

# روش جدید پایش نوک پره توربین با استفاده از سنسور مایکروویو و الگوریتم کلاسه‌بندی K نزدیک‌ترین همسایه (k-NN)

مهدی اصلی‌نژاد<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ مریم‌السادات اخوان‌حجازی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - maslinezhad@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - mhejazi@kashanu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک سنسور مایکروویو باند k برای پایش پره توربین شبیه‌سازی و در نرم افزار CST بهینه‌سازی شده است و با استفاده از یک مدل ساده شده توربین در نرم‌افزار CST اثر قرار دادن سنسور در بدنه توربین بررسی شده است و چنانچه هر تغییر شکل در نوک تیغه و یا جابجایی در فاصله مابین نوک تیغه تا پوسته انجام گردد پارامتر پراکندگی این سنسور تغییر می‌کند و پارامتر پراکندگی بدست آمده از سنسور به عنوان اثر انگشت تیغه توربین تعریف می‌شود. در این مقاله شاخص‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پارامترهای پراکندگی میدان نزدیک سنسور مایکروویو بعنوان سیستم تشخیص خرابی نوک تیغه و همچنین الگوریتم کلاسه‌بندی k-NN برای تفسیر پارامترهای پراکندگی قابل اندازه‌گیری به منظور تعیین مقدار خرابی بعنوان روشی جدید برای پایش پره توربین ارائه گردیده است. مزیت این روش پایش برخط پره توربین با استخراج کامل شاخص‌های اندازه‌گیری ناشی از پارامترهای پراکندگی یک پره نمونه بوده و نشان داده شده است که روش طبقه‌بندی k-NN دقت قابل قبولی در شناسایی و تعیین مقدار فاصله نوک پره توربین از پوسته و تغییر شکل نوک پره دارد چراکه در این روش درصد خطا می‌تواند به زیر ۱/۸ درصد برسد.

**واژه‌های کلیدی:** سنسور مایکروویو، کلاسه‌بندی k-NN، فاصله نوک پره تا پوسته، پارامترهای پراکندگی.

## New Method for Monitoring of Turbine Blade Tip Using Microwave Sensor and k-Nearest Neighbor Classification Algorithm

Mehdi Aslinezhad<sup>1</sup>, PhD Student; Maryam Akhavan Hejazi<sup>2</sup>, Assistant Professor, *IEEE Member*

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: maslinezhad@yahoo.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email: mhejazi@kashanu.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a K band microwave sensor is simulated to monitoring of turbine blade and is optimized in CST software and And is embedded in the turbine shell and if any change in the tip of the blade or displacement at the tip clearance, the scattering parameters of this sensor is changed and the scattering parameter obtained from the sensor mounted on the crust is defined as the turbine blade fingerprint. In this paper, the measurements indices based on scattering parameters of the near field of microwave sensor as a blade tip failure detector system as well as k-NN classification algorithm for interpreting measurable scattering parameters to determine the failure amount as a new method for monitoring of turbine blade is presented. The advantage of this method is online monitoring of turbine blades with fully extracting the measuring indices due to the scattering parameters of a sample blade and It has been shown that the k-NN classification method has an acceptable accuracy in identifying and determining the amount of tip clearance and the deformation of the blade because the error rate can be reached below 1.8% in this way.

**Keywords:** Microwave Sensor, k-Nearest Neighbor classification, Tip Clearance, Scattering Parameters.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲

نام نویسنده مسئول: مریم‌السادات اخوان‌حجازی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - بلوار قطب راوندی-دانشگاه کاشان- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

## ۱- مقدمه

ایمنی توربین‌های گازی یک عامل مهم در افزایش کیفیت نیروگاه‌های گازی است. پره جزء اصلی توربین‌های گازی است و تعدادی از مطالعات گزارش داده‌اند که ۴۲ درصد از شکست‌های توربین گازی به علت خرابی پره توربین است که ناشی از خستگی، حرارت بسیار زیاد، افزایش نیروی گریز از مرکز، ارتعاشات بالا و برخورد اشیاء خارجی می‌باشد؛ بنابراین پره یک عنصر محدودکننده برای توربین‌های گازی است [۵-۱]. همچنین مابین کارایی توربین‌های گازی و فاصله مابین نوک پره تا پوسته توربین رابطه معکوسی وجود دارد و گزارش شده است که کاهش ۰/۲۵۴ میلی متر در این فاصله می‌تواند کارایی موتور را ۰/۱ درصد افزایش دهد و این فاصله همواره بایستی کنترل گردد [۶، ۷]. از آنجا که هرگونه عیب در توربین گاز و در عملیات آن عواقب سنگینی را در پی خواهد داشت، تشخیص و شناسایی عیب، یک مسئله بسیار مهم در توربین‌های گازی است و با شناسایی و تشخیص خطای به موقع و تصحیح شرایط غیرنرمال، عملیاتی دقیق، سود بالاتر و کارکردی ایمن تر به دست خواهد آمد [۸]. بسیاری از اپراتورها علاقه‌مندند که وضعیت درون توربین را بدانند، زیرا پایش سلامت پره‌های توربین در حالت عملیاتی باعث جلوگیری از هزینه‌های بیش از حد برای اورهال آن می‌شود و هزینه‌های نگهداری را کاهش و طول عمر توربین را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود اقدام سریع و به موقع برای اصلاح عیوب کوچک از گسترش آن به سایر قسمت‌های توربین گاز جلوگیری شود. در شکل ۱ تغییر شکل نوک پره و تغییر فاصله نوک پره تا پوسته توربین نشان داده شده است.



ب

الف

شکل ۱: خرابی پره توربین (الف) تغییر شکل (ب) کاهش فاصله نوک

## پره تا پوسته

تلاش‌های زیادی برای پایش و ارزیابی سلامت پره‌ها با استفاده از حسگرهای نوری، القایی، خازنی و میکروویو شده است. سنسور نوری دارای اندازه کوچک، دقت زمانی خوب، وضوح بالا و پهنای باند کافی است و اساس آشکارسازی این سنسور دریافت نور منعکس شده از نوک تیغه توربین می‌باشد. با این حال، دمای کار بالای توربین و همچنین ذرات دود و آلودگی در محیط گاز سنسورهای نوری را برای بسیاری از موتورهای هواپیما و توربین‌های گازی نامناسب می‌سازد [۱].

سنسور خازنی نیز بر پایه خازن الکتریکی ایجاد شده مابین فاصله هوایی بین پره و الکتروود نصب شده در پوسته توربین می‌باشد. این سنسور قادر به مقاومت در برابر درجه حرارت بالا بوده، منتهی درجه

حرارت بیش از حد بر خواص الکتریکی سنسور باعث نامعتبر شدن اندازه‌گیری‌ها می‌شود. همچنین به تغییرات دی‌الکتریک گاز حساس بوده و دارای پهنای باند محدودی می‌باشد.

در سنسور القایی یک مدار مغناطیسی در بدنه موتور قرار داده شده است. میدان مغناطیسی نیز به پره‌های چرخان رسیده و جریان گردابی القاء شده در پره‌های چرخان یک میدان مغناطیسی را تولید می‌کند که تحت تأثیر مدار مغناطیسی روی بدنه موتور قرار می‌گیرد و در هنگام چرخش پره مقدار فاصله تا نوک پره را پایش و اندازه‌گیری می‌کند. سنسور القایی تنها قادر به سنس مواد فرومغناطیس هستند که به ندرت در توربین‌های جدید مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۹]. سنسورهای میکروویو به محیط‌های آلوده حساس نیستند و پهنای باند کافی دارند و در برابر درجه حرارت بالا مقاوم هستند.

سنسور میکروویو بر اساس عملکرد رادارها به دو صورت عمل پایش پره‌های توربین را انجام می‌دهد، استفاده از ارسال موج پیوسته و همچنین استفاده از امواج پالسی. در روش استفاده از موج پیوسته سنسور میکروویو با ارسال امواج به سمت پره توربین می‌تواند فاصله نوک پره تا پوسته و همچنین تغییر شکل نوک آن را پایش کند. نوع سنسور و فرکانس کاری و نحوه ارسال امواج آن به موقعیت پره و سنسور نسبت به یکدیگر بستگی دارد [۱۰]. در این دو روش وقتی پره‌ها کوتاه هستند و یا فاصله آن‌ها از یکدیگر زیاد هست سیگنالی که به وسیله سنسور دریافت می‌شود حاصل سیگنال منعکس شده از روی نوک پره، روی سطح کناری پره و یا روی سطح دیسک می‌باشد. امواجی که از انعکاس ناحیه مابین پره‌ها دریافت می‌شوند به عنوان یک عنصر پارازیتی سیگنال اصلی مورد توجه قرار گرفته و مقدار S/N را کاهش می‌دهند و شرایط محیطی باعث تغییر پلاریزاسیون و افت توان دریافتی می‌گردد. در روش پالسی وقتی که سرعت زاویه‌ای پره با فرکانس پالس ارسال شده  $PRF^2$  در حالت سنکرون باشند موج الکترومغناطیس قادر به آشکارسازی رفتار نوک پره خواهد بود درحالی که خارج از رزونانس قادر به تشخیص پره نیست و تنها سیگنال مرجع را تولید می‌کند.

یکی دیگر از روش‌های پایش تیغه توربین به روش راداری نیز تصویربرداری میکروویوی می‌باشد. در این روش نیز با استفاده از تصویر اسکن شده وجود و محل عیب آشکار می‌گردد. در این روش آلودگی محیط و سرعت بالای پره باعث کاهش رزولوشن و کیفیت تصویر می‌گردد [۱۱]. انواع مختلف سنسور میکروویو برای اندازه‌گیری فاصله نوک پره تا پوسته و زمان ورود پره طراحی و توسعه داده شده است [۱۸-۱۲].

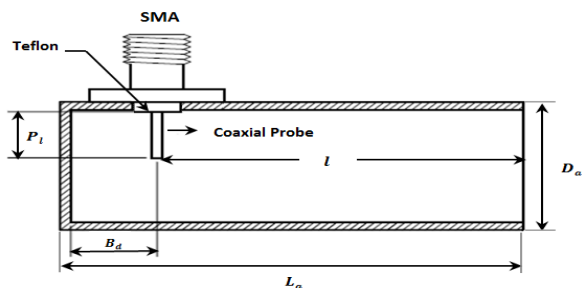
در این مقاله برای جلوگیری از انعکاس‌های ناخواسته و پارازیت ناشی از تیغه‌های مجاور، سنسور میکروویو برای یک رنج کوتاه طراحی شده است. روش پیشنهادی بر مبنای تئوری اغتشاشات جزئی در یک محفظه تشدید برای اندازه‌گیری فاصله نوک پره تا پوسته و همچنین تشخیص تغییر شکل نوک پره با استفاده از میدان نزدیک سنسور رنج کوتاه می‌باشد. در این مقاله شاخص‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پارامترهای

کواکسیال در مد  $TE_{11}$  تحریک شده است و در ناحیه میدان نزدیک راکتیو به عنوان یک سیستم رادار رنج کوتاه عمل می کند [۲۰، ۲۱]. آنتن دارای ۳ ناحیه انتشار مختلف است [۲۲]. ناحیه میدان دور، ناحیه میدان نزدیک تشعشعی و ناحیه میدان نزدیک راکتیو. مرز ناحیه میدان نزدیک راکتیو ( $R$ ) را می توان از رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$R \leq 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $D$  بزرگ ترین بعد آنتن است و  $\lambda$  طول موج است. هر چند ناحیه میدان نزدیک راکتیو معمولاً به عنوان یک ناحیه عملیاتی محسوب نمی شود، اما چون نوک پره بسیار نزدیک به پوسته قرار دارد، می تواند به عنوان یک ابزار برای تشخیص خرابی پره های توربین بکار رود.

این سنسور از دو قسمت تشکیل شده است، رزوناتور حفره ای میکروویو مدار باز با طول  $l$  و همچنین بخش انتهایی اتصال کوتاه آن با طول  $B_d$ . قطر سنسور میکروویو ( $D_a$ ) باید با ضخامت ورق پره قابل مقایسه بوده و بسیار کوچک تر از فاصله بین دو پره مجاور باشد [۲۱]. فرکانس رزونانس این سنسور ( $f_r$ ) به قطر رزوناتور موجبری ( $D_a$ )، طول موجبر ( $l$ )، طول پروب تغذیه درون موجبر ( $P_l$ ) و فاصله تغذیه تا انتهای موجبر  $B_d$  بستگی دارد (شکل ۲) [۲۳].



شکل ۲: شماتیک مداری سنسور میکروویو

سنسور میکروویو در محدوده ۲۲ تا ۲۷ گیگاهرتز در نرم افزار CST طراحی و شبیه سازی شده است. ابتدا تحلیل عددی رزوناتور حفره ای در مد غالب، فرکانس رزونانس ( $f_r$ ) و فرکانس قطع ( $f_c$ )، با حل معادلات ماکسول انجام می شود. بعد از آن با توجه به تغذیه رزوناتور با استفاده از کابل کواکسیال از دیواره بغل حفره رزوناتور، محل کابل و طول بهینه سنسور ( $L_a$ ) تعیین می شود. مؤلفه های عرضی میدان در مد  $TE_{nm}$  برای امواج در جهت  $z$  در موجبر دایره ای به شرح زیر است:

$$E_r = jH_0 \frac{nw\mu}{K_c^2 r} e^{-j\beta z} j_n(K_c r) \sin n\phi \quad (2)$$

$$E_\phi = jH_0 \frac{w\mu}{K_c} e^{-j\beta z} j'_n(K_c r) \cos n\phi \quad (3)$$

که  $K_c = q'_{nm}/a$  و  $\beta^2 = \omega^2 \mu \epsilon - K_c^2$  و  $q'_{nm}$  نشان دهنده ریشه  $m$ ام از معادله بسل ( $j'_n(n) = 0$ ) است. با انتخاب مد غالب برای رزوناتور  $TE_{11}$  مقدار  $q'_{nm} = 1.8412$  می باشد. طول موج رزونانس در موجبر دایره ای متناسب با ابعاد آن و مواد پرکننده آن است و در مد  $TE_{11}$  برابر است با:

پراکندگی میدان نزدیک سنسور میکروویو بعنوان سیستم تشخیص خرابی نوک تیغه و همچنین الگوریتم کلاسه بندی  $k$ -NN به عنوان دستگاه شناسایی الگو برای تعیین مقدار خرابی به عنوان روشی جدید که تاکنون برای پایش تیغه توربین استفاده نشده است نیز ارائه گردیده است. با توجه به آشکارسازی بر مبنای مقایسه، در این مقاله منابع خطا همچون آلودگی محیط توربین در همه حالات اندازه گیری وجود خواهد داشت و در نتیجه پایش تأثیر ندارد.

در این روش نیز پارامتر پراکندگی بدست آمده از سنسور تعبیه شده روی پوسته به عنوان اثر انگشت تیغه توربین تعریف می شود، در صورتی که هر تغییر شکل در نوک تیغه و یا جابجایی در فاصله مابین نوک تیغه تا پوسته انجام گردد پارامتر پراکندگی تغییر می کند.

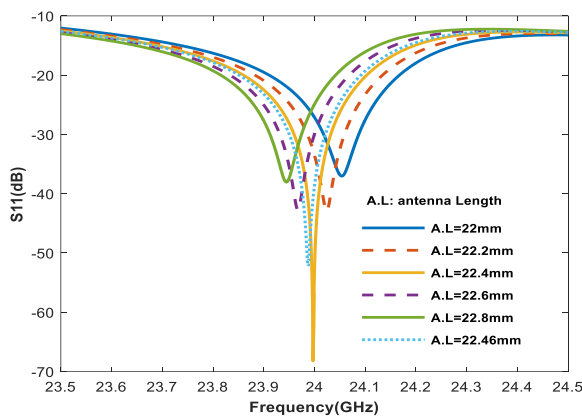
اگر ابتدا با استفاده از یک پره نمونه حالت های مختلف عیب به الگوریتم شناسایی الگو به عنوان یک سیستم خبره آموزش داده شود با استفاده از داده های استخراج شده از سنسور میکروویو می توان نوع عیب و مقدار آن را تعیین کرد. در روش پیشنهادی، الگوریتم شناسایی الگو روش  $k$ -NN است که می تواند نوع و میزان خرابی پره توربین را تعیین کند و در انتها دقت آن ارائه شده است. این مقاله در سه بخش ارائه شده است:

ابتدا یک سنسور میکروویو در میدان نزدیک برای تشخیص عیب پره با استفاده از نرم افزار CST شبیه سازی و بهینه شده است. بخش بعدی روش استخراج دامنه و فاز پارامتر پراکندگی از سنسور را مورد بحث قرار می دهد. همچنین دو شاخص برای تشخیص جابجایی نوک پره ارائه شده است. در نهایت، نوع خرابی پره توربین و میزان جابجایی نوک پره با استفاده از روش کلاسه بندی  $k$ -NN تعیین می شود [۱۹].

## ۲- طراحی سنسور میکروویو

در این بخش، طراحی، شبیه سازی و بهینه سازی یک سنسور موجبری دایروی شکل باند  $K$  انتخاب و شبیه سازی شده است. اول اینکه برای جلوگیری از تأثیر انعکاس های ناشی از تیغه استیج های مجاور بر روی سیگنال برگشتی روی سنسور قطر سنسور بایستی متناسب با عرض و ضخامت تیغه ها باشد همچنین فاصله نوک تیغه تا پوسته توربین (محل قرارگیری سنسور) معمولاً در محدوده ۵، ۰ تا ۵ میلی متر تغییر می کند، بنابراین برای اینکه سنسور بتواند در میدان نزدیک راکتیو پارامترهای پراکندگی حاصل از انعکاس های نوک تیغه که مقابل آن قرار می گیرد را ببیند، بهترین فرکانس برای بررسی پارامترهای پراکندگی در این فاصله ۲۴ گیگاهرتز است؛ همچنین با توجه به ساختار دایروی سنسور، برای جلوگیری از صدمات احتمالی به پوسته موتور به سنسوری با ابعاد کوچک تر نیاز است و فرکانس مطلوب نیز تنها با بهینه سازی ابعاد آن احراز خواهد شد که این مهم توسط نرم افزار CST با تغییر پارامتر طول و قطر سنسور انجام می شود. سنسور پیشنهاد شده شامل یک آنتن رزوناتور دایره ای میکروویو کوچک با انتهای باز است که به وسیله کابل

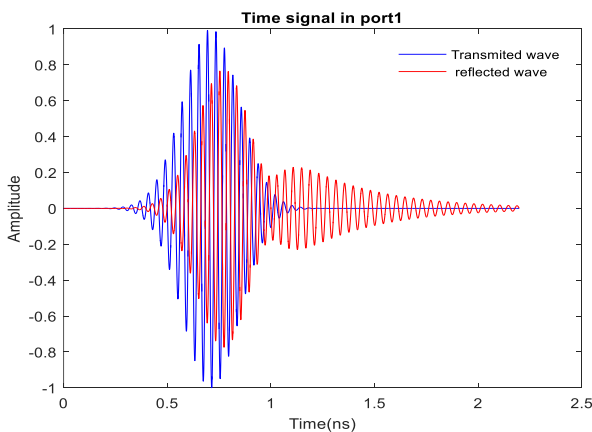
بخشی از مدار رزونانس آن است و عبور پره از مقابل میدان سنسور موجب می‌شود این مدار تنظیم مجدد گردد. برای اینکه سنسور قادر به آشکارسازی دقیق فاصله بسیار کوچک نوک پره تا پوسته و تغییر شکل نوک پره باشد، بایستی به خطاهای بسیار کوچک نیز حساس باشد. در این مقاله با توجه به اینکه پره جزء مدار رزونانس سنسور است و تغییر طول آن به عنوان تغییر فاصله پره تا سنسور محسوب می‌شود، آنالیز حساسیت نیز با استفاده از سوییپ پارامترهای قطر و طول سنسور انجام پذیرفته است و حساسیت این پارامترها نسبت به فرکانس رزونانس نیز تعیین شده‌اند. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌گردد که سنسور دارای حساسیت بسیار بالایی است یعنی اینکه به ازای افزایش ۶۰ میکرومتر در طول رزوناتور فرکانس رزونانس حدود ۱۵ کیلوهرتز کاهش می‌یابد.



شکل ۳: تغییرات پارامتر پراکندگی نسبت به تغییر طول سنسور  
موج ارسال شده که موج مرجع است دارای فاز  $\theta_0$  است و موج بازتاب شده از پره ضعیف شده و دارای یک تغییر فاز نسبت به موج مرجع است (شکل ۴) که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta_{relative} = \theta_0 + \left(\frac{2d}{\lambda}\right).2\pi \quad (8)$$

در بخش‌های بعد، با استفاده از نظریه اختلالات جزئی و شبیه‌سازی، اثرات جابجایی و تغییر شکل پره بر پارامتر پراکندگی و فرکانس رزونانس نشان داده شده است.



شکل ۴: افت ولتاژ و تغییر فاز موج بازتابی از پره نسبت به طول موج مرجع

$$\lambda_r = 1 / \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2} \quad (4)$$

که  $p$  تعداد تغییرات نیم موج میدان در جهت  $z$  است،  $l$  طول رزوناتور حفره‌ای و  $\lambda_c$  طول موج قطع است که در موجبر دایروی متناسب با قطر آن بوده و برابر است با:

$$\lambda_c = k_{nm}.D \quad (5)$$

که  $k_{nm} = \pi/q'_{nm}$  در مد  $TE_{11}$  برابر با  $1/0.76$  می‌باشد [۲۴]. بنابراین با انتخاب قطر  $10/2$  میلی‌متر برای حفره رزوناتور که متناسب با ضخامت پره است و مطابق با رابطه (۵) مقدار طول موج قطع  $\lambda_c = 17.4mm$  خواهد بود. مطابق با منحنی مد انتشار برای یک رزوناتور حفره‌ای استوانه‌ای با دی‌الکتریک هوا [۲۵] و استفاده از رابطه (۴) و با انتخاب  $\lambda_r = 0.0125m$ ، طول رزوناتور برابر  $l = 17.9mm$  می‌باشد.

در این تحقیق یک سنسور با حساسیت بالا با استفاده از موجبر دایره‌ای طراحی شده که با کابل کواکسیال بوسیله یک کانکتور SMA از دیواره کناری رزوناتور تغذیه شده است. با توجه به حضور پروب تغذیه در داخل رزوناتور، طول سنسور افزایش می‌یابد. برای بهترین تطبیق مابین رزوناتور و کابل کواکسیال، طول پروب ( $P_l$ ) و فاصله پروب از انتهای اتصال کوتاه موجبر  $B_d = \lambda_g/4$  می‌باشد [۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۳] که  $\lambda_g$  طول موج هدایت و برابر است با:

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (6)$$

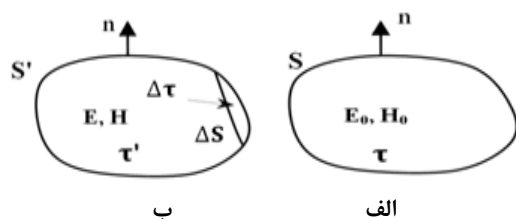
با دانستن اینکه  $f_c = 17.24GHz$  و  $f = 24GHz$  طول موج هدایت برابر خواهد بود با  $\lambda_g = 17.9mm$  و فاصله پروب از انتهای اتصال کوتاه موجبر هم برابر با  $B_d = 4.49mm$  خواهد شد؛ بنابراین طول سنسور برابر خواهد شد با:

$$L_a = B_d + l \quad (7)$$

که  $l$  طول رزوناتور است؛ بنابراین با توجه به روابط (۴)، (۶) و (۷) طول سنسور برابر با  $22/46$  میلی‌متر می‌شود. طول سنسور می‌تواند با سوییپ طول موجبر حفره‌ای در محدوده فرکانسی ۲۲ تا ۲۷ گیگاهرتز در نرم‌افزار CST بهینه شود و سوییپ تا زمانی ادامه خواهد یافت که کمترین  $S_{11}$  در فرکانس رزونانس (۲۴ GHz) بدست آید. با این شبیه‌سازی طول بهینه سنسور  $L_a = 22.4mm$  خواهد شد (شکل ۲) و مقدار  $S_{11}$  برابر با  $-70$  دسی‌بل می‌باشد، بنابراین، بهینه‌سازی طول سنسور را حدود  $0/06$  میلی‌متر کاهش می‌دهد. در شکل ۳ تأثیر پارامتر طول سنسور بر روی تطبیق امپدانس و به عبارتی بر روی مقدار پارامتر پراکندگی ( $S_{11}$ ) نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳ زمانی که طول سنسور  $22/4$  میلی‌متر است بهترین  $S_{11}$  حاصل شده و تنها با افزایش طول آن به اندازه  $0/06$  میلی‌متر علاوه بر اینکه مقدار  $S_{11}$  بدتر می‌شود، فرکانس رزونانس سنسور حدود ۱۵ کیلوهرتز نسبت به ۲۴ گیگاهرتز جابجا می‌شود.

در این تحقیق، پایش بر مبنای تجزیه و تحلیل پارامترهای پراکندگی و تغییرات فرکانس رزونانس در میدان نزدیک راکتیو سنسور است، بنابراین نوک پره در فاصله کمتر از  $\lambda/2$  از سنسور قرار می‌گیرد و پره



شکل ۶: اختلال در دیواره حفره (الف) اصلی (ب) حفره تحریک شده

ما می‌خواهیم تغییر در فرکانس رزونانس ناشی از تغییرات در دیواره حفره را تعیین کنیم. اگر  $E_0$ ،  $H_0$  و  $w_0$  نشان‌دهنده میدان و فرکانس رزونانس حفره اصلی باشند و  $E$ ،  $H$  و  $w$  نشان‌دهنده مقادیر مربوط به حفره مختل شده باشند، در هر دو مورد معادلات میدان باید اقلان شوند یعنی:

$$\begin{aligned} -\nabla \times E_0 &= jw\mu H_0 & -\nabla \times E &= jw\mu H \\ \nabla \times H_0 &= jw\epsilon E_0 & \nabla \times H &= jw\epsilon E \end{aligned} \quad (10)$$

با انجام یک سری محاسبات ریاضی به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{w - w_0}{w_0} \approx \frac{\int \int (\mu |H_0|^2 - \epsilon |E_0|^2) d\tau}{\int \int (\mu |H_0|^2 + \epsilon |E_0|^2) d\tau} \quad (11)$$

اگر  $\Delta\tau$  مقدار کمی داشته باشد، می‌توان رابطه را به صورت زیر تقریب زد:

$$\frac{w - w_0}{w_0} \approx \frac{(\bar{w}_m - \bar{w}_e)\Delta\tau}{\bar{w}_\tau} = C \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (12)$$

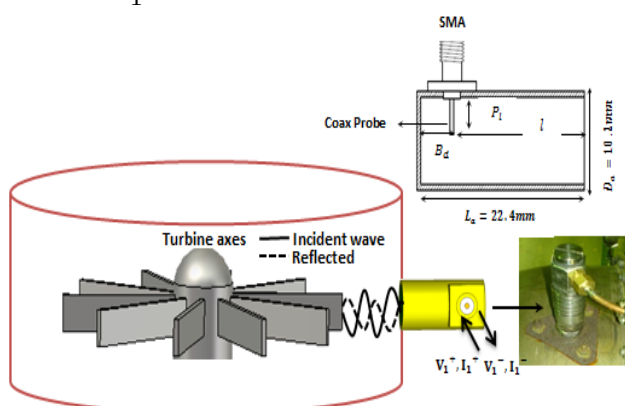
که  $\bar{w}_m$  و  $\bar{w}_e$  به ترتیب چگالی انرژی مغناطیسی و الکتریکی هستند و  $\bar{w}$  متوسط چگالی انرژی فضا می‌باشد.  $C$  تنها به هندسه حفره و شکل اختلال بستگی دارد [۲۹]. رابطه (۱۲) نشان می‌دهد که شیفت فرکانس رزونانس تابعی از  $\Delta\tau/\tau$  است. این نشان می‌دهد که تغییرات بیشتر در تغییر شکل نوک پره و همچنین تغییر موقعیت پره نسبت به سنسور تأثیر بیشتری بر تغییر فرکانس رزونانس و در نتیجه میزان پارامترهای پراکندگی دارد.

در این مقاله، برای بررسی تأثیر اندازه مقدار عیب بر روی فرکانس رزونانس با استفاده از تئوری اختلالات جزئی، پارامتر پراکندگی دو نوع خرابی یعنی تغییر فاصله نوک پره تا پوسته و همچنین شکست یا تغییر شکل پره شبیه‌سازی شده است. بنابراین، با تغییر مقدار  $\Delta\tau/\tau$  در میدان نزدیک سنسور پارامترهای پراکندگی و فرکانس رزونانس تغییر خواهد کرد و برای حالت‌های سالم و معیوب پره در یک پایگاه داده ذخیره خواهند شد. این تغییر شکل‌ها در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده‌اند. سخت‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی پره و سنسور یک سیستم کامپیوتری با ۲۵۶ گیگابایت رم، پردازنده ۱۸ هسته‌ای و فرکانس پردازش ۳/۶ گیگاهرتز است. هر شبیه‌سازی ۵ ساعت طول کشید تا تکمیل شود.

### ۳- پایش پره‌ها با استفاده از پارامترهای پراکندگی

در روش پارامترهای  $S$  (S-parameters)، پره‌های توربین به عنوان یک شبکه میکروویو یک پورتی در نظر گرفته شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. توان را می‌توان از طریق سنسور در محفظه توربین تزریق یا جذب کرد. به عبارتی سیستم طراحی شده در این مقاله فقط یک سنسور دارد که هم ورودی و هم خروجی است و موج ورودی به طور معمول توسط  $V_1^+$  و موج خروجی نیز توسط  $V_1^-$  تعیین می‌شوند در نتیجه ماتریس مدنظر فقط دارای یک عنصر است که به شرح زیر می‌باشد [۲۸].

$$S_{11} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (9)$$



شکل ۵: مدل توربین به عنوان یک شبکه n پورتی

روش پیشنهادی S-parameters بر اساس مقایسه دامنه و فاز پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده توسط آنتن حسگر باند  $K$  است. در این مقاله رویکرد مقایسه پارامترهای پراکندگی بر پایه زمان است، یعنی پارامترهای شبیه‌سازی شده با آخرین شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌شوند. در روش S-parameters پیشنهادی، مقایسه بر مبنای زمان می‌تواند به دقت مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند به صورت آنلاین استفاده شود و کاهش فاصله زمانی بین شبیه‌سازی‌ها اطلاعات بیشتری از یک توربین مشابه را به ما خواهد داد.

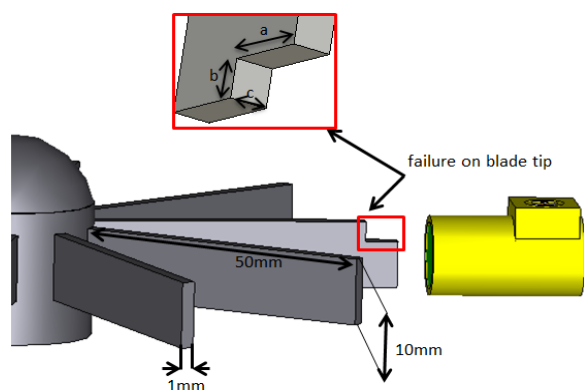
با در نظر گرفتن محفظه توربین به عنوان یک رزوناتور حفره‌ای، حساسیت پارامتر پراکندگی به جابجایی و تغییر شکل نوک پره‌های توربین توسط تئوری اختلالات جزئی در یک رزوناتور حفره‌ای قابل توجه است. رزوناتور حفره‌ای از یک فضای محصور توسط یک سطح فلز با هدایت الکتریکی بالا ساخته شده است. با توجه به شرایط مرزی حفره و به منظور آنالیز میدان‌های الکترومغناطیسی حفره و فرکانس رزونانس آن معادلات ماکسول می‌بایست حل گردند.

شکل ۶ (الف) یک رزوناتور حفره‌ای که توسط یک پوشش هادی  $S$  تشکیل و با ناحیه بدون تلف  $\tau$  محصور شده است را نشان می‌دهد. شکل ۶ (ب) تغییر شکل حفره اصلی را نشان می‌دهد به طوری که پوشش هادی  $S' = S - \Delta S$  باشد و با ناحیه  $\tau' = \tau - \Delta\tau$  محصور شده است.

سیگنال بازگشتی به حداقل می‌رسد. همچنین در شکل بالا می‌توان دید که با دور کردن پره از سنسور مایکروویو، فرکانس رزونانس تغییر کرده و دامنه پارامتر پراکندگی در همان فرکانس افزایش می‌یابد؛ اما با توجه به اینکه پره در داخل مرز ناحیه نزدیک راکتیو سنسور (۴ میلی‌متر) قرار دارد و نوک پره در حالت معمولی در فاصله ۲ میلی‌متری سنسور قرار دارد، نرخ تغییر فاز در حالت‌های کاهش و افزایش فاصله نوک پره به صورت متقارن و هم‌اندازه تغییر نمی‌یابد.

### ۳-۲- تغییر شکل و شکست در نوک پره

در شکل ۸ نوک پره شکسته که ممکن است در اثر عوامل مختلف ایجاد شود شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی مدل با نقص‌های مکانیکی در اندازه پره‌های واقعی بسیار دشوار است و نیاز به یک ابررایانه دارد؛ بنابراین ابعاد مدل مورد نظر در این شکل ۱۰ برابر کوچک‌تر از پره واقعی است.



شکل ۸: تغییر شکل نوک پره توربین شبیه‌سازی شده  
در جدول ۱ نیز فقط ۵ نوع از شکستگی‌های نوک پره ارائه شده است.

جدول ۱: اندازه و نوع تغییر شکل

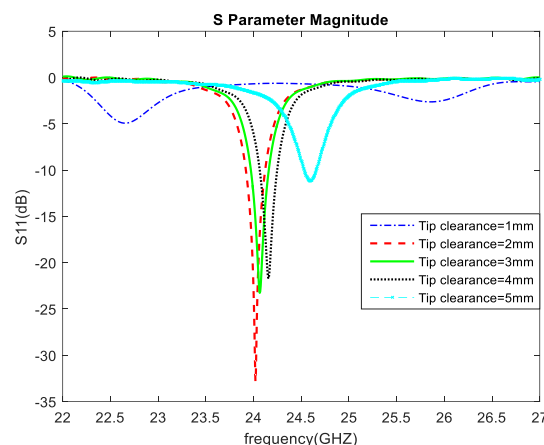
| حالت ۵ | حالت ۴ | حالت ۳ | حالت ۲ | حالت ۱ | نوع تغییر شکل                    |
|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|
| ۸      | ۶      | ۴      | ۲      | ۱      | a(mm)                            |
| ۲      | ۲      | ۲      | ۲      | ۲      | b(mm)                            |
| ۲      | ۲      | ۲      | ۲      | ۲      | C(mm)                            |
| ۳۲     | ۲۴     | ۱۶     | ۸      | ۴      | حجم تغییر شکل (mm <sup>3</sup> ) |

شکل ۹ (الف) و (ب) دامنه و فاز پارامتر پراکندگی را در این ۵ نوع تغییر شکل نشان می‌دهند. در این شبیه‌سازی، مقدار فاصله نوک پره تا پوسته تغییر نمی‌کند و برابر با ۲ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که تعداد حالت‌های تغییر شکل نوک پره توربین ۹۲ حالت است، اما برای سادگی تنها ۵ حالت نمایش داده شده است. در اینجا، مانند بخش قبلی، حالت عادی زمانی است که هیچ تغییر شکل در پره وجود ندارد و فاصله آن از سنسور ۲ میلی‌متر است. شکستگی پره می‌تواند فرکانس رزونانس را تغییر داده و با افزایش میزان شکستگی مقدار  $S_{11}$  افزایش می‌یابد.

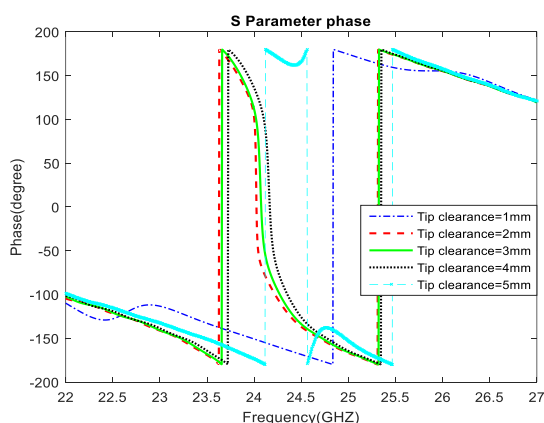
### ۳-۱- تغییر در فاصله نوک پره تا پوسته توربین

در این مقاله، داده‌ها (پارامترهای پراکندگی) در وضعیت عادی که در آن نوک پره در فاصله ۲ میلی‌متر از پوسته و سنسور قرار دارد، می‌تواند در یک پایگاه داده به عنوان یک مبنای ذخیره شوند، سپس در فواصل مشخص شده این پارامترها می‌توانند اندازه‌گیری شده و با نمونه مبنای به عنوان اثر انگشت توربین تعریف شده است، مقایسه کردند و در نهایت یک سیستم خبره می‌تواند برای تعیین خطا، نوع و میزان عیب استفاده شود.

در این تحقیق، مقدار فاصله نوک پره تا پوسته از ۰/۲ تا ۵ میلی‌متر با گام‌های ۰/۱ میلی‌متر، در ۴۹ حالت مختلف شبیه‌سازی شده است و در هر یک از این حالات دامنه و فاز پارامترهای پراکندگی استخراج شده است. در شکل ۷ (الف) و (ب) برای سادگی فقط در ۵ تا ۴۹ حالت، یعنی حالت بدون شکست که پره در فاصله ۲ میلی‌متری از پوسته است و چهار مقدار مختلف این فاصله یعنی ۱، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر نیز دامنه و فاز پارامتر پراکندگی در محدوده فرکانس دلخواه نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۷: (الف) اندازه و (ب) فاز پارامترهای پراکندگی به دلیل تغییر در فاصله نوک پره تا پوسته توربین

هنگامی که نوک پره در فاصله ۲ میلی‌متری از سنسور است، در فرکانس ۲۴ GHz تطبیق خوب بین سنسور و نوک پره وجود دارد و مقدار



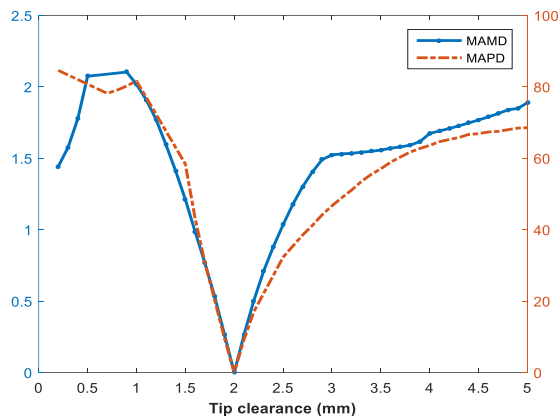
$$MAMD(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \|S_i(x) - S_i(0)\|}{N} \quad (13)$$

$$MAPD(x) = \frac{\sum_{i=1}^N |\angle S_i(x) - \angle S_i(0)|}{N} \quad (14)$$

که در آن  $|S_i(x)|$  و  $|S_i(0)|$  به ترتیب دامنه پارامتر پراکندگی در فرکانس نام در حالت  $x$  و حالت مرجع و همچنین  $\angle S_i(x)$  و  $\angle S_i(0)$  نیز به ترتیب فاز پارامتر پراکندگی در فرکانس نام در حالت  $x$  و حالت مرجع می‌باشند.

#### ۴-۱- تخمین مقدار فاصله نوک پره از پوسته

شکل ۱۰ شاخص‌های MAMD و MAPD را بر حسب تغییر فاصله نوک پره تا پوسته از ۱ تا ۵ میلی‌متر برای ۱۰۰۱ نقطه فرکانس (۲۲ تا ۲۷ گیگاهرتز) را نشان می‌دهد.

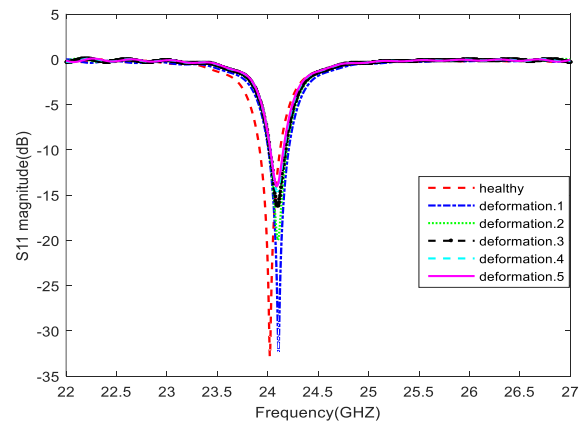


شکل ۱۰: مقادیر MAMD، MAPD بر حسب تغییرات فاصله نوک پره تا پوسته شبیه‌سازی شده

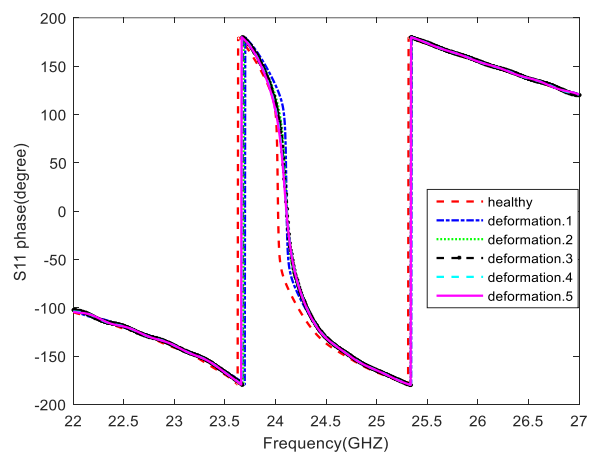
نتایج نشان می‌دهد که تغییر در فاصله مابین نوک پره تا پوسته منجر به افزایش شاخص اندازه‌گیری از نقطه مرجع (پره در فاصله ۲ mm از سنسور) می‌گردد؛ بنابراین آن را می‌توان به عنوان شاخصی برای تشخیص فاصله نوک پره تا پوسته و تخمین مقدار تقریبی آن استفاده کرد. این شاخص‌ها نمی‌توانند بین کاهش و افزایش جابجایی نوک پره تفاوت ایجاد کنند، چرا که MAMD و MAPD توابعی زوج از جابجایی هستند.

#### ۴-۲- آشکارسازی تغییر شکل پره

نوع تغییر شکل در این تحقیق، شکستگی پره در نوک پره است که با حجم‌های متفاوت ایجاد شده است و بیان حجم‌های مختلف شکستگی در این مقاله صرفاً برای بررسی دقت آشکارسازی سنسور طراحی شده می‌باشد. شکل ۱۱ شاخص‌های MAMD و MAPD را برای ۲۰ حالت تغییر شکل که حفره‌هایی با حجم متفاوت در نوک پره هستند را برای ۱۰۰۱ نقطه فرکانس از ۲۲ تا ۲۷ گیگاهرتز نشان می‌دهد. نقطه صفر در محور افقی نقطه سلامتی پره است.



الف



ب

شکل ۹: (الف) دامنه پارامتر پراکندگی (ب) فاز پارامتر پراکندگی متأثر از تغییر شکل و شکستگی نوک پره

#### ۴- آشکارسازی عیب با استفاده از شاخص‌های اندازه‌گیری

در این تحقیق، رویکرد مقایسه با استفاده از شاخص‌های اندازه‌گیری بر اساس مدل الکترومغناطیسی شبیه‌سازی شده پره‌های توربین و سنسور مایکروویو در حالت رزونانس است که می‌تواند وجود خرابی پره را نسبت به حالت سالم آشکار سازد. پایش مستمر پره توربین با استفاده از پارامتر پراکندگی دریافت شده از سنسور مایکروویو اطلاعات لازم برای مقایسه را فراهم می‌کند. در این مقاله، اساس آشکارسازی شاخص‌های اندازه‌گیری، تغییر فرکانس رزونانس و دامنه و فاز پارامترهای پراکندگی در محدوده فرکانس ۲۲ تا ۲۷ گیگاهرتز به دلیل تغییر طول رزوناتور حفره مایکروویو (سنسور) ناشی از تغییر شکل نوک پره و تغییر فاصله نوک پره تا پوسته می‌باشد. شاخص‌های آشکارسازی جابجایی نوک پره نسبت به پوسته بر اساس میانگین قدرمطلق اختلاف دامنه  $(MAMD)$  و فاز  $(MAPD)$  می‌باشند. شاخص قدرمطلق میانگین اختلاف دامنه  $(MAMD)$  و قدرمطلق میانگین اختلاف فاز  $(MAPD)$  برای حالت  $x$  نسبت به وضعیت مرجع، به شرح زیر تعریف می‌شوند:

تعیین می‌شود [۳۲]. نمونه‌های آموزشی با ویژگی‌های عددی  $n$  بعدی مشخص می‌شوند. الگوریتم  $k$ -NN به منظور پروسه کلاسه‌بندی به دنبال  $k$  نمونه آموزشی که مجاور نمونه‌های ناشناخته هستند می‌باشد [۳۳]. این نزدیکی به لحاظ فاصله اقلیدسی ( $ED$ ) اندازه‌گیری می‌شود و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ED(z, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - y_i)^2} \quad (15)$$

کلاسه‌بندی نمونه ناشناخته بر اساس بیشترین رخداد کلاس مابین  $k$ -NNs است. به عنوان مثال، با داشتن  $k=1$ ، به سادگی نمونه ناشناخته را به نزدیک‌ترین همسایه خود طبقه‌بندی می‌کند و بهترین انتخاب  $k$  وابسته به داده می‌باشد. معمولاً، مقادیر بزرگ  $k$  موجب کاهش اثر اختلال بر روی طبقه‌بندی می‌شوند، اما مرز بین کلاس‌ها را مبهم می‌سازد [۳۴]. به عنوان مثال در [۳۵]، فاصله بین نمونه بدون برچسب و هر  $k$  نمونه آموزشی نزدیک آن محاسبه شده و سپس به عنوان یک وزنه تأثیرگذار در پروسه تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی که تعداد نمونه آموزشی ثابت است خطای  $k$ -NN به مقدار  $k$  وابسته است؛ بنابراین ترکیب چند  $k$ -NNs با  $k$ های متفاوت می‌تواند دقت تمام سیستم را بهبود ببخشد [۳۶]. در این مقاله نوع خطا به وسیله الگوریتم کلاسه‌بندی  $k$ -NN تحلیل می‌گردد. با قرار دادن داده‌های تست در شبکه الگوریتم دقت آن در تعیین دو نوع عیب که تغییر فاصله نوک پره تا پوسته و همچنین تغییر شکل نوک پره است آنالیز شده و در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: آنالیز دقت الگوریتم  $k$ -NN

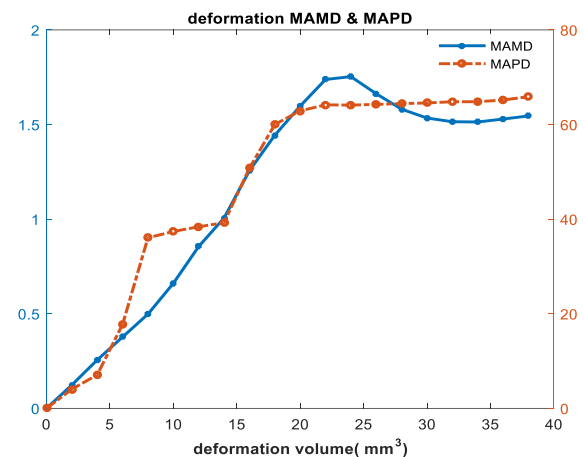
| روش $k$ -NN | $k=3$ | $k=5$ | $k=7$ | $k=9$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| درصد دقت    | ۸۸٪   | ۸۸٪   | ۸۸٪   | ۸۷٪   |

برآورد مقدار فاصله نوک پره تا پوسته به عنوان یک پارامتر پیوسته باید به عنوان یک مساله رگرسیون بررسی گردد. در این مقاله الگوریتم رگرسیون  $k$ -NN با میانگین‌گیری از مقدار  $k$ -NN برای تخمین فاصله نوک پره از پوسته بکار رفته است. با توجه به اینکه تغییر فاصله نوک پره تا پوسته در بازه فرکانسی  $23/5$  تا  $24/5$  گیگاهرتز بیشترین اختلاف را در پارامترهای پراکندگی ایجاد می‌کند و در بقیه محدوده فرکانس همپوشانی داده‌ها زیاد است، بنابراین داده‌های مربوط به این محدوده، بهترین گزینه برای اعمال به الگوریتم شناسایی الگوی  $k$ -NN می‌باشد. روش پیشنهادی به صورت زیر خلاصه می‌شود [۳۷]:

الف- پترن  $S_x (1 \leq x \leq n)$  با برچسب کلاس  $l(S_x)$  در پایگاه داده آموزش ذخیره می‌شود که در آن دامنه پارامتر پراکندگی و  $n$  تعداد آزمایش‌های آموزش است.

ب- یک پترن مجهول  $S_q$  که دامنه پارامتر پراکندگی یک موقعیت محوری مجهول است را برای کلاسه‌بندی در نظر می‌گیریم.

ج- فاصله اقلیدسی پترن مجهول  $S_q$  و هر پترن ذخیره‌شده در پایگاه داده  $S_x$ ،  $ED(S_q, S_x)$  را محاسبه می‌کنیم.



شکل ۱: مقادیر MAMD و MAPD بر اساس ۲۰ نوع تغییر شکل ایجادشده برای پره

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم تغییر شکل، شاخص MAPD و MAMD نسبت به نقطه مرجع (پره در فاصله ۲ میلی‌متر از سنسور بدون تغییر شکل) افزایش می‌یابند؛ بنابراین آن‌ها را می‌توان به عنوان شاخصی برای تشخیص تغییر شکل پره استفاده کرد. در دو منحنی ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد شاخص‌های MAMD و MAPD توابعی زوج از جابجایی بوده و چون در حالت خرابی تغییر شکل تیغه نقطه مرجع این دو شاخص مبدأ مختصات است ولی در خرابی تغییر فاصله نوک تیغه تا پوسته مرجع نقطه ۲ است و تمایزی مابین کاهش و افزایش فاصله وجود ندارد بنابراین این دو منحنی برای تشخیص خرابی تغییر شکل تیغه (دفرمگی) مناسب‌تر از تشخیص خرابی تغییر فاصله نوک تا پوسته می‌باشند. در هر یک از دو منحنی فوق مشاهده می‌گردد منحنی MAPD با توجه به رفتار خطی که از خود نشان می‌دهد برای این کار مناسب‌تر است.

## ۵- تعیین تغییر شکل و تغییر فاصله نوک پره نسبت به

### سنسور با استفاده از $k$ -NN

در این مقاله طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه ( $NNC$ ) به عنوان یک الگوریتم طبقه‌بندی ساده، شناخته‌شده و کارآمد مورد استفاده قرار می‌گیرد و فرض می‌کند که برچسب کلاس یک الگوی ناشناخته همانند نزدیک‌ترین همسایه خودش است. هنگامی که تعداد همسایگان بیش از یک است، آن را به دسته  $k$ امین نزدیک‌ترین همسایه گسترش می‌دهد. کلاسیفایرهای  $k$ -NN عمدتاً به دلیل سادگی مفهوم آن به طور گسترده‌ای در شناسایی الگو مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۰]. اگر تعداد داده‌های آموزش ثابت باشند، با ابعاد داده‌های آموزشی خطای  $NNC$  تغییر می‌یابد [۳۰، ۳۱].

دو مجموعه داده تعریف شده است، مجموعه آموزش و مجموعه تست. مجموعه آموزش ذخیره شده و برای کلاسه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد، درحالی‌که مجموعه تست برای تعیین دقت کلاسه‌بندی استفاده می‌شوند. کارایی و عملکرد طبقه‌بندی بر اساس دقت طبقه‌بندی



برچسب کلاس یک پترن مجهول  $l(S_q)$  لزوماً محدود به برچسب کلاسهای پایگاه داده نیست و می‌تواند به صورت پیوسته بر اساس ماتریس وزن تغییر کند. در نتیجه، این روش می‌تواند یک تخمین پیوسته برای فاصله نوک پره تا پوسته بدست دهد. پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده برای فواصل مختلف نوک پره تا پوسته توربین به داده‌های آزمون و آموزش تقسیم شده است. موقعیت‌های ناشناخته داده‌های تست با استفاده از روش رگرسیونی  $k$ -NN محاسبه و با فاصله واقعی نوک پره تا پوسته توربین مقایسه می‌گردند. نتایج تست رگرسیون  $k$ -NN برای فواصل ناشناخته نوک پره تا پوسته در جدول ۳ ارائه شده است.

د-  $k$  نزدیک‌ترین همسایگان  $\{S_{x1}, S_{x2}, \dots, S_{xk}\}$  و ماتریس برچسب کلاس مربوط به آن  $l(S_x) = \{l(S_{x1}), l(S_{x2}), \dots, l(S_{xk})\}$  را بر حسب فاصله اقلیدسی انتخاب می‌کنیم.

$$W = \left\{ \frac{1}{ED(S_q, S_{x1})}, \frac{1}{ED(S_q, S_{x2})}, \dots, \frac{1}{ED(S_q, S_{xk})} \right\} = \{W_1, W_2, \dots, W_k\} \quad (16)$$

ر- برچسب کلاس پترن مجهول  $S_q$  را با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌کنیم.

$$l(S_q) = \frac{\sum_{j=1}^k W_j l(S_{xj})}{\sum_{j=1}^k W_j} \quad (17)$$

جدول ۳: اندازه و نوع تغییر شکل

| درصد خطا<br>برای $k=9$ | پیش‌بینی‌شده<br>برای $k=9$ | درصد خطا<br>برای $k=7$ | پیش‌بینی‌شده برای<br>$k=7$ | درصد خطا<br>برای $k=5$ | پیش‌بینی‌شده برای<br>$k=5$ | درصد خطا<br>برای $k=3$ | پیش‌بینی‌شده برای<br>$k=3$ | Tip clearance<br>واقعی |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|
| ۲/۹۰۱۲                 | ۰/۲۵۸۰۲                    | ۲/۹۱۹۵۱                | ۰/۲۵۸۳۹                    | ۲/۹۵۰۶۸                | ۰/۲۵۹۰۱                    | ۳/۷۰۸۹۱                | ۰/۲۴۱۷                     | ۰/۲                    |
| ۰/۷۱۴۹                 | ۰/۶۱۴۲۹                    | ۰/۷۹۴۵۷                | ۰/۶۱۵۸۹                    | ۰/۵۴۰۸۲                | ۰/۶۱۰۸۱                    | .                      | ۰/۶                        | ۰/۶                    |
| ۰/۱۵۹۷                 | ۱/۳۰۳۱۹                    | .                      | ۱/۳                        | .                      | ۱/۳                        | .                      | ۱/۳                        | ۱/۳                    |
| ۰/۷۳۹۳                 | ۱/۶۱۴۷۸                    | ۰/۳۱۶۶۹                | ۱/۶۰۶۳۳                    | .                      | ۱/۶                        | .                      | ۱/۶                        | ۱/۶                    |
| ۱/۲۵۷۱                 | ۲/۱۲۵۱۴                    | ۱/۱۴۳۱۸                | ۲/۱۲۲۸۶                    | ۰/۹۷۰۲۲                | ۲/۱۱۹۴۰                    | .                      | ۲/۱                        | ۲/۱                    |
| ۳/۶۵۴۹                 | ۳/۱۷۳۰۹                    | ۴/۳۸۳۳۶                | ۳/۱۸۷۶۶                    | ۴/۲۷۰۳۱                | ۳/۱۸۵۴۰                    | ۴/۰۳۷۹۵                | ۳/۱۸۰۷۵                    | ۳/۱                    |
| ۳/۱۰۹۴                 | ۳/۶۶۲۱۸                    | ۳/۱۸۸۲۵                | ۳/۶۶۳۷۶                    | ۳/۶۴۲۱۹                | ۳/۶۷۲۸۴                    | ۳/۰۵۲۰۸                | ۳/۶۶۱۰۴                    | ۳/۶                    |
| ۲/۳۰۰۹                 | ۴/۲۴۶۰۱                    | ۲/۵۴۰۹۴                | ۴/۲۵۰۸۱                    | ۲/۴۵۱۹۸                | ۴/۲۴۹۰۴                    | ۰/۲۰۳۹۰                | ۴/۲۰۴۰۷                    | ۴/۲                    |
| ۱/۸۴۶۱                 | ۴/۵۳۶۹۲                    | ۲/۹۸۴۲۱                | ۴/۵۵۹۶۸                    | ۱/۹۴۰۷۶                | ۴/۵۳۸۸۱                    | ۳/۰۴۱۳۴                | ۴/۵۶۰۸۲                    | ۴/۵                    |
| ۲/۶۹۹۵                 | ۴/۷۴۶۰۰                    | ۴/۱۹۴۹۰                | ۴/۷۱۶۱۰                    | ۴/۲۳۵۰۷                | ۴/۷۱۵۲۹                    | ۴/۰۰۴۳۲                | ۴/۷۱۹۹۱                    | ۴/۸                    |

درصد خطا توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Error}(\%) = \frac{\text{Absolute Error}}{\text{clearance length}} \times 100 \quad (18)$$

درصد خطای متوسط روش پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف  $k$  در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مقایسه خطای متوسط رگرسیون  $k$ -NN

| برای $k=9$ | برای $k=7$ | برای $k=5$ | برای $k=3$ | روش             |
|------------|------------|------------|------------|-----------------|
| ۱/۹٪       | ۲/۲۴٪      | ۲/۱٪       | ۱/۸٪       | درصد خطای متوسط |

حداقل فاصله نوک پره تا پوسته قابل آشکارسازی بسیار مهم است چرا که خطای بیشتر از ۵ درصد می‌تواند باعث خسارات جدی به پره توربین گردد؛ بنابراین خیلی مهم است که جابجایی‌های زیر ۵ درصد را تشخیص دهیم. کمترین جابجایی نوک پره قابل آشکارسازی با استفاده از اثر انگشت پارامترهای پراکندگی، ۰/۳۱٪ فاصله مابین نوک پره تا پوسته است.

## ۶- نتیجه

در این مقاله توجه به شرایط ویژه در توربین‌های گازی، برای تشخیص عیوب مکانیکی حسگر میکروویو باند K پیشنهاد شده است. روش

پیشنهادی می‌تواند با استفاده از شاخص‌های اندازه‌گیری بر اساس تغییرات پارامتر پراکندگی می‌تواند برای استخراج عیوبی مانند تغییر فاصله نوک پره تا پوسته و تغییر شکل پره‌های توربین استفاده شود و سیستم فوق می‌تواند برای پایش پره‌های توربین گازی نیروگاه و همچنین توربین گازی موتور جت هواپیما بعد از هر پرواز و بدون اینکه موتور باز شود با استفاده از تستر به همراه نتورک آنالایزر مورد استفاده قرار گیرد.

نکته مهم در این مقاله استفاده از پارامترهای پراکندگی میدان نزدیک سنسور و اینکه نوک پره‌های توربین به عنوان بخشی از مدار رزونانس آنتن در نظر گرفته می‌شود و کوچک‌ترین تغییر در فاصله مابین نوک پره تا پوسته و تغییر در شکل پره فرکانس رزونانس پره را تغییر می‌دهد و روش‌های استخراج این پارامترها در این مقاله آمده است؛ بنابراین روش پردازش پره توربین بر اساس امواج الکترومغناطیسی و شاخص‌های اندازه‌گیری یک روش جدید در شناسایی خطوط پره‌های توربین گاز است. روش جدیدی برای تشخیص مقدار جابجایی نوک پره با استفاده از روش  $k$ -NN نیز پیشنهاد شده است. نشان داده شده است که این روش دقت زیادی در پیدا کردن جابجایی ناشناخته نوک پره و تغییر شکل پره داشته و همچنین می‌تواند بین کاهش و افزایش فاصله بین نوک تا پوسته تمایز قائل شود.

## مراجع

- [15] M. Violetti, J.F. Zurcher, J. Geisheimer and A.K. Skrivervik, "Design of antenna based sensors for blade tip clearance measurement in gas turbines," in IEEE Conference, Barcelona, Spain, pp. 1-4, 2010.
- [16] Y. Han, C. Zhong, X. Zhu and J. Zhe, "Online monitoring of dynamic tip clearance of turbine blades in high temperature environments," in Measurement Science and Technology, vol. 29, pp. 1-13, 26 February 2018.
- [17] J. Miguel, J. Zubia and G. Aranguren, "Architecture for Measuring Blade Tip Clearance and Time of Arrival with Multiple Sensors in Airplane Engines," International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2018, May 2018.
- [18] D. Zhai, M. Xie, J. Yuan and S. Liu, "Application of high level synthesis in the blade tip clearance measurement system," in IEEE BioMedical Engineering and Informatics Conferences, pp. 1-5, 2018.
- [19] L. Jiang, C. Xue, J. Cui, M. Yu, X. Pu and J. Shi, "Research recognition of aircraft engine abnormal state," in IEEE Control and Decision Conference, China, May 2015.
- [20] M. Violetti, A.K. Skrivervik, Q. Xu, J. Geisheimer and G. Egger, *Device and Method for Monitoring Rotor Blades of a Turbine*, European Patent Application no. 11181622, Sept. 16, 2011.
- [21] R. Szczepanik, R. Przysowa, J. Sychala, E. Rokicki, K. Kamierczak and P. Majewski, *Thermal Power Plants: Application of Blade Tip Sensors to Blade Vibration Monitoring in Gas Turbines*, Poland Air Force Institute of Technology, InTech, pp. 145-175, 2012.
- [22] A.K. Zimmer, *Investigation of the Impact of Turbine Blade Geometry on Near-field Microwave Blade Tip Time of Arrival Measurements*, M.S. Thesis, Daniel Guggenheim School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, December 2008.
- [23] P. Wade, *W1GHZ Online Microwave Antenna Book*, Available: <http://www.w1ghz.org/antbook/contents.htm/Understanding Circular Waveguide Experimentally>, Jan/Feb 2001.
- [24] P.A. Rizzi, *Microwave engineering passive circuits, Microwave resonator and filters*, Latest Edition, PHI Learning, pp. 427-438, 2004.
- [25] J.G. Pollock, *Analysis and Design of A New Class of Miniaturized Circular Waveguides Containing Anisotropic Metamaterial Liners*, Ph.D. Thesis, Department of electrical and computer engineering university of Alberta, 2016.
- [26] W.W.S. Lee and E.K.N. Yung, "The input impedance of a coaxial line fed probe in a cylindrical waveguide" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 42, no. 8, August 1994.
- [27] X. Li and Y. Jiang, *Design of a Cylindrical Cavity Resonator for Measurements of Electrical Properties of Dielectric Materials*, Master Thesis, University of Gavle, Department of Technology, September, 2010.
- [28] D. M. Pozar, *Microwave Network Analysis: in Microwave Engineering*, 3rd edn, Wesley Publishing, pp. 220-240, 2005.
- [29] Maier, C. Leonard, *Field Strength Measurements in Resonant Cavities*, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Technical Report No.143, November 1949.
- [30] L.J. Wang, X.L. Wang and Q. C. Chen, "GA-based feature subset clustering for combination of multiple nearest neighbors classifiers," in Machine Learning and Cybernetics Conference, Guangzhou, China, vol. 5, pp. 2982-2987, see also pp. 18-21, August 2005.
- [31] T. M. Cover and P.E. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21-27, 1967.
- [32] B. K. Panigrahi, V. R. Pandi, "Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet
- [1] Z. Jilong, D. Fajie, Niu. Guangyue, J. Jiajia and L. Jie, "A blade tip timing method based on a microwave sensor," MDPI Physical Sensors Journal, vol. 17, 11 May 2017.
- [2] V. Naga Bhushana Rao, IN. Niranjana Kumar and K. Bala Prasad, "Failure analysis of gas turbine blades in a gas turbine engine used for marine applications," International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 6, no. 1, pp. 43-48, 2014.
- [3] R. Dewangan, J. Patel, J. Dubey, P. Kumar Sen and S. K. Bohidar, "Gas turbines blades a critical review of failure on first and second stages," International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, vol. 4, no. 1, January 2015.
- [4] N. Singh Grewal, *Gas Turbine Engine Performance Deterioration Modelling and Analysis*, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Mechanical Engineering, February 1988.
- [5] N. Goel, A. Kumar, V. Narasimhan, A. Nayak, and A. Srivastava, "Health risk assessment and prognosis of gas turbine blades by simulation and statistical methods," Conference on Electrical and Computer engineering, Canadian, pp. 1087-1091, 2008.
- [6] M. R. Woike, J. W. Roeder, C. E. Hughes, and T. J. Bencic, "Testing of a microwave blade tip clearance sensor at the NASA Glenn research center," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, 5-8 January, 2009.
- [7] A. Dutta, Shivangi and J. Valarmathi, "Blade tip clearance measurement using microwave sensing system," International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH), vol. 4, no. 2, 2015.

[۸] مریم دهقانی و مرتضی خرم کشکولی، «تشخیص، شناسایی و جداسازی عیب توربین گاز پالایشگاه دوم پارس جنوبی با استفاده از روشهای ترکیبی داده کاوی، k-means، تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)»، مجله علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۵۱۵-۵۰۱، ۱۳۹۶.

- [35] S.A. Dudani, "The distance-weighted k-nearest-neighbor rule," IEEE Transactions on Systems, vol. SMC-6, no. 4, pp. 325-327, April 1976.
- [36] L. J. Wang, X. L. Wang and Q. C. Chen, "Combination of multiple k-NNCS by fuzzy integral," in Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 1774-1778, August 2006.
- [37] M.A. Hejazi, G.B. Gharehpetian, G. Moradi, H.A. Alehosseini and M. Mohammadi, "Online monitoring of transformer winding axial displacement and its extent using scattering parameters and k-nearest neighbour method," IET Gen. Trans & Distribution Journal, vol. 5, no. 8, pp. 824 - 832, , August 2011.
- packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm," IET Gener. Transm & Distribution Journal, vol. 3, no. 3, pp. 296-306, 2009.
- [۳۳] مهرداد حیدری ارجلو، سید قدرت‌الله سیف‌السادات و مرتضی رزاز، «یک روش هوشمند تشخیص جزیره در شبکه توزیع دارای تولیدات پراکنده مبتنی بر تبدیل موجک و k- نزدیک‌ترین همسایگی (KNN)»، مجله علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۳، شماره ۱، صفحه ۲۶-۱۵، ۱۳۹۲.
- [34] P. Parveen and B. Thuraisingham, "Face recognition using multiple classifiers," in Conference on Tools with Artificial Intelligence, Arlington, Virginia, pp. 179-186, 2006.

## زیر نویس‌ها

- 5 Mean Absolute Phase Difference
- 6 K- Nearest Neighbor
- 7 Nearest Neighbor Classification
- 8 Euclidean Distance

- 1 Tip Clearance
- 2 Pulse Repetition Frequency
- 3 Back-Short Distance
- 4 Mean Absolute Magnitude Difference