



تشخیص عیب سایش دنده در گیربکس دمی بالغرد با کمک الگوی شناسایی نزدیکترین همسایگی

هادی سعیدی، میر سعید صفی‌زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ دی ۱۳۹۱
بازنگری: ۲۴ آذر ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۲ دی ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

پایش وضعیت گیربکس دم بالغرد
عیب سایش دنده
تبدیل موجک گسسته
الگوی شناسایی نزدیکترین همسایگی
آنالیز مولفه‌های اصلی

چکیده: کاربرد سیستم‌های دوار در صنایع هوایی، صنایع نیروگاهی و صنعت خودرو و بسیاری از صنایع دیگر مرسوم و متداول است. تعمیر و نگهداری سیستم‌های دوار بر اساس منطق‌های سنتی در صنایع مختلف بسیار هزینه‌بر بود و عیب‌یابی هوشمند سیستم‌های مهندسی و به‌خصوص مکانیکی از مسائل با اهمیت و رو به رشد صنایع روز دنیا می‌باشد. در این پژوهش که بر روی سیستم انتقال قدرت گیربکس ۹۰ درجه بالغرد (دم بالغرد) صورت گرفته است، یک سیستم عیب‌یابی هوشمند برای عیب سایش چرخ‌دنده در گیربکس ۹۰ درجه یک بالغرد ارائه شده است. برای طراحی این سیستم عیب‌یابی هوشمند، یک مجموعه آزمایشی شامل گیربکس واقعی ۹۰ درجه بالغرد به همراه شافت‌های مربوطه و شرایط تکیه‌گاهی واقعی طراحی و ساخته شده است. عیب شبیه‌سازی شده بر روی سیستم مورد نظر عیب سایش بر روی دنده پینیون ورودی می‌باشد که این عیب در سه مرحله ایجاد شده است. گیربکس در شرایط دور و بار مختلف در حالت سالم و معیوب مورد آزمایش قرار گرفت. در طراحی این سیستم عیب‌یابی هوشمند از روش‌های زمانی آنالیز سیگنال، تبدیل موجک گسسته، آنالیز مولفه‌های اصلی و روش‌های تصمیم‌گیری خودکار نظیر روش الگوی شناسایی نزدیکترین همسایگی استفاده شده است.

۱- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در سامانه‌های هوایی، مسئله شکست قطعات، به ویژه در سیستم‌های انتقال قدرت می‌باشد، که عمدتاً ناشی از خستگی در اثر سایش بیش از حد مواد و تشکیل ترک‌های اولیه می‌باشد، که در نهایت منجر به آسیب و از کارافتادگی کل سیستم می‌گردد. بالغردها جزء سامانه‌های هوایی پیچیده و دشوار از لحاظ طراحی بوده و مبحث ارتعاشات قطعات دوار دینامیکی در آنها بسیار حائز اهمیت است. از این رو در این پژوهش یک سیستم پایش وضعیت برای تشخیص عیب سایش چرخ‌دنده در گیربکس ۹۰ درجه دمی بالغرد ارائه شده است.

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار از قبیل درایو شافت‌ها، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها از طریق آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی صورت گرفته است. بایومی و همکاران [۱]، در دو مطالعه جداگانه به بررسی پایش وضعیت در سامانه‌های هوایی از جمله بالغردها به عنوان رهیافت اصلی تغییر استراتژی نگهداری بر اساس زمان و واکنش سیستم^۱ به نگهداری بر اساس پیش‌بینی^۲ پرداختند. از روش‌های مختلف پردازش سیگنال، بسته به حوزه آنالیز آنها، مانند حوزه فرکانسی، حوزه زمان و حوزه

زمانی-فرکانسی برای مقایسه بهتر سیگنال‌های ارتعاشی و تشخیص الگو^۳ استفاده می‌شود. یکی از روش‌های زمان-فرکانسی، تبدیل موجک است و به عنوان رایج‌ترین روش عیب‌یابی مورد استفاده در پانزده سال اخیر در حوزه زمان-فرکانس به حساب می‌رود. وانگ و مک‌فادن [۲-۳] به بررسی کاربردهای تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی چرخ‌دنده پرداخته و نشان دادند که این تبدیل، قابلیت تشخیص عیب در مراحل اولیه و همچنین انواع عیب را دارا است. تحقیقات فراوانی نیز به منظور بهبود دقت و بازدهی عیب‌یابی ماشین‌آلات با استفاده از هوش مصنوعی انجام شده است. وانگ و ساراوانان [۴-۵] از جمله افرادی بودند که تحقیقات اولیه را در زمینه عیب‌یابی هوشمند انجام دادند. لی‌چو [۶] از ویژگی‌های فرکانسی یاتاقان‌های غلتشی به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده کردند. کانگ و همکاران [۷] ویژگی‌های فرکانسی استخراج شده در سیگنال‌های ارتعاشی را با استفاده از شبکه‌های فازی-عصبی در سیستم موتور-یاتاقان استفاده کردند [۷]. لویارو [۸] با استخراج مقادیر انحراف معیار ضرایب موجک و با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده فازی، به عیب‌یابی یاتاقان‌ها پرداخت. ساراوانا و همکاران [۹] با استخراج بهترین ویژگی‌های آماری سیگنال‌های ارتعاشی و به کمک استنتاج فازی یک سیستم هوشمند برای تعیین و تشخیص عیب گیربکس دنده مخروطی طراحی کردند. یاگو و مینگ [۱۰] به کلاس‌بندی عیب دنده در یک نمونه گیربکس به کمک استخراج پارامترهای آماری و

1 Time and reaction based maintenance

2 Predictive and proactive based maintenance

3 Pattern recognition

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: safizadeh@iust.ac.ir

یک سیستم ترمز بر روی شفت خروجی استفاده شده است. برای اینکه اعمال بار یکنواخت انجام پذیرد و سیستم سریعاً پایدار شود از وزنه‌هایی با وزن ۲ و ۶ کیلوگرم جهت آویزان کردن به دستگیره ترمز استفاده می‌شود. شماتیک سیستم مکانیکی سامانه آزمایشی و نمونه آزمایشگاهی سامانه ساخته شده که در شکل ۱ نشان داده شده است، از اجزای زیر تشکیل شده است:

- الکتروموتور با قدرت ۱۴ اسب بخار و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه
 - تسمه و پولی با افزایش سرعت ۳:۱ و ۳:۲
 - تابلو کنترل برق
 - سازه سامانه
 - دو بیرینگ و هوزینگ جهت ایجاد تکیه‌گاه و همچنین کاهش سطح ارتعاشات
 - ترمز جهت بارگذاری به گیربکس
 - درایو شافت انتقال قدرت
 - کوپلینگ انعطاف‌پذیر
 - گیربکس ۴۲ درجه واسطه
 - گیربکس ۹۰ درجه
 - تجهیز جهت اتصال شافت و گیربکس
 - دورسنج
- قبل از انجام تست موارد زیر بر روی مجموعه آزمایشگاهی انجام شد:
- تنظیم تسمه و پولی
 - بالانس درایو شافت

در نهایت عیب سایش بر روی چرخ‌دنده پینیون ورودی در ۳ مرحله (سال، عیب سایش ۲۰ درصد، ۴۰ درصد و ۶۰ درصد) مطابق شکل ۲ شبیه‌سازی شد. عیب به وسیله سنگ زدن پروفیل یک دندانه پینیون و شدت عیب برحسب ضخامت برداشته شده از دندانه بیان می‌شود. سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از پنج سنسور شتاب‌سنج سه جهته^۱ نصب شده بر روی یاتاقان‌های نگه دارنده شفت ورودی و خروجی و نزدیکترین نقطه به محل درگیری دو چرخ دنده مطابق شکل ۳، برای دو حالت اعمال بار کمینه و اعمال بار بیشینه جمع‌آوری شده است، تا به بررسی تاثیر عیب بر روی سیگنال‌های ارتعاشی پرداخته شود.

برای دریافت سیگنال از یک سیستم داده‌برداری استفاده شده است که این سیستم شامل موارد زیر می‌باشد:

- شتاب‌سنج‌های سه جهته PCB 356B08 (جهت دریافت سیگنال آنالوگ)
- دستگاه آنالایزر B&K 3560 D (جهت تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال)
- رایانه
- دور سنج (جهت اندازه‌گیری دور موتور به صورت لحظه‌ای)

روش دسته‌بندی الگوی شناسایی نزدیکترین همسایگی پرداختند. دیمورا و همکاران [۱۱] با کمک سیگنال‌های ارتعاشی و استخراج ویژگی از آنالیز مولفه‌های اصلی و شبکه عصبی، یک سیستم تشخیص عیب برای گیربکس در چهار کلاس مختلف ارائه دادند. در حال حاضر سیستم انتقال قدرت بالگرد از مباحث اصلی در ایمنی پرواز و تعمیرات محسوب می‌شود، طبق آمارهای به دست آمده، بیش از ۳۰٪ از هزینه‌های تعمیرات و بیش از ۲۲٪ از سوانح منجر به سقوط بالگرد، مربوط به سیستم انتقال قدرت است [۱۲]. گیربکس‌ها که یکی از اساسی‌ترین اجزای سیستم‌های انتقال محسوب می‌گردند به طور کلی از سه جزء اصلی تشکیل می‌شوند چرخ‌دنده، بلبرینگ و شفت، که در حدود ۶۰ درصد از عیوب آنها در چرخ‌دنده‌ها اتفاق می‌افتد [۱۳].

در این تحقیق با تمرکز بر روی عیب سایش در چرخ‌دنده‌ها، یک سیستم پایش اتوماتیک برای عیب سایش در گیربکس دم یک بالگرد طراحی و آزمایش می‌گردد. این سیستم پایش شامل سه قسمت اصلی است: ۱- قسمت آنالیز سیگنال، این قسمت سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج‌های نصب شده بر روی گیربکس را دریافت و پس از آنالیز همزمان آنها در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس شاخص‌های متعددی را استخراج و به قسمت بعدی ارسال می‌کند. ۲- قسمت فشرده‌سازی اطلاعات، با توجه به تعداد زیاد شاخص‌های استخراج شده در قسمت قبل، فرآیند تصمیم‌گیری بسیار مشکل و تقریباً غیر ممکن می‌شود. لذا در این قسمت با استفاده از روش‌های کاهش داده‌ها تعداد پارامترهای موثر در تصمیم‌گیری را به دو پارامتر کاهش می‌دهیم. ۳- قسمت تصمیم‌گیری، در این قسمت با استفاده از یک کلاسیفایر نزدیکترین همسایگی سیستم پایش به طور اتوماتیک، وجود عیب و شدت آن را تعیین می‌کند.

۲- تشریح مجموعه آزمایشگاهی

به منظور شبیه‌سازی سیستم پایش وضعیت گیربکس ۹۰ درجه دمی بالگرد یک مجموعه آزمایشگاهی با شرایط واقعی طراحی و ساخته شده است. گیربکس ۹۰ درجه بالگرد انتخاب شده شامل یک جفت چرخ‌دنده مخروطی ماریچ است که هر یک از شفت‌های ورودی و خروجی آن توسط دودعد بیرینگ ساچمه‌ای و یک عدد رولر بیرینگ نگه داشته شده است. این گیربکس در قسمت دمی بالگرد قرار دارد و نقش آن انتقال قدرت به پره‌های روتور دمی بالگرد است. دور ورودی گیربکس در حالت مداوم ۴۳۰۰ دور در دقیقه بوده و با نسبت کاهندگی ۲/۵۹ دور خروجی به ۱۶۶۰ دور در دقیقه کاهش پیدا می‌کند. در این مجموعه آزمایشگاهی سعی شده که تمامی قطعات مطابق با شرایط واقعی نصب و آزمایش گردد. توان مورد نیاز سامانه ارتعاشی توسط یک موتور سه فاز با قدرت ۱۴ اسب بخار و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه تامین می‌گردد. این توان توسط شفت‌های انتقال قدرت همانند بالگرد به گیربکس واسط منتقل شده و توسط گیربکس واسط که نسبت یک به یک دارد تغییر مسیر ۴۲ درجه‌ای داده و توسط شافت انتقال قدرت وارد گیربکس ۹۰ درجه می‌شود. به منظور اعمال بار بر چرخ‌دنده‌ها از

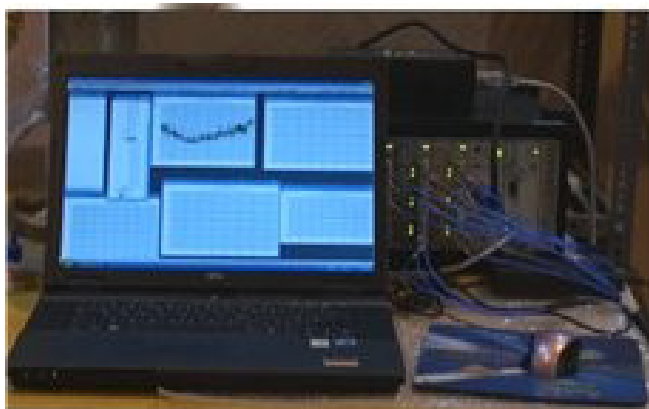
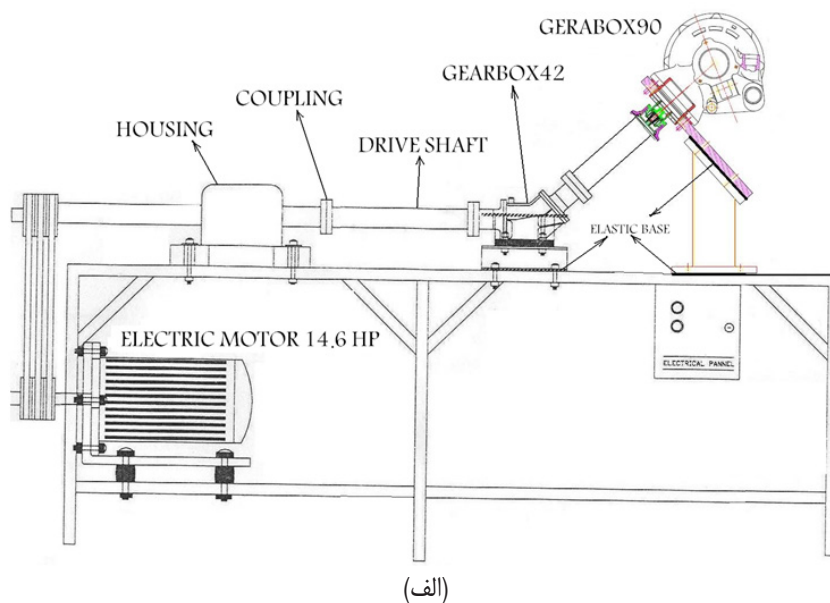


Fig. 1. a) Schematic illustration of the experimental setup b) Outline of the experimental setup, (c) Data collector set
شکل ۱: (الف) شماتیک کلی سامانه ارتعاشی گیربکس ۹۰ درجه، (ب) نمای کلی از مجموعه آزمایشگاهی، (ج) مجموعه داده برداری

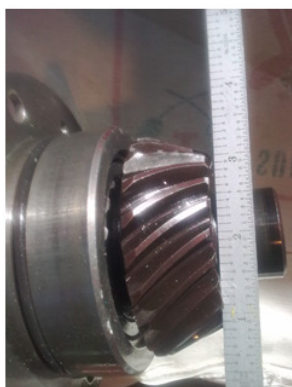


Fig. 2. (a) Faultless gear, (b) faulty gear with 20% wear, (c) faulty gear with 40% wear, (d) faulty gear with 60% wear

شکل ۲: (الف) چرخ دنده سالم (ب) چرخ دنده با دندان معیوب، سایش ۲۰ درصد (ج) چرخ دنده با دندان معیوب، سایش ۴۰ درصد (د) چرخ دنده با دندان معیوب، سایش ۶۰ درصد آزمایشگاهی

۴- پردازش داده‌ها

۴-۱- پیش‌پردازش داده‌ها

برای پردازش سیگنال‌های ارتعاشی در حوزه زمان از شاخصه‌های آماری [۱۰] و در حوزه زمان-فرکانس نیز از ضرایب جزئیات و تقریب روش تبدیل موجک گسسته استفاده شده است. شاخصه‌های آماری در حوزه زمان هفت شاخصه می‌باشند که برخی از این شاخصه‌ها از محاسبه سیگنال‌های تفاضل و باقیمانده از سیگنال اولیه، قابل استخراج هستند. در جدول ۲ نحوه پردازش سیگنال اولیه و در شکل ۵ یک نمونه از سیگنال فیلتر شده ارائه شده است. در جدول ۳ نیز معادلات و کاربردهای پارامترهای زمانی استفاده شده، مشاهده می‌شود. استفاده از تبدیل موجک کمک شایانی به شناسایی ویژگی‌های نهفته در سیگنال از جمله توزیع انرژی سیگنال در زیر باندهای فرکانسی مختلف می‌کند. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری و فرکانس درگیری دندانه‌ها از آنالیز موجک گسسته تا شش سطح استفاده شده است که محدوده فرکانسی هر سطح بر حسب مقدار فرکانس درگیری هارمونیک اول (f_1) در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که فرکانس نمونه‌برداری برابر با ۶۵ kHz و فرکانس درگیری در دور ۲۲۵۰ rpm برابر با ۸۲۵ Hz و برای دور ۴۵۰۰ rpm برابر با ۱۶۵۰ Hz می‌باشد.

پارامترهای زمانی فوق و همچنین ضرایب موجک به کمک موجک دابوچی ۱۲ (db12) در شش سطح برای تمامی سیگنال‌ها محاسبه و مقادیر جذر میانگین مربعات، کورتوزیس، فاکتور کرس و مقدار انرژی برای هر زیر باند فرکانسی استخراج گردید. در نهایت مقادیر محاسبه شده در سطح چهارم (cd4) تبدیل موجک گسسته، با موجک مادر db12 انتخاب شد. گزینش این زیرباند بر این اساس استوار شده است که فرکانس فرضی موجک مادر db12 در زیرباند چهارم تبدیل بر هارمونیک سوم فرکانس درگیری منطبق است و اثرات تغییر در آن را آشکار می‌نماید. از آنجا که عیوب در مراحل اولیه بر هارمونیک‌های بالای فرکانس درگیری اثر می‌گذارند زیر باند سطح چهارم (cd4) در این تبدیل می‌تواند تغییرات گذرای سیگنال که ناشی از



Fig. 3. Positions of tri-axial accelerometer sensors mounted on the tail gearbox

شکل ۳: موقعیت نصب شتاب‌سنج‌ها

۳- انجام آزمایش

سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در ۴ گروه با توجه به شدت عیب مطابق جدول ۱ دسته‌بندی شده‌اند. هر گروه در ۲ حالت اعمال بار کمینه و با اعمال بار بیشینه و همچنین برای دو دور ۲۲۵۰ و ۴۵۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری شده است، که در مجموع ۱۶ آزمایش برای جمع‌آوری داده‌ها انجام شده است. هر گروه شامل ۵ عدد شتاب‌سنج سه جهته می‌باشد که در مجموع شامل ۴۸ سیگنال برای هر سنسور در ۴ کلاس خواهد بود.

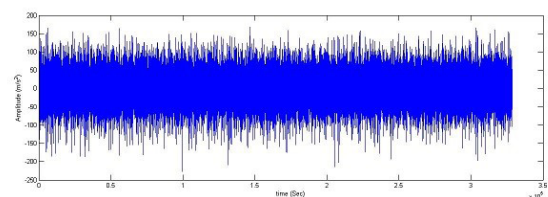
جدول ۱: دسته‌بندی سیگنال‌های ارتعاشی

Table 1. Classification of vibration signals

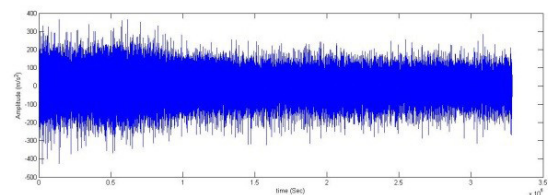
گروه	۱	۲	۳	۴
مقدار پیشرفت عیب سایش دنده بر حسب درصد	۰	۲۰	۴۰	۶۰

شکل ۴ یک نمونه سیگنال ارتعاشی در دور ۲۲۵۰ برای شتاب‌سنج شماره ۲ در راستای Z و در چهار کلاس مختلف را نشان می‌دهد.

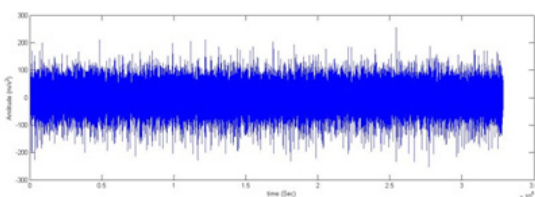
سیگنال سالم - سنسور شماره ۲ - جهت شعاعی - دور ۲۲۵۰ - با اعمال بار



سیگنال با ۴۰ درصد سایش - سنسور شماره ۲ - جهت شعاعی - دور ۲۲۵۰ - با اعمال بار



سیگنال با ۲۰ درصد سایش - سنسور شماره ۲ - جهت شعاعی - دور ۲۲۵۰ - با اعمال بار



سیگنال با ۶۰ درصد سایش - سنسور شماره ۲ - جهت شعاعی - دور ۲۲۵۰ - با اعمال بار

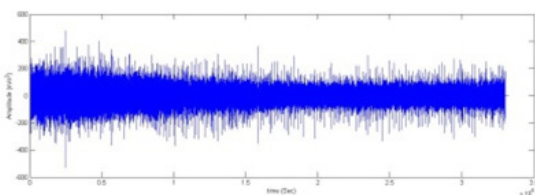


Fig. 4. Vibration signals of sensor #2 in Z (radial) direction

شکل ۴: سیگنال‌های زمانی سنسور شماره ۲ در جهت Z (شعاعی)

جدول ۲: پیش‌پردازش سیگنال در حوزه زمان

Table 2. Preprocessing of signals in time domain

پردازش	نحوه پردازش	ε
سیگنال باقیمانده RES	حذف فرکانس‌های شافت و درگیری دنده‌ها و هارمونیک‌های آن از سیگنال	محاسبه پارامترهای NA4 و NA4* جهت بررسی روند رشد عیب
سیگنال تفاضلی DIF	حذف باندهای جانبی مرتبه اول از سیگنال RES (این سیگنال برای یک گیربکس سالم نویز گوسی است)	محاسبه M8A و M6A و FM4

جدول ۳: مشخصات حوزه زمان

Table 3. Metrics and their Formula

مشخصه ویژگی	پردازش	ماهیت	کاربرد
کورتیزس	$Kurtosis = \frac{\sum (x - \bar{x})^4}{N \cdot \sigma^2}$	میزان صافی یا ناهمواری و تیزی سیگنال	نشاندننده افزایش سایش و شکستگی در چرخ‌دنده [۱۶]
جذر میانگین مربعات	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2}$	انرژی موجود در سیگنال	ردیابی سطح کلی نویز در سیگنال [۱۶]
فاکتور تیزی سیگنال	$Crest Factor = \frac{Peak}{RMS}$	نسبت بیشینه دامنه به RMS	شناسایی ضربه در سیگنال [۱۶]
FM4	$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^2}$	کورتیزس (ممان چهارم آماری) نرمالیز شده سیگنال DIF	تشخیص تغییرات عمده در وضعیت درگیری دنده‌ها و تغییرات بوجود آمده در سیگنال بر اثر خرابی محدود به چند دندانه [۱۶]
NA6	$NA6 = \frac{N \cdot \sum (d_i - \bar{d})^6}{\left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^N (d_{ij} - \bar{d})^3 \right] \right\}^2}$	گشتاور ششم سیگنال تفاضل	حساسیت بالا به پیک‌های سیگنال [۱۸]
NA4	$NA4 = \frac{N \cdot \sum (r_i - \bar{r})^4}{\left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^N (r_{ij} - \bar{r})^2 \right] \right\}^2}$	گشتاور چهارم سیگنال باقیمانده به متوسط مجذور انحراف معیار	بررسی روند ایجاد و رشد عیب [۱۷]
M6	$M6 = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (d - \bar{d})^6}{\left[\sum_{i=1}^N (d - \bar{d})^2 \right]^3}$	ممان ششم از خانواده‌ی کورتیزس و نرمالیزه شده با توان سوم واریانس	ارتباط بین موقعیت توزیع چگالی پیک و میانگین را نشان می‌دهد [۱۸]

کرتس در شروع عیب حساسیت بسیار بالایی را از خود نشان می‌دهد ولی با گسترش عیب حساسیت آن کاهش می‌یابد. همچنین کورتیزس در شروع عیب تغییر محسوسی ندارد ولی با گسترش عیب حساسیت خوبی را از خود نشان می‌دهد. برآیند کلی این مقادیر، افزایش شاخصه‌ها با پیشرفت عیب را نشان می‌دهد که در بیشتر موارد افزایش چشمگیر شاخصه‌ها دیده می‌شود.

۴-۲- آنالیز مولفه‌های اصلی^۱ و اعمال الگوریتم نزدیکترین همسایگی^۲

هدف از انجام آنالیز مولفه‌های اصلی، استخراج ویژگی‌های جدید (به ترتیب اهمیت) به صورت ترکیب خطی از متغیرها بوده که مستقل از هم می‌باشند. زمانی که داده‌ها و اطلاعات در یک فضای داده با ابعاد بالا قرار

جدول ۴: محدوده فرکانسی سیگنال تجزیه شده به کمک تبدیل موجک گسسته برای سرعت ۲۲۵۰ دور بر دقیقه

Table 4. Decomposed signal in frequency domain using DWT

cd1	cd2	cd3	cd4	cd5	cd6	ca6
40f1~	20f1~	40f1~	10f1~	5f1~	1.25f1~	0f1~
20f1	10f1	20f1	5f1	2.5f1	0.625f1	1f1

عیب می‌باشد را نمایان سازد. موجک db12 دارای تغییرات ناگهانی و شدید می‌باشد و انتخاب آن بعنوان موجک مادر همه شرایط فوق را تامین نماید. شکل ۶ شاخصه‌های محاسبه شده و شیب منحنی‌ها حساسیت شاخصه‌ها در اثر پیشرفت عیب را نشان می‌دهد. شاخصه‌های انرژی و جذر مانگین مربعات روند افزایشی تقریباً ثابتی را با افزایش عیب دنبال می‌کنند در حالیکه فاکتور

1 Pirincipal Component Analysis

2 K-nearest neighbour algorithm

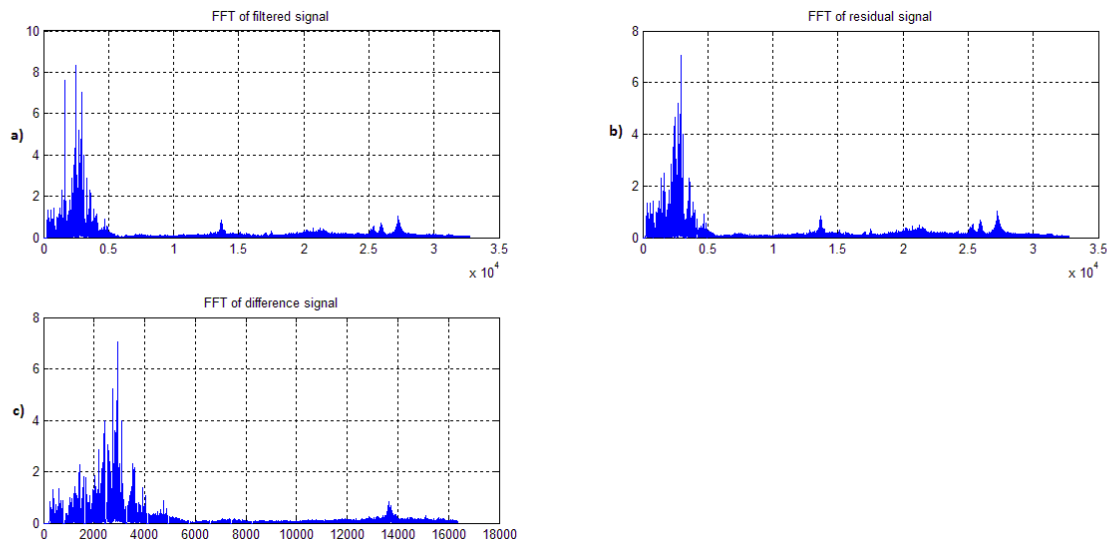


Fig. 5. Frequency spectrum- (a) Original signal- (b) Residual signal- (c) Differential signals

شکل ۵: طیف فرکانسی (a) سیگنال اولیه، (b) سیگنال باقیمانده، (c) سیگنال تفاضل

باشد. شرط اساسی استفاده از این روش این است که بردارهای مشخصه اصلی انتخاب شده، پراکندگی داده‌ها را تا حد مطلوب در برگرفته باشند. این تبدیل که تحت عنوان کارهیونن-لو^۱ نیز شناخته می‌شود، تبدیل بهینه در کارهای فشرده‌سازی و کاهش بعد است و در صورت کافی بودن داده ورودی می‌تواند تبدیل بهینه را استخراج نماید. آنالیز اجزای اصلی همچنین می‌تواند برای پیدا کردن سیگنال‌ها در اطلاعات نویزدار به کار رود [۱۵].

پس از اعمال فرایند کاهش داده‌ها و استخراج دو مولفه اصلی اول، کلاسیفایر بر اساس مدل نزدیکترین همسایگی انجام می‌شود. در مدل نزدیکترین همسایگی، نیاز به ماتریس آموزش می‌باشد، ماتریس آموزش شامل مولفه‌های اصلی محاسبه شده در مرحله کاهش ابعادی می‌باشد که برای هر نمونه محاسبه شده است. سطرهای ماتریس آموزش شامل نمونه‌های آماری مختلف و ستون‌های آن مولفه‌های اصلی به دست آمده می‌باشند [۱۶]. شکل ۷ نمودار دو مولفه اصلی هر نمونه آزمایشی در مرحله

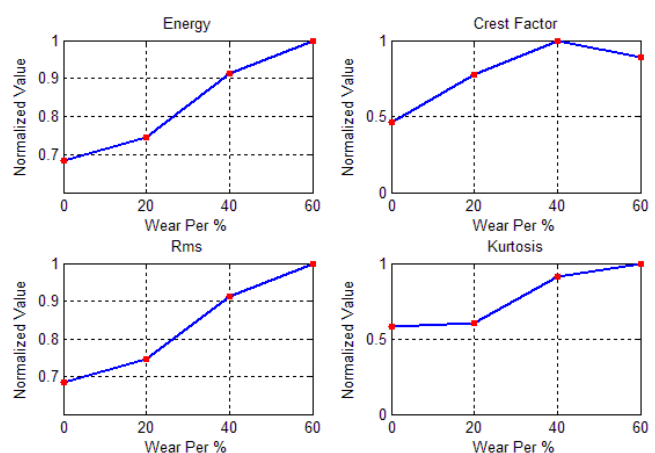


Fig. 6. Parameters extracted by using discrete wavelet transform

شکل ۶: تغییرات مقادیر شاخصه‌های حاصل از آنالیز تبدیل موجک با پیشرفت عیب

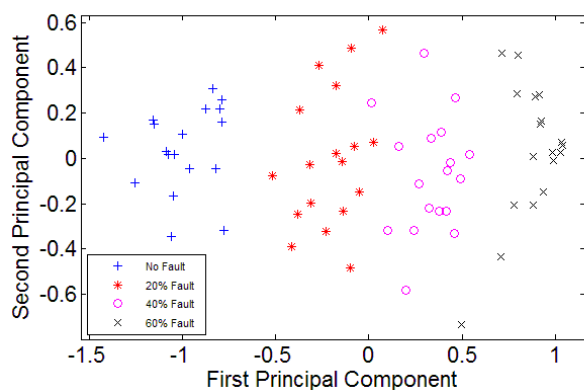


Fig. 7. Main two principal components extraction in training step

شکل ۷: نمودار دو مولفه اصلی نمونه‌های آزمایشی در مرحله آموزش

داشته باشند قابل دسته‌بندی و تفکیک نبوده و به یکدیگر وابسته هستند، با کمک آنالیز مولفه‌های اصلی ابعاد فضای داده‌ها کاهش می‌یابد و مولفه‌های مستقل و متعامد استخراج می‌گردد [۱۴]. در حقیقت روش آنالیز مولفه‌های اصلی بر اساس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه عمل می‌کند و بردارهای ویژه‌ای را بر می‌گرداند که دارای مقدار ویژه بزرگتری باشند. آنالیز مولفه‌های اصلی، مجموعه چندبعدی داده‌ها را به ابعاد کمتر در مختصات جدید که جهت محورهای اصلی آن به سمت بیشترین مقدار واریانس داده‌هاست تبدیل می‌کند. در این پژوهش در ابتدا سیگنال‌های حاصل از سه بعد شتاب‌سنج جهت استخراج ویژگی، و سپس بردارهای ویژگی جهت کاهش ابعاد ویژگی با استفاده از این تکنیک بررسی می‌شوند. هدف اصلی این روش پیدا کردن گروه کوچکتري از متغیرهای اساسی است که توانایی توصیف داده‌ها را داشته

استفاده شد. دلیل استفاده از سنسورهای فوق، حساسیت بالای شاخصه‌های آماری سیگنال‌ها نسبت به میزان پیشرفت عیب می‌باشد، هم چنین با توجه به نزدیکی سنسورها به محل عیب تأثیرات ناشی از افزایش دامنه در فرکانس‌های درگیری و باندهای کناری بر روی آنها قابل ملاحظه می‌باشد. از این ۹۶ سیگنال، ۷۲ سیگنال برای سیستم آموزش^۱ و ۲۴ سیگنال برای سیستم آزمایش^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۸ تشکیل مرزهای دسته‌بندی به وسیله روش نزدیکترین همسایگی را در مرحله آموزش نشان می‌دهد.

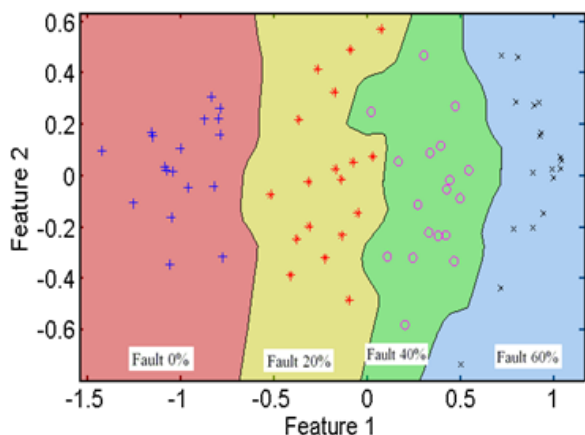


Fig. 8. Classification by using KNN algorithm for training data

شکل ۸: مرزهای دسته‌بندی توسط کلاسیفایر در مرحله آموزش کلاسیفایر

بعد از فرایند دسته‌بندی و تشکیل مرزها از ۲۴ سیگنال آزمایشی جهت آزمایش کلاسیفایر استفاده شده است که شاخصه‌های این سیگنال‌ها قبلاً ذکر شده است. نمونه‌های مورد آزمایش طوری انتخاب گردید که حالات مختلف شرایط آزمایشگاهی را در برگیرد. شکل ۹ نتایج حاصل از آزمایش کلاسیفایر را نشان می‌دهند. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، اکثر نمونه‌ها در داخل مرز بندی کلاسیفایر قرار گرفته‌اند و تعدادی نیز در اطراف مرزها و تعدادی نیز در دسته‌بندی خود قرار نگرفته‌اند. کل نمونه‌های مرحله آزمایش ۲۴ نمونه می‌باشد که از این تعداد نمونه ۳ نمونه در روی مرزها و یک نمونه مربوط به سیگنال سالم در دسته سایش ۲۰ درصد قرار گرفته است. با توجه به این نکته و تقسیم این مقادیر (۴ بر ۲۴) خطایی در حدود ۱۶ درصد برای سیستم به دست می‌آید. وجود درصدی از خطا در هر سیستمی اجتناب ناپذیر است. این خطا می‌تواند ناشی از ناکافی بودن نمونه‌های آزمایشی برای این مجموعه آزمایشگاهی باشد. همچنین حالت‌های مختلف سیگنال‌گیری که مستقیماً در انرژی سیگنال‌ها و مقادیر مشخصه‌های آنها تأثیرگذار است می‌تواند دلیلی بر پراکندگی داده‌ها در فضای دو بعدی مولفه‌های اصلی باشد. با انجام آزمایش‌های بیشتر در حالت‌های مختلف سیستم نظیر تغییر در بارگذاری، دور، موقعیت عیب، محل نصب سنسورها و تعدد سنسورها،

آموزش برای شاخصه‌ها را نشان داده است.

روش‌های طبقه‌بندی عیوب شامل روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی شامل RBF و MLP، سیستم استنتاج فازی، ماشین‌های بردار پشتیبان، روش نزدیکترین همسایگی و موارد دیگر می‌باشند. روش نزدیکترین همسایگی یک الگوریتم یادگیری می‌باشد که در روش بازشناسی الگو طی چندین دهه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق از روش نزدیکترین همسایگی به عنوان سیستم شناسایی الگو استفاده شده است. این سیستم شناسایی الگو در عین سادگی، پایداری بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی، کلاسیفایرهای درختی و موارد دیگر در دسته‌بندی داده‌های واقعی دارد. این روش یک الگوریتم یادگیری بر اساس مشاهدات و نمونه‌ها می‌باشد، به عبارت دیگر یک الگوریتم مشاهده و یادگیری از طریق بررسی و نظارت است که هدف آن دسته‌بندی یک عضو یا شی جدید بر اساس ویژگی نمونه‌های آموزش‌دهنده می‌باشد، که در آن یک نمونه جدید بر اساس اکثریت K گروه و دسته که نزدیکترین همسایگی را با آن نمونه داشته باشند، تقسیم‌بندی می‌شود. به طور کلی می‌توان بیان کرد روش K-نزدیکترین همسایگی، یک روش تشخیص الگوهای آماری غیر پارامتری می‌باشد که تعداد K از نزدیکترین الگوهای مشابه را پیدا کرده و براساس آنها ارزش نمونه مورد مطالعه را پیش‌بینی می‌کند. نحوه عملکرد این الگوریتم بسیار ساده می‌باشد این الگوریتم براساس حداقل فاصله نمونه مورد بررسی تا نمونه‌های موجود دیگر برای تعیین K-نزدیکترین همسایه کار می‌کند. پس از تعیین K دسته از نزدیکترین همسایگی‌ها به راحتی قادر خواهد بود ترکیب وزنی آن همسایگی‌ها را به عنوان پیش‌بینی نمونه مورد بررسی انتخاب کند [۱۵].

مراحل روش الگوریتم K-نزدیکترین همسایه به شرح زیر می‌باشد:

۱. مشخص کردن داده‌ها، اطلاعات و نمونه‌های مورد استفاده برای آموزش (X_j)
۲. تعیین تعداد دسته‌های همسایگی‌ها
۳. مشخص کردن فاصله نمونه مورد بررسی (X_j) تا هر دسته و گروه از نمونه‌های مشخص از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی از رابطه (۱):

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{a=1}^n d_a(x_i, x_j)^2} \quad (1)$$

۴. مشخص کردن وضعیت نمونه مورد بررسی

۵- بحث نتایج

در نهایت با توجه به مقادیر شاخصه‌های حاصل از آنالیز سیگنال‌های فوق برای عیوب شبیه‌سازی شده، از ۲۴۰ سیگنال موجود، شاخصه‌های محاسبه شده برای ۹۶ سیگنال، از سنسور شماره ۲ (نصب شده بر روی دنده پینیون ورودی) و سنسور شماره ۳ (نصب شده بر روی یاتاقان شافت خروجی) به عنوان ورودی برای فرایند استخراج ویژگی و دسته‌بندی عیوب

1 Train
2 Test

ضمائم

متغیرهای استفاده شده در جدول ۳ در زیر شرح داده شده‌اند:

x : مقادیر سیگنال در هر نمونه^۱

$\bar{x}$: مقدار میانگین سیگنال در هر نمونه

N : تعداد نقاط سیگنال (نرخ نمونه برداری)

M : تعداد دفعات داده‌برداری

i : شماره نقاط سیگنال

j : شماره داده‌برداری

d : سیگنال تفاضل

$\bar{d}$: میانگین سیگنال تفاضل

r : سیگنال باقیمانده

$\bar{r}$: میانگین سیگنال باقی مانده

σ : انحراف استاندارد

$Peak$: شاخص قله

منابع

- [1] Bayoumi, A., N. Goodman, R. Shah, T. Roebuck, A. Jarvie, L. Eisner, L. Grant, and J. Keller, "Condition-based maintenance at USC-Part III: Aircraft components mapping and testing for CBM". *Proceedings of the American Helicopter Society Specialists Meeting on Condition-Based Maintenance*, Huntsville, AL. 2008.
- [2] Wang, W. J. and P. D. McFadden, "Application of the wavelet transform to gearbox vibration analysis". *American Society of Mechanical Engineers, Petroleum Division (Publication) PD*, Houston, TX, USA. 1993.
- [3] Wang, W. J. and P. D. McFadden, "Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection". *Journal of Sound and Vibration*, 192 (1996): 927-939.
- [4] Saravanan, N. and K. I. Ramachandran, "Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN)". *Expert Systems with Application*, 37 (2010): 4168-4181.
- [5] Wang, C. C., "Application of fault diagnosis in rotating machinery by using time Series analysis with neural network". *Expert Systems with Application*, 37 (2010): 1696-1702.
- [6] Li, B., M. Y. Chow, Y. Tipsuwan and J. C. Hung, "Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47.5 (2000): 1060-1069.
- [7] Kang, Y., C. C. Wang, Y. P. Chang, C. C. Hsueh and M. C. Chang, "Certainty improvement in diagnosis of multiple

همچنین استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی با قطعات کار نکرده می‌تواند نتایج بهتری استخراج گردد. با وجود پیچیده بودن سیستم آزمایش و شباهت بسیار با سیستم واقعی بالگرد، روش پیشنهادی تنها خطایی در حدود ۱۶ درصد دارد. لازم به ذکر است که با توجه به مرزی بودن خطاهای ایجاد شده مطابق شکل ۹، با افزایش شاخصه‌های محاسبه شده برای سیگنال‌ها و جمع‌آوری اطلاعات بیشتر از سیگنال‌ها می‌توان میزان خطا را کاهش داد.

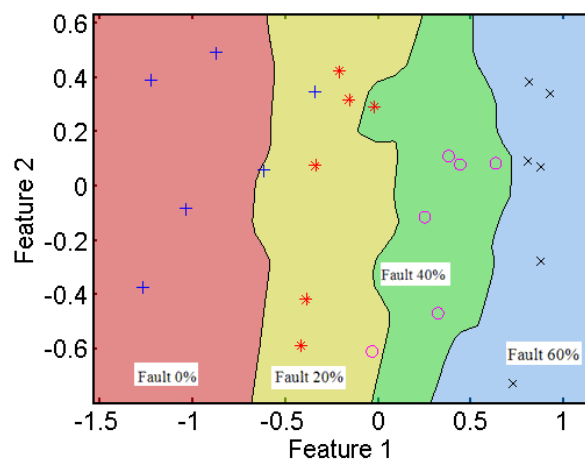


Fig. 9. Classifier results for faulty gear wear

شکل ۹: نتایج حاصل از آزمایش کلاسیفایر برای عیب چرخ‌دنده

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت روش نزدیکترین همسایگی در تشخیص عیب سایش با اعمال کردن آن روی داده‌های حاصل از مجموعه آزمایشگاهی گیربکس ۹۰ درجه بالگرد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به پیچیدگی بیش از حد سیستم انتقال قدرت دمی بالگرد و درصد نویز بالا در سیگنال‌های جمع‌آوری‌شده، استفاده از پارامترهای آماری در حوزه زمان به تنهایی قابلیت اعتماد بالا نداشته و لذا از تبدیل موجک در حوزه زمان-فرکانس نیز استفاده شد. نتایج به دست آمده از آزمایش امیدوارکننده است و این روش نه تنها سالم و معیوب بودن گیربکس را تشخیص می‌دهد بلکه میزان عیب را در چهار کلاس از یکدیگر تشخیص می‌دهد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای مهندس صالحی و کلیه همکاران در شرکت صنایع هواپیماسازی به ویژه گروه مهندسی تایپ، کارگاه دینامیک و گروه آنالیز بالگرد که در بخش عملی این تحقیق همکاری لازم را نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

- Helicopter Society Specialists Meeting on Condition-Based Maintenance*, Huntsville, AL. 2008.
- [13] Wuxing, L., W. T. Peter, Z. Guicai and S. Tielin, "Classification of gear faults using cumulants and the radial basis function network". *Mechanical systems and signal processing*, 18 (2004): 381-389.
- [14] Qingbo, H., K. Fanrang and Y. Ruqiang, "Subspace-based gearbox condition monitoring by kernel principal component analysis". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2007): 1755-1772.
- [15] Mohammadi Takami, S. M., "Data Pre-processing and Pattern Recognition Methods", Khajeh Nasir Toosi University of Technology, 2005.
- [16] Ziaei-Rad, S. and S. Nourian, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Rotating Machinery", Daneshpajooohanbarin, 2008.
- [17] Zakrajsek, J. J. and D. G. Lewicki, "Detecting gear tooth fatigue cracks in advance of complete fracture". *Tribo Test Journal*, 4.4 (1998): 407-422.
- [18] Zakrajsek, J. J., D. P. Townsend and H. J. Decker, "An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2007): 1755-1772.
- faults by using versatile membership functions for fuzzy neural networks". *Lecture Notes in Computer Science*, 3973 (2006): 370-375.
- [8] Loparo, K., "Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18 (2004): 1077-1095.
- [9] Saravanan, N., S. Cholairajan and K. I. Ramachandran, "Vibration-based fault diagnosis of spur bevel gearbox using fuzzy technique". *Expert Systems with Applications*, 36 (2009): 3119-3135.
- [10] Yaguo, L. and J. Z. Ming, "Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (2009): 1535-1547.
- [11] Demoura, E. P., C. R. Souto, A. A. Silva and M. A. S. Irmao, "Evaluation of principal component analysis and neural network performance for bearing fault diagnosis from vibration signal processed by RS and DF analyses". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25 (2011): 1765-1772.
- [12] Bayoumi, A., N. Goodman, R. Shah, L. Eisner and L. Grant and J. Keller, "Conditioned-Based Maintenance at USC - Part IV: Examination and Cost-Benefit Analysis of the CBM Process". *Proceedings of the American*

Please cite this article using:

H. Saeidi and M.S. Safizadeh, "Gear Wear Fault Diagnosis in Tail Gearbox of Helicopter Using K-Nearest Neighbor Recognition Pattern" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 341-350.

DOI: 10.22060/mej.2016.780

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



