازی برای تشخیص طول یک ترک مایل در محل نصب پره، ریشه کاجی شکل، یک ماکت آزمایشگاهی مشابه هندسه محل نصب ساخته شده، و با انجام تست‌های متعدد به روش آرایه فازی و تغییر طول ترک، یک شاخص مناسب برای تشخیص و تخمین طول ترک استخراج شده است.

## 2- آزمون فراصوتی آرایه فازی

در آزمون متداول فراصوتی، با استفاده از یک تراگذار<sup>2</sup> که متشکل از چند

را به دنبال دارد [3-6]. لذا تشخیص به موقع انواع عیوب محتمل در هریک از اجزای ماشین‌آلات دوار و نیز تخمین شدت، اندازه و موقعیت عیب از اهمیت بسزایی برخوردار است [7]. تحقیقات متعددی در خصوص تعیین عیوب مختلف در توربین‌ها و توربوکمپرسورها انجام شده است [8-10].

از جمله بخش‌های مهم هر توربین محوری، دیسک متصل به روتور است که پره‌های توربین نیز بر روی آن نصب می‌شود. وجود هرگونه عیب در دیسک‌ها، نظیر ترک، لهیدگی و یا خوردگی، می‌تواند منجر به ارتعاشات روتور، نابالانسی و نهایتاً توقف توربین و بروز حوادث فاجعه باری گردد [11]. در مواردی، از جمله بخش‌های مهم دیسک‌ها، محل نصب پره به دیسک به صورت اتصال کشویی می‌باشد. با توجه به هندسه پیچیده محل نصب پره به دیسک، و بارهای حرارتی و مکانیکی مختلف و متغیر اعمالی به این بخش [12] حین کارکرد توربین، احتمال ترک خوردن این ناحیه وجود دارد؛ لذا باید بتوان به کمک روش‌های مناسب، از وجود یا عدم وجود ترک در قسمت اتصال پره به دیسک اطمینان حاصل نمود. شایان ذکر است که اهمیت بازرسی محل اتصال پره به دیسک در روی دیسک، از بازرسی خود پره بیشتر است؛ زیرا، در صورت آسیب پره، می‌توان یک عدد پره را تعویض نمود اما در صورت آسیب دیدن محل اتصال پره به دیسک در روی دیسک، امکان جدایش پره بالا رفته و سبب شکست سایر پره‌ها و خسارات فاجعه‌باری می‌شود [13]؛ لذا، در این صورت کل دیسک نیاز به تعمیر و یا تعویض دارد.

آزمون‌های غیرمخرب<sup>1</sup> مجموعه‌ای از روش‌ها هستند که برای تشخیص عیوب مختلف در قطعات، مورد استفاده قرار می‌گیرند. آزمون‌های فراصوتی، مایع نافذ، ذرات مغناطیسی، پرتونگاری، جریان گردابی، نشر آوایی و ترموگرافی از جمله آزمون‌های مرسوم غیرمخرب می‌باشند که در [14] به تفصیل معرفی شده‌اند. هریک از این آزمون‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های مخصوص به خود است که در [15] اشاره گردیده است. نکته مهم در انتخاب و استفاده از یک روش آزمون غیرمخرب برای یک کاربرد خاص (مثلاً بازرسی محل نصب پره توربین) قدرت تشخیص وجود عیب و نیز اندازه آن است. اهمیت اندازه ترک بدان جهت است که روش و برنامه تعمیراتی اتخاذ شده برای قطعه معیوب تابع شدت (اندازه) عیب است. برای بازرسی محل نصب پره روی دیسک روش‌های مایع نافذ، و ذرات مغناطیسی تنها در حد تشخیص وجود ترک سطحی در هندسه پیچیده محل مذکور کارایی دارند، اما از عمق ترک اطلاعاتی بدست نمی‌دهند. روش جریان گردابی می‌تواند برای تشخیص عیوب سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد و در خصوص ترک‌های عمیق کارایی ندارد [16]. روش‌های پرتونگاری و فراصوتی می‌توانند برای تشخیص عمق ترک استفاده شوند که پیاده‌سازی روش پرتونگاری برای دیسک یک توربین هزینه بر و طاقت فرساست و لذا روش فراصوتی گزینه مناسبی برای تشخیص عمق عیب می‌باشد. از جمله روش‌های نوین فراصوتی، روش آرایه فازی است که برای بازرسی هندسه‌های پیچیده و تشخیص اندازه و محل عیوب کارایی مناسبی دارد.

روش آرایه فازی توسط محققین متعددی به منظور بازرسی اجزای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. سانگ و همکاران در سال 2002 با بکارگیری یک سیستم فراصوتی آرایه فازی پزشکی و اعمال تغییرات در آن، یک سیستم بازرسی برای اجزای نیروگاه هسته ای ساخته و سپس با ساخت یک ماکت پره توربین، به بازرسی آن پرداخته و صحت کار سیستم را ارزیابی نموده اند [17]. پرد در سال 2004 یک سیستم فراصوتی آرایه فازی را برای بازرسی جوش اصطکاکی آلومینیوم به صورت برخط پیاده سازی کرده است

<sup>2</sup> Transducer

<sup>1</sup> Non-Destructive Testing (NDT)

است، در نمونه تست نیز، بازرسی محل ریشه از زیر آن انجام می‌گیرد. لذا برای سادگی، شکل 4 به صورت دوران یافته به میزان 180 درجه ارائه شده

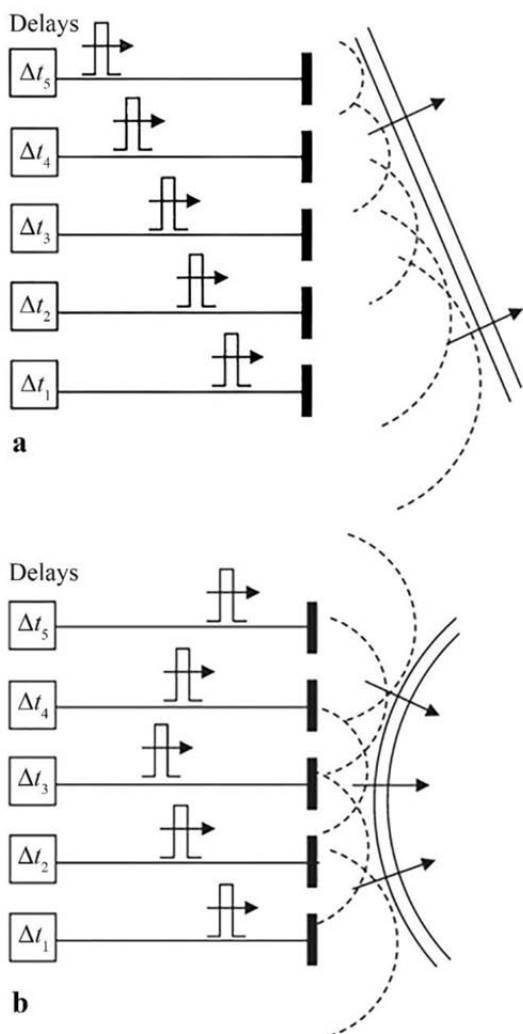


Fig. 1 Time delay pattern for producing angular (a) and focused (b) beam in ultrasonic phased array testing [28]

شکل 1 الگوی تأخیرات زمانی برای ایجاد موج زاویه‌ای (a) و متمرکز (b) در آزمون فراصوتی آرایه فازی [28]

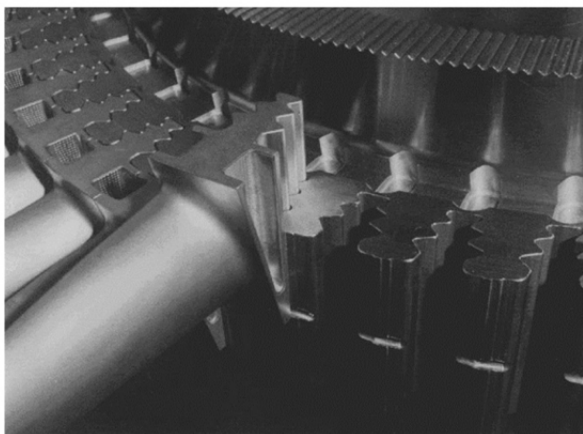


Fig. 2 A gas turbine disc and fir tree blade roots [29]

شکل 2 یک دیسک پره توربین گاز و ریشه کاجی پرها [29]

جزء، از جمله المان پیزوالکتریک<sup>1</sup> است، می‌توان در قطعه مورد آزمون، امواج مکانیکی با فرکانس‌های بالاتر از محدوده شنوایی ایجاد نمود. این موج که به وسیله اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی به پیزوالکتریک ایجاد می‌شود، در قطعه منتشر شده و پس از برخورد به عیوب داخل آن، بخشی یا تمام موج ارسالی به تراگذار باز می‌گردد. به دلیل وجود خاصیت پیزوالکتریکی، موج دریافتی در تراگذار مجدداً به اختلاف پتانسیل و سیگنال الکتریکی تبدیل شده و می‌تواند در تحلیل نتایج و ارزیابی سلامت قطعات مورد استفاده قرار گیرد.

در آزمون فراصوتی آرایه فازی، تراگذار مورد استفاده به جای یک المان، از تعداد زیادی المان پیزوالکتریک بسیار کوچک، که عمدتاً به صورت یک بعدی و در راستای یک خط کنار یکدیگر چیده شده اند، تشکیل شده است. تعداد بالای المان‌ها، این امکان را به دستگاه‌های آزمون فراصوتی آرایه فازی می‌دهد که با اعمال تأخیر زمانی معین در هنگام تحریک هر یک المان‌ها، موج تولیدی را در زوایای مختلف و یا به صورت متمرکز منتشر نمایند (شکل 1). با استفاده از انتشار موج در زوایای مختلف می‌توان، در لحظه، سیگنال‌های دریافتی از یک بازه زاویه‌ای وسیع را دریافت و مشاهده نمود. سیگنال‌های دریافتی در این روش، عمدتاً به شکل روبش‌قطعی<sup>2</sup>، به نمایش در خواهد آمد. از مزایای این آزمون نسبت به آزمون متداول فراصوتی، سرعت بالای انجام آن و قابلیت بازرسی هندسه‌های پیچیده خواهد بود [28].

### 3- تعریف مسأله

در پژوهش حاضر، هندسه یک نمونه محل اتصال ریشه پره به دیسک، که متعلق به توربین گاز V94.2 می‌باشد، برداشت شده است. نمایی از یک دیسک مورد استفاده در این نوع توربین و محل اتصال پره‌ها روی دیسک در شکل 2 قابل مشاهده می‌باشد. کلیه آزمون‌ها و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، بر اساس مدل ساخته شده از این نوع ریشه، صورت گرفته است. در شکل 3 هندسه دیسک مذکور در دو نما، به همراه جزئیات آورده شده، که مطابق آن به دلیل وجود فرورفتگی در قسمت میانی دیسک، امکان بازرسی از زیر ریشه پره‌ها، ممکن شده است. تراگذار آرایه فازی را می‌توان همراه با کفشک<sup>3</sup> مناسب بازرسی، در محلی که به رنگ سیاه مشخص شده است قرار داد.

هندسه دیسک معرفی شده، برای تولید قطعه آزمون استفاده شده است. این قطعه پس از مدل‌سازی سه بعدی در نرم‌افزار سالیدورکس<sup>4</sup>، به روش برش با دستگاه وایرکات<sup>5</sup>، تولید شده است (شکل 4). پس از انجام آزمون بر روی قطعه بدون ترک، در یک مرحله، یک ترک به طول 4 میلی‌متر و در مرحله بعد ترک دیگری به همان طول در ادامه ترک قبلی، یعنی در مجموع یک ترک به طول 8 میلی‌متر، ایجاد شده است. ترک‌ها نیز به روش وایرکات و با ضخامت 0.35 میلی‌متر به وجود آمده‌اند.

از نکات مهم ساخت نمونه برای تست، انتخاب محل تعبیه ترک است که بر اساس تحلیل ترموالاستیک دیسک در محل بیشینه تنش در دیسک، بر اساس روش ارائه شده در [10] انتخاب شده است.

نکته قابل توجه دیگر این است که، با توجه به اینکه بر اساس شکل 3، محل قرارگیری تراگذار آرایه فازی در زیر ریشه کاجی شکل روی دیسک

<sup>1</sup> Piezoelectric  
<sup>2</sup> Sectorial Scan (S-Scan)  
<sup>3</sup> Wedge  
<sup>4</sup> Solidworks  
<sup>5</sup> Wire cutting (EDM)

است که از 20 تا 70 درجه در این آزمون تغییر می‌کند. اساس تعیین طول ترک در این پژوهش، بررسی دامنه دو موج بازگشتی از لبه پایین ریشه کاجی شکل و سطح ترک است. (راستای خط 6)

در روش مرسوم افت 6db برای تعیین طول ترک، روال کار بدین صورت است که زاویه متناظر با مقدار بیشینه پژواک از ترک استخراج گشته و سپس زاویه‌ای که در آن دامنه پژواک ناشی از ترک نسبت به حالت بیشینه نصف شده است (که بر مبنای واحد دسی بل به معنی افت 6db است) نیز استخراج گشته و این زاویه به عنوان محل راس ترک در نظر گرفته می‌شود. در بازرسی نشیمنگاه پره توربین، با توجه به هندسه پیچیده و پژواک‌های ناشی از لبه‌های کاجی شکل و نیز واگرایی پرتو و سایر عوامل موثر در شکل‌گیری میدان بازتابش از عیب و سطوح خود ریشه پره، روش افت 6db در تعیین طول ترک با چالش‌هایی همراه است که نتایج آن در ادامه ارائه می‌گردد.

#### 4- شرح بستر آزمون تجربی و تجهیزات

بستر انجام آزمون تجربی، که شامل قطعه آزمون مطابق شکل 4، دستگاه آزمون فراصوتی آرایه فازی، تراگذار و کفشک بوده، در شکل 5 قابل مشاهده می‌باشد. قطعه در اولین مرحله از آزمون، سالم (بدون ترک) بوده و در دو مرحله بعد دارای ترک به طول‌های 4 و 8 میلی‌متر و به ضخامت 0.35 میلی‌متر می‌باشد.

به منظور انجام این آزمون، از دستگاه آرایه فازی شرکت سوناتست<sup>1</sup> انگلستان، مدل وی‌ای‌او<sup>2</sup>، استفاده گردیده است. تراگذار مورد استفاده دارای 32 المان پیزوالکتریک بوده که 16 المان آن در هنگام تحریک و تولید موج و همه 32 المان آن در هنگام دریافت سیگنال موج بازگشتی استفاده شده است. روش مورد استفاده در این آزمون، روش ارسال-دریافت<sup>3</sup> می‌باشد. این المان‌ها در فرکانس 10 مگاهرتز تحریک می‌شوند. به این تراگذار، کفشک ایجاد موج برشی 45 درجه متصل گردیده است.

#### 5- نتایج آزمون تجربی

##### 1- تصاویر روبش قطاعی دستگاه

همان‌طور که در بخش معرفی آزمون آرایه فازی بیان شد، خروجی اصلی



Fig. 5 Experimental testing environment: Test specimen, Phased array ultrasonic instrument, Transducer, Wedge

شکل 5 بستر آزمون تجربی: قطعه آزمون، دستگاه آزمون فراصوتی آرایه فازی، تراگذار، کفشک

است و نقطه 1 در شکل 4-a در واقع پایین‌ترین نقطه در پره و دیسک اصلی است. محل ترک در شکل 4-a مشخص است.

برای بازرسی قطعه، می‌بایست تراگذار آرایه فازی در محل مناسب روی قطعه قرار گیرد که بیشترین انعکاس از لبه‌های ریشه کاجی شکل در حالتی رخ می‌دهد که پرتو تابیده شده عمود بر وجه محل کاجی شکل باشد. برای این مساله، خط شماره 4 در شکل 4-a عمود بر قسمتی از ریشه کاجی شکل است که آن را قطع کرده است و محل مناسب تراگذار این‌گونه انتخاب شده است. زاویه ( $\theta$ ) در شکل 4-b نشان دهنده زاویه ارسال موج به درون قطعه

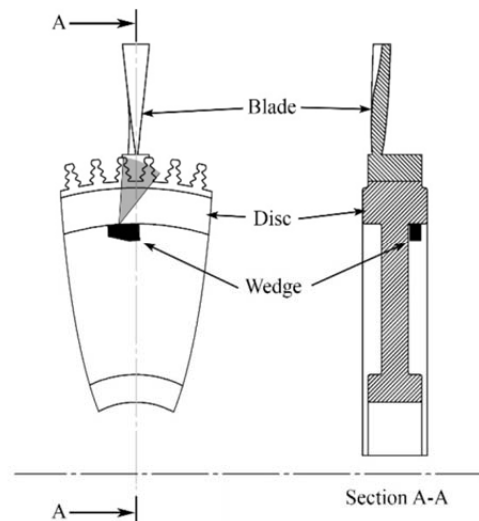


Fig. 3 2D views of gas turbine disc geometry and connected blade

شکل 3 نمای دو بعدی از هندسه دیسک توربین گاز و پره متصل به آن

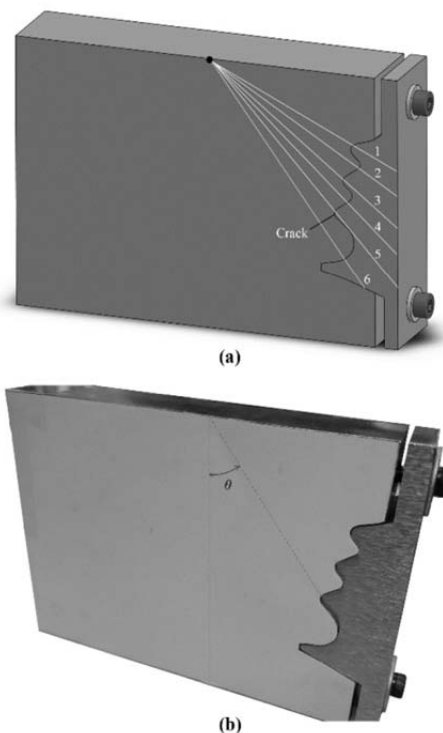


Fig. 4 (a) Model of test specimen in 3D modeling software, (b) Built test specimen

شکل 4 (a) مدل قطعه آزمون در نرم‌افزار مدل‌سازی سه بعدی، (b) قطعه آزمون ساخته شده

<sup>1</sup> Sonatest  
<sup>2</sup> Veo  
<sup>3</sup> Pulse-Echo

مرکز تراگذار از محل ترک، طول ترک 6.3 میلی متر تخمین زده می شود که دارای بیش از 50 درصد خطا می باشد. لذا شاخص دیگری با ترکیب پژواک دیواره پستی و پژواک ترک مد نظر قرار می گیرد. در استخراج این شاخص، از سیگنال های دریافتی از دستگاه استفاده می شود.

5-2- سیگنال های دریافتی از دستگاه

سیگنال های دریافتی در تمامی زوایا (بازه 30 تا 70 درجه) از نمونه سالم و نمونه با دو طول ترک مختلف (جمعاً 3 طول)، به صورت منحنی های دامنه برحسب مسافت طی شده موج، بدست آمده است. این سیگنال ها برای 4 زاویه انتخاب شده در شکل 7 قابل مشاهده است.

5-3- استخراج شاخص جهت تعیین طول ترک

همان طور که در تصاویر روبش قطاعی مشاهده شد، انتظار می رود با تغییر زاویه  $\theta$  از 30 تا 70 درجه، در سیگنال های دریافتی، تغییراتی در دامنه هریک از پژواک های بازگشتی از نقاط 1 تا 6 ریشه، به وجود آید. همچنین این 6 پژواک، از لحاظ موقعیت مکانی روی محور افقی دارای مقادیر متفاوتی نیز می باشند. با بررسی این دو رفتار در نزدیکی محل وجود ترک (32 تا 50 درجه)، دریافت شد که ضمن افزایش زاویه  $\theta$  ابتدا دامنه پژواک نقطه 6 ( $P_6$ ) و دامنه پژواک حاصل از ترک ( $P_c$ ) هر دو دچار افزایش می شوند، اما با افزایش زاویه  $\theta$ ، دامنه پژواک نقطه 6 رو به کاهش رفته، درحالی که دامنه پژواک ترک کماکان روبه افزایش دارد. این تغییرات در شکل 7 قابل مشاهده است. این بدان دلیل است که با افزایش طول ترک، مقدار انرژی موج تابیده شده به وجه خمیده راستای نقطه 6 کاهش یافته، و طبیعتاً دامنه پژواک بازتابی نیز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، با افزایش طول ترک، میزان موج بازتابیده شده از ترک افزایش یافته، و در نتیجه دامنه پژواک بازگشتی از ترک افزایش می یابد.

این گونه تغییر به صورت افزایش و کاهش، ضمن افزایش زاویه  $\theta$ ، ایجاب می کند تا رفتار نسبت  $P_c$  به  $P_6$  با تغییرات زاویه  $\theta$  بررسی گردد (شکل 8). همان طور که مشخص شده است، این نسبت برای هریک از طول ترک های موجود، با افزایش زاویه  $\theta$ ، افزایش می یابد. همچنین، افزایش این نسبت برای

دستگاه های انجام دهنده این آزمون، تصویر روبش قطاعی می باشد که محور اصلی آن، زاویه نسبت به راستای عمودی ( $\theta$ ) و شاخصه آن، شدت امواج بازگشتی بر حسب درصد در صفحه دوبعدی قطاعی (کانتور) است. تصاویر روبش قطاعی مربوط به آزمون نمونه بدون ترک و نمونه دارای ترک 4 میلی متر، در شکل 6 مشاهده می شود.

آنچه که در بازرسی ریشه مهم است، کمی سازی نتایج آزمون فراصوتی و تصمیم گیری بر مبنای یک شاخص عددی در خصوص طول ترک است. لذا می بایست از روی تصاویر روبش قطاعی حاصله، یک شاخص کمی برای تشخیص طول ترک استخراج کرد. روش مرسوم در آزمون های بازرسی جوش به روش آرایه فازی، برای این منظور، روش اف 6db (و یا اف 20db) است که در بخش قبل توضیح داده شد. روش ارائه شده در این مقاله بررسی ابتدایی تصاویر روبش قطاعی، تعیین محدوده وجود عیب احتمالی و سپس کار بر روی سیگنال های روبش A برای استخراج شاخص می باشد که در ادامه بیان شده است.

در شکل 6-a که مربوط به حالت سالم است، در محل بزرگنمایی شده، یک اثر از لبه کاجی شکل (نقطه لبه متقاطع با خط 5 در شکل 4-a) مشاهده می گردد. برای درک بهتر، منحنی ریشه کاجی شکل بر روی تصویر دریافتی از سیستم آرایه فازی منطبق شده است. پس از اعمال ترک به طول 4 میلی متر و انجام مجدد آزمون، مطابق آنچه که در ناحیه بزرگنمایی شده در شکل 6-b مشخص شده است، در تصویر روبش قطاعی در نقطه 5 یک اثر اضافه پدیدار می شود. این اثر مربوط به سیگنال بازگشتی از ترک است. همان طور که انتظار می رفت، این اثر در زاویه ای حد فاصل دو زاویه مربوط به نقاط 5 و 6 قرار گرفته است. نکته اساسی در این خصوص این است که با توجه به اینکه ترک در امتداد یکی از لبه های ریشه کاجی شکل قرار دارد، پژواک ناشی از خود لبه و پژواک ترک با یکدیگر تداخل کرده و کار تشخیص ترک را مشکل می کنند. در صورت استفاده از روش اف 6db، برای تشخیص اندازه ترک، می بایست با دانستن مقدار بیشینه دامنه موج انعکاسی از ترک (بخش بزرگنمایی شده شکل 6-b) به دنبال محل کاهش دامنه به میزان 50 درصد بوده تا لبه ترک تشخیص داده شود. مقدار بیشینه در زاویه 43.31 درجه و نصف آن در زاویه 37.63 درجه رخ می دهد که با توجه به فاصله

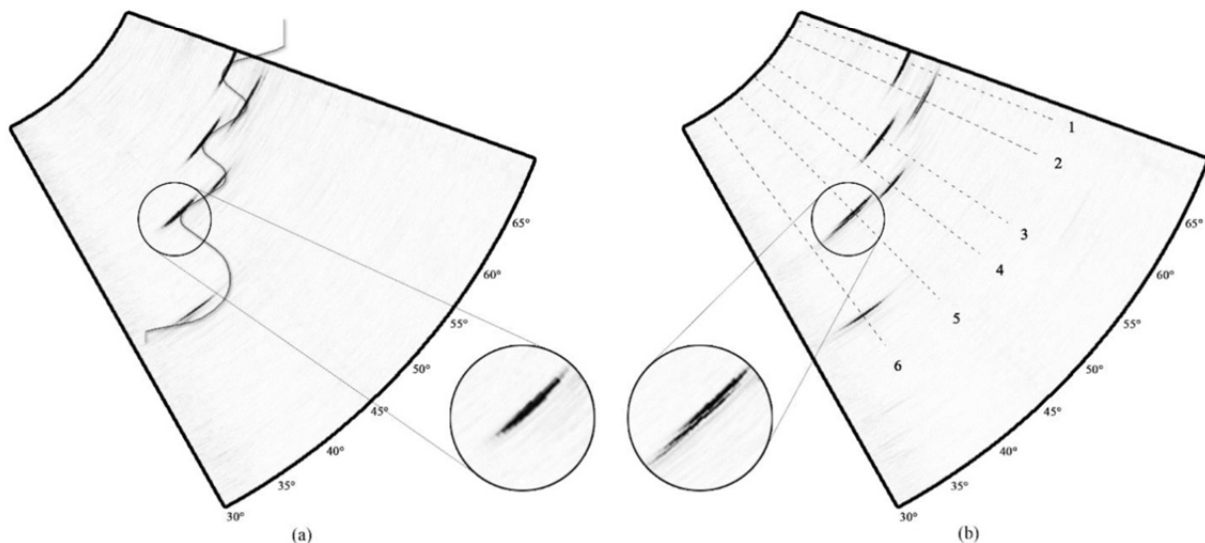


Fig. 6 S-Scan images; (a) healthy test specimen with root blade pattern, (b) specimen with 4mm crack length at point A

شکل 6 تصویر روبش قطاعی مربوط به نمونه سالم، به همراه الگوی ریشه (a) و نمونه دارای ترک 4 میلی متری در نقطه (b) A

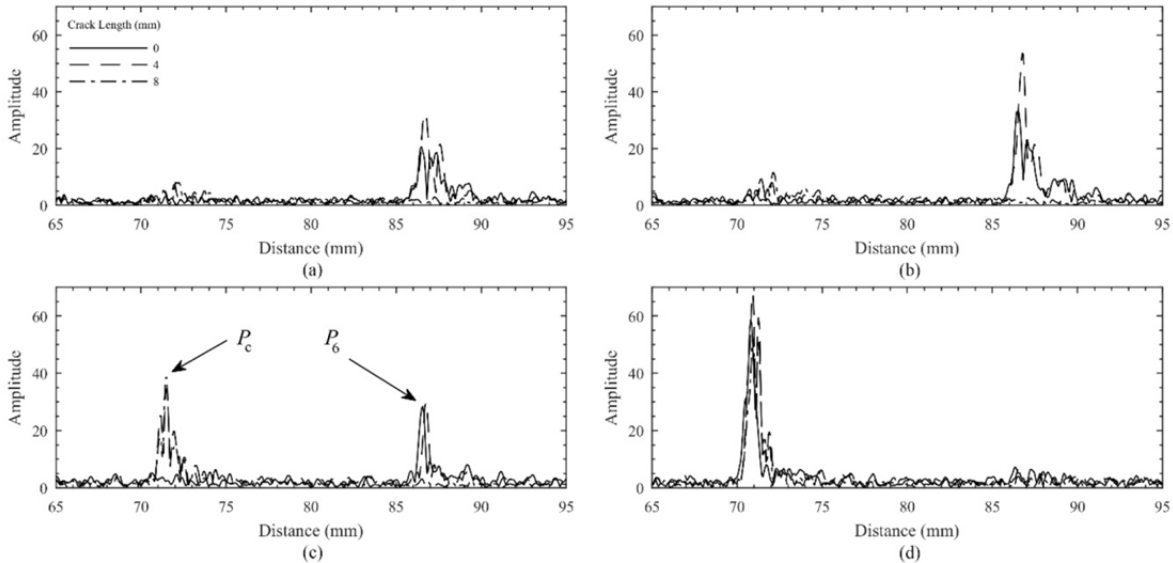


Fig. 7 Acquired signal from 3 crack lengths in 3 different angles: (a) 34.1, (b) 36.1, (c) 39, (d) 43.8 degree

شکل 7 سیگنال‌های دریافتی از 3 طول ترک در 4 زاویه مختلف: (a) 34.1, (b) 36.1, (c) 39, (d) 43.8 درجه

طول ترک را در یک هندسه پیچیده محل اتصال پره توربین، ریشه کاجی شکل، تشخیص داد.

6- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از آزمون فراصوتی آرایه فازی، به بازرسی یک مدل آزمایشگاهی از محل اتصال پره به دیسک توربین V94.2 پرداخته شده است. ابتدا بر اساس هندسه دیسک روتور توربین V94.2، امکان سنجی بازرسی محل نصب پره‌ها از حیث قرار دادن تراگذار فراصوتی انجام شده، و سپس یک مدل آزمایشگاهی بر اساس هندسه واقعی یک پره ساخته شده است. یک تحلیل ترموالاستیک به روش اجزا محدود با نرم افزار آباکوس انجام شده است و محل‌های با بیشینه تنش به عنوان محل احتمالی ایجاد و رشد ترک یافت شده اند. سپس با استفاده از آزمون آرایه فازی، روبش قطاعی محل بازرسی برای حالات سالم، ترک به طول 4 میلی‌متر و ترک به طول 8 میلی‌متر استخراج گشته است. بر اساس بررسی اولیه تصاویر روبش قطاعی، محل احتمالی وجود ترک شناسایی گشته، و بر اساس تکنیک افت 6db طول آن تخمین زده شده است که خطایی بیش از 50 درصد را به همراه داشته است. سپس از روی داده‌های روبش A، (سیگنال‌های خام در هر زاویه)، یک شاخص کمی جدید برای تعیین طول ترک استخراج گشته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با استفاده از شاخص فوق، می‌توان طول ترک را با خطای کمتر از 10% تخمین زد.

7- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر عقیل یوسفی کما و مهندس سعید ظهوری به دلیل در اختیار گذاردن دستگاه آزمون فراصوتی آرایه فازی و نیز آموزش‌های اولیه تقدیر به عمل آورند.

8- مراجع

[1] M. Tahan, E. Tsoutsanis, M. Muhammad, Z. A. Karim, Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review, *Applied energy*, Vol. 198, pp. 122-144, 2017.  
 [2] A. Chaibakhsh, S. Amirkhani, A simulation model for transient behaviour of

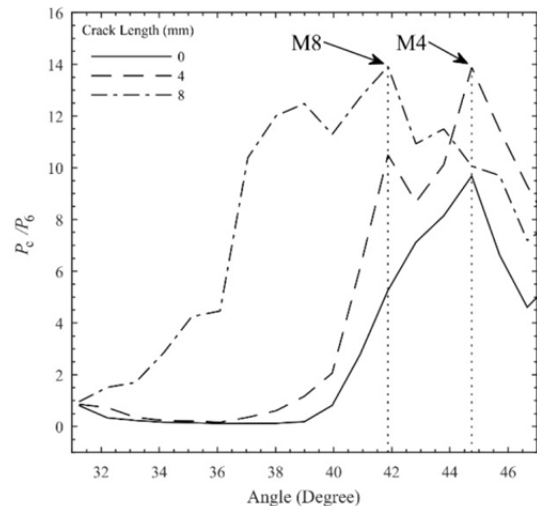


Fig. 8 Variation of  $P_c/P_6$  ratio versus beam angle

شکل 8 تغییرات شاخص نسبت دامنه‌های  $P_c/P_6$  بر حسب زاویه تابش

طول‌های ترک بزرگتر، زودتر و با شیب بیشتری رخ می‌دهد. از چنین نموداری، می‌توان به عنوان یک ابزار برای تشخیص طول ترک استفاده نمود. ملاحظه می‌گردد که با افزایش زاویه تابش  $(\theta)$ ، در ترک به طول 4 میلی‌متر، نسبت به حالت سالم، مقدار نسبت  $P_c/P_6$  شروع به افزایش کرده، که بیانگر شروع رسیدن پژواک ترک است. لازم به ذکر است که اثرات زاویه واگرایی پرتو فراصوتی در رسیدن موج به تراگذار تأثیر گذار است. مقادیر ماکزیمم نسبت  $P_c/P_6$  برای طول‌های ترک 4 و 8 میلی‌متر در شکل 8 با نقاط M8 و M4 مشخص شده است. زاویه متناظر با M4 برابر با  $44.7^\circ$  و برای M8 برابر با  $41.9^\circ$  می‌باشد. با در نظر گرفتن رأس ترک در محل تقاطع خط رسم شده از مرکز کشفش با خط راستای ترک، به عنوان تخمینی از طول ترک، بر اساس شاخص استخراج شده طول ترک‌های مذکور، به ترتیب 3.65 میلی‌متر و 7.3 میلی‌متر استخراج می‌گردد که خطای حدود 9 درصدی را به همراه دارد.

لذا با استفاده از شاخص معرفی شده، با خطای کمتر از 10% می‌توان

- array system for nondestructive tests of nuclear power plant components, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 214, No. 1-2, pp. 151-161, 2002.
- [18] C. Bird, Ultrasonic phased array inspection technology for the evaluation of friction stir welds, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 46, No. 1, pp. 31-36, 2004.
- [19] M. Moles, N. Dubé, S. Labbé, E. Ginzel, Review of ultrasonic phased arrays for pressure vessel and pipeline weld inspections, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, No. 3, pp. 351-356, 2005.
- [20] L. Satyanarayan, C. Sridhar, C. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam, Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, No. 12, pp. 716-729, 2007.
- [21] N. Xu, Z. Zhou, Numerical simulation and experiment for inspection of corner-shaped components using ultrasonic phased array, *NDT & E International*, Vol. 63, pp. 28-34, 2014.
- [22] S. Yareiee, M. R. Sayyed Noorani, A. Ghanbari, Simulation of waves propagation via linear phased array probe with improved design (in ultrasonic inspection tests), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 353-361, 2016. (in Persian فارسی)
- [23] Y. Hojjat, S. Ansari, M. R. Karafi, Present a procedure and fabrication of linear phased array ultrasonic for focusing waves in low frequency, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 47-56, 2016. (in Persian فارسی)
- [24] Y. Hojjat, S. Ansari, M. R. Karafi, Numerical study of the geometric parameters effect on acoustic pressure of focal point of a linear phased array ultrasonic transducer, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-40, 2016. (in Persian فارسی)
- [25] C. Charlesworth, Phased array ultrasonic inspection of low-pressure steam turbine rotors-curved axial entry fir tree roots, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 53, No. 2, pp. 71-75, 2011.
- [26] F. Jacques, F. Moreau, E. Ginzel, Ultrasonic backscatter sizing using phased array-developments in tip diffraction flaw sizing, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 45, No. 11, pp. 724-728, 2003.
- [27] D. Nardoni, P. Nardoni, M. Certo, G. Nardoni, Sizing in the phased array technique using diffraction and amplitude displacement, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 50, No. 10, pp. 574-578, 2008.
- [28] L. W. Schmerr, *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*, pp. 1-5, Iowa: Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2015.
- [29] M. Asadzadeh, *Gas Turbine Structure*, pp. 29, Tehran: Mapna Group Operation and Maintenance, 2013. (in Persian فارسی)
- heavy-duty gas turbines, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 115-127, 2018.
- [3] B. S. Yang, V. T. Tran, An intelligent condition-based maintenance platform for rotating machinery, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 2977-2988, 2012.
- [4] S. Qu, C. Fu, C. Dong, J. Tian, et al., Failure analysis of the 1st stage blades in gas turbine engine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 32, pp. 292-303, 2013.
- [5] S. Rani, A. K. Agrawal, V. Rastogi, Failure investigations of a first stage Ni based super alloy gas turbine blade, *International Conference on Processing of Materials, Minerals and Energy*, 2016.
- [6] A. Kolagar, N. Tabrizi, M. Cheraghzadeh, M. Shahriari, Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 8, pp. 61-68, 2017.
- [7] Y. W. Chen, G. C. Tsai, The crack of turbine blade effect on the dynamic behavior of turbine, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 2, No. 06, pp. 384, 2014.
- [8] X. Yang, S. Chen, S. Jin, W. Chang, Crack orientation and depth estimation in a low-pressure turbine disc using a phased array ultrasonic transducer and an artificial neural network, *Sensors*, Vol. 13, No. 9, pp. 12375-12391, 2013.
- [9] M. Nurbanasari, Abdurrachim, Crack of a first stage blade in a steam turbine, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 2, No. 2, pp. 54-60, 2014.
- [10] S. Yang, B. Yoon, Y. Kim, Using phased array ultrasonic technique for the inspection of straddle mount-type low-pressure turbine disc, *Ndt & E International*, Vol. 42, No. 2, pp. 128-132, 2009.
- [11] Z. Bai, S. Chen, L. Jia, Z. Zeng, Phased array ultrasonic signal compressive detection in low-pressure turbine disc, *NDT & E International*, Vol. 89, pp. 1-13, 2017.
- [12] L. Getsov, A. Semenov, I. Ignatovich, Thermal fatigue analysis of turbine discs on the base of deformation criterion, *International Journal of Fatigue*, Vol. 97, pp. 88-97, 2017.
- [13] R. Mishra, J. Thomas, K. Srinivasan, V. Nandi, et al., Failure analysis of an un-cooled turbine blade in an aero gas turbine engine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 79, pp. 836-844, 2017.
- [14] D. E. Bray, R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service*, pp. 51-550, Florida: CRC press, 1996.
- [15] J. Prasad, C. G. K. Nair, *Non-Destructive Testing and Evaluation of Material*, pp. 12-152, New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [16] P. S. Firouzabadi, A. Najafi, Development approaches of ultrasonic and eddy current non destructive inspection in gas and steam turbine, *Iranian Journal of Society of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 115, pp. 79-92, 2017. (in Persian فارسی)
- [17] S. J. Song, H. J. Shin, Y. H. Jang, Development of an ultra sonic phased