

مقدمة

مقدمة

من المعلوم أن الخصائص الأساسية للارتجاج (الاهتزاز) تتمثل بما يلي: انتقال الارتجاج، سرعة الارتجاج، تسارع الارتجاج. هذه الخصائص يمكن أن تُستخدم كبارامترات للتشخيص الفني. لتحديد قيم هذه الخصائص تُوجد مجموعة متنوعة من الطرق التي تُستخدم أنواع مختلفة من الأجهزة والتجهيزات.

ولعل أهم ما يميز طرق التشخيص الارتجاجي هو استخدام البارامترات الديناميكية التي تظهر نتيجة التأثير المتبادل بين القطع المتحركة أثناء العمل. الاهتزازات المرنة التي تحدث أثناء ذلك تنتشر داخل القطع المتحركة وفي الوسط الخارجي، حيث يتم التقاطها وتسجيلها على شكل بارامترات: انتقال، سرعة، تسارع.

من أهم المواضيع التي يجب معالجتها أثناء حل المسائل المتعلقة بالتشخيص الارتجاجي ودراسة الاهتزازات هو اعداد نموذج مكافئ للألة المدروسة وتحديد العلاقة بين البارامترات التصميمية لهل وبين خصائص ومواصفات الإشارات الاهتزازية الصادرة عنها أثناء العمل، التي يمكن أن تحمل المعلومات التشخيصية المطلوبة لتحديد الحالة الفنية لهذه الآلة.

بناء على ذلك ولأن لطرق التشخيص باستخدام مؤشرات الاهتزازات قيمه تشخيصيه كبيره في الآلات الدوارة وأجزائها، سنقوم بدراسة الاهتزازات على المحامل الكروية باستخدام نموذج معد مخبريا للقيام بإجراء التجارب المطلوبة واستخلاص البيانات التي من خلالها سيتم تقييم وتشخيص كفاءة أو فشل هذه المحامل.

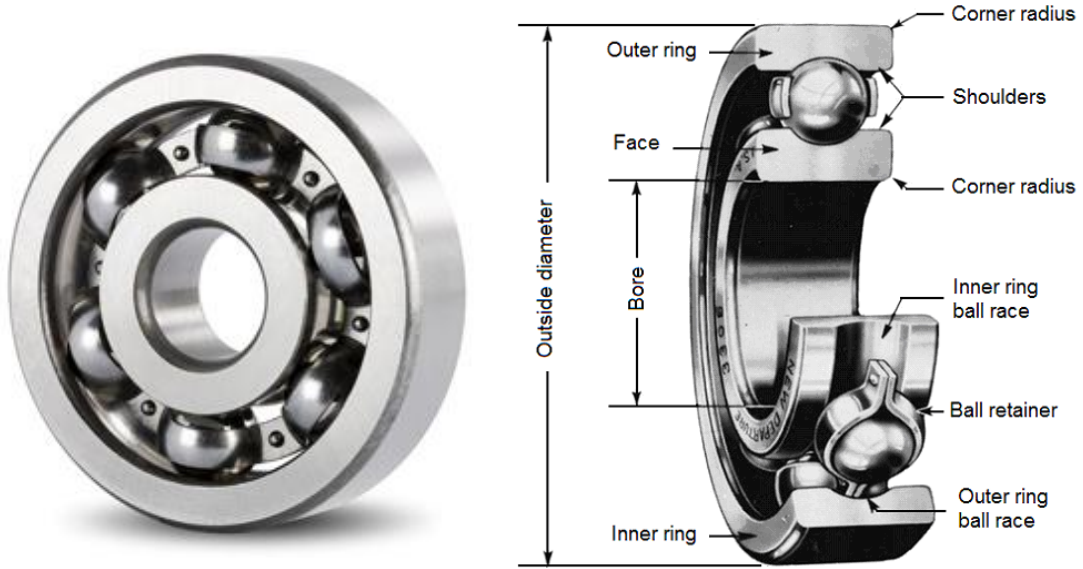
1. المحامل الكروية (Ball bearings):

هي نوع من المحامل التي تحتوي عنصر متدحرج (كرة) وتعتبر من الأجزاء الأساسية في المحركات بشكل خاص وفي مختلف الآلات والتطبيقات الميكانيكية بشكل عام. والغرض منها تقليل الاحتكاك الدوراني ودعم الأحمال المحورية والشعاعية.

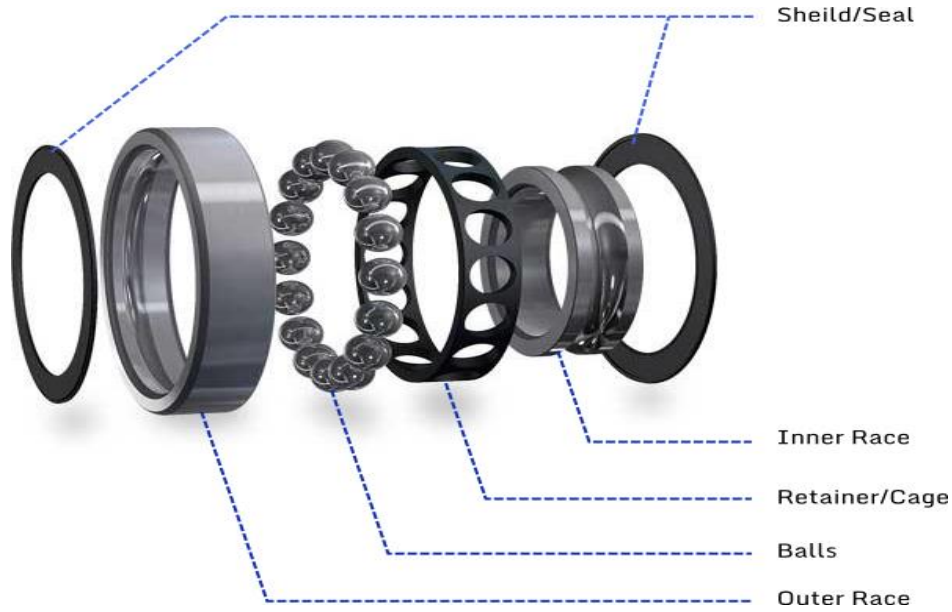
تعتبر هذه المحامل محور ارتكاز العضو الدوار الذي يسمح له بحرية الحركة دون الاحتكاك بمجاري المحرك وذلك لوجود الثغرة الهوائية (المسافة بين الجزء الثابت والجزء الدوار)، حيث يتحقق تقليل الاحتكاك الدوراني عبر هذه المحامل باستخدام مجريين لاحتواء الكرات (العنصر المتدحرج) ونقل الأحمال عبر الكرات.

في معظم التطبيقات يكون أحد المجاري ثابت والأخر مرتبط بالآلية الدوارة مثل (عمود أو محور)، وعندما يدور المجرى المتحرك في المحمل ستدور الكرات بدورها، وعليه فإن ذلك بالطبع سيقلل قيمة معامل الاحتكاك بفرق واضح فيما لو لم تكن تلك التقنية موجودة.

• بنيتها وأجزائها:



الشكل (1) بنية المحامل الكروية أحادية الصف



الشكل (2) أجزاء المحامل الكروية أحادية الصف

في هذا البحث تم اجراء الدراسة على المحامل من الشكل الكروي (Ball bearing) حيث يكون العنصر المتدحرج هو (الكرات)، وتختلف أنواع المحامل الكروية فيما بينها الى عدة أنواع، كما ان المحامل (Bearings) أو (كراسي المحور) كما تسمى أحيانا تختلف أنواعها بحسب التصميم ونوع العنصر المتدحرج المستخدم فيها.

• توصيف المحمل:

ويتم توصيف أي نوع من انواع المحمل برقم يسمى التعيين او الدلالة (Designation) وهو عادة يتكون من 4 ارقام (الأساسية) كل رقم منهم له دلالة في توصيف المحمل مثال للتوضيح:

المحمل ذو الرقم 3214:

* 14 أول رقمين على اليمين دلالة على القطر الداخلي ويتم حسابه بضرب الرقمين بثابت عددي هو الرقم (5)

القطر الداخلي = $14 * 5 = 70 \text{ mm}$

* 2 الرقم الثالث من اليمين يدل على قيمة الاجهاد:

- | | |
|-----------------|-------------------|
| (0) حمل لا يذكر | (1) حمل خفيف جداً |
| (2) حمل خفيف | (3) حمل متوسط |

(4) حمل كبير .



الشكل (3)

Angular contact ball bearing
(SKF)

* 3 الرقم الرابع من على اليمين يدل على نوع المحمل:

Angular contact ball bearing = 3

(محمل ذو بلحات اسطوانية مدببة)

فيكون المحمل الذي نتكلم عنه ذو الرقم 3214 بالواصفات التالية

- القطر الداخلي = 70 مم

- نوع الإجهاد: حمل خفيف

وهذا المحمل من انتاج شركة (SKF) وهو موضح في

الشكل (3) المرفق جانبا.

ملاحظة: الدلالات والرموز قد تختلف حسب الشركة الصانعة.

حيث أحيانا يتم إضافة رموز او ارقام اضافيه بهدف الدلالة على خواص وتفاصيل تصميميه أخرى للمحمل، للتوضيح نذكر المثال التالي:

SS 62 03 ZZ C3 XX

نلاحظ وجود مجموعة من الرموز إضافة الى الأرقام الأربعة الرئيسية (62 03)، حيث:

▪ (SS) توضيح بعض الخواص الرئيسية للمحمل:

ومنها (k) وتعني ان المحمل مجمعة بجميع كامل بقبص والحرف (L) وتعني حلقة منفصلة اسطوانية ومحمل من النوع الأبري وغيرها من الحروف من L-R-WS-GS. ونادرا ما يكتب ولذلك نجد ان معظم انواع المحمل يبدأ بالرقم الذي يوضح نوع البلية.

▪ (ZZ) وهو يدل على الغطاء ومانع التسرب:

(Z) غطاء من جهة واحدة، (ZZ) غطاءين من كلا الجهتين.

(RS) مانع تسريب من جهة واحدة، (RS2) مانع تسريب من الجهتين.

▪ (C3) نسبة الخلوص الداخلي للمحمل وتزيد مع زيادة سرعة الآلة:

(C0) معناه لا يوجد، اي نسبة قياسية.

(C2) محكم.

(C3) نسبة خلوص بسيطة.

(C4) نسبة خلوص كبيرة.

▪ (XX) علامات اضافية تدل على أبعاد خاصة أو نوع الشحم وكيفية تعبئته.

NR Snap Ring

PRX Polyrex EM Grease

SR12 SRI-2 GREASE

2. أسباب فشل المحامل:

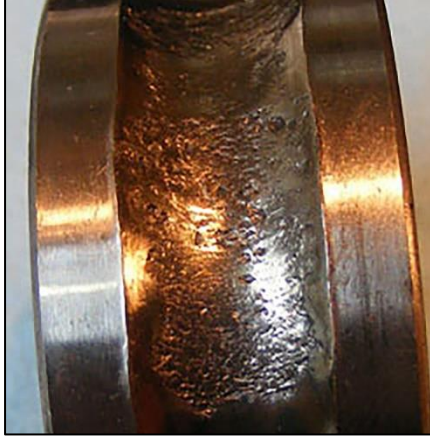
مصطلح الفشل يعبر عن عدم قدرة هذه المحامل على أداء الوظيفة المصممة لأجلها نتيجة لعدة أسباب رئيسية:

A. تآكل / احتكاك ميكانيكي: ويحصل هذا التآكل نتيجة للاحتكاك الميكانيكي بسبب نقص التزييت أو انعدام التزييت، أو بسبب دخول جزيئات صغيرة (رمل، ريش، غبار ...) الى أجزاء المحمل الدوارة.

B. تشكل قوس كهربائي: يعني أن يكون هناك مصدرا للتيار الكهربائي موجود ضمن الالاهيه بحيث يقوم أحد أجزاء المحمل بدور القطب الموجب والجزء الاخر بدور القطب السالب.. فتتولد شرارة عند أضعف نقطة يتأين فيها الهواء، الأمر الذي يؤدي الى حدوث تلاحم يتطور الى تشقق مع الحركة، أو ان يؤدي ارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن القوس الكهربائي الى تغير في الخصائص الميكانيكية أو الكهربائية في المحمل.

C. حدوث كسر/ تلف أحد أجزاء المحمل: ويحدث هذا الكسر نتيجة عدة عوامل منها الحرارة العالية جداً، التحميل الزائد، اجهاد التعب، التحميل المفاجئ، التغير في أبعاد المحمل (نتيجة التمدد الحراري)،

D. المعايرة الخاطئة: أو الانزياح، وهو من أهم الأسباب التي تؤدي الى دمار المحمل والتي قد تكون نتيجة التركيب الخاطئ.



الشكل (5)

احتكاك ميكانيكي وتآكل في المجرى الداخلي.



الشكل (4)

تآكل وتشقق في المجرى الداخلي.

وقبل الانتقال الى اختبارات المحامل وتشخيص الأخطاء لابد من التنويه الى أهم العوامل التي يجب أخذها بعين الاعتبار عند اختيار نوع المحمل المستخدم في النظام الميكانيكي او الآلية، الامر الذي سينعكس إيجاباً على وثوقية وكفاءة عمل هذه الأنظمة. وهي:

- المساحة المتاحة ضمن الآلية.
- الأحمال المطبقة (قيمة واتجاه).
- متطلبات الدقة (دقة عمل النظام أو الآلية).
- السرعة.
- الضجيج والأصوات الصادرة عن المحمل أثناء التشغيل.
- تماسك المحمل وتجنب الاهتزازات.
- سماحية الإزاحة الأفقية للعمود الذي سيتم تركيب المحمل عليه.
- سهولة الفك والتركيب للمحمل (التبديل).
- طريقة التزييت أو التشحيم.

3. التشخيص السلوكي للمحامل الكروية بدراسة الاهتزازات:

يلعب التشخيص السلوكي للمحامل دوراً أساسياً في إدارة العديد من أنظمة الآلات الدوارة كما أن التشخيص المبكر لفشل المحامل مهم جداً لتحسين موثوقية وسلامة الآلات الدوارة المستخدمة على نطاق واسع في الصناعة.

ولتحقيق التشخيص المبكر، كما ذكر سابقاً، لابد من اعداد نموذج مكافئ (موديل) أو جهازاً يجري استخدامه مخبرياً، ليتم اجراء التجارب بشكل يحاكي ظروف العمل الحقيقية على هذا النموذج، بحيث نستطيع جمع المعلومات والبيانات والانماط اللازمة كي يتم تحليلها بغية الوصول الى النتائج المطلوبة والتي على أساسها سيتم تقييم الحالة الفنية لهذه المحامل.

• اختبار المحامل الكروية (ball bearing test):

يعتبر هذا الاختبار الأكثر شيوعاً واستخداماً لغرض تشخيص عمل المحامل، ويمكن تعريفه على أنه: اختبار مصمم ل تحديد العمر التشغيلي وتوصيف عمل وأداء هذه المحامل بناءً على المعطيات التي يتم الحصول عليها بما يتعلق بالحالة الفيزيائية والفنية لأجزاء المحمل والمواد المستخدمة في بنية هذا المحمل باستخدام تقنيات تجريبية، معتمدين بذلك على البيانات التي تم جمعها عن طريق معالجة الإشارات الاهتزازية.

✓ النظام التجريبي (Experimental setup):

تم في هذا البحث الاعتماد على البيانات التي قدمها موقع جامعة **CASE WESTERN RESERVE** بالإضافة الى التفاصيل الأخرى المتعلقة بالإجراءات التجريبية.



يوفر هذا الموقع إمكانية الوصول إلى بيانات اختبار المحمل الكروي للمحامل العادية والخاطئة. أجريت التجارب باستخدام محرك Reliance Electric بقوة 2 حصان، وتم قياس بيانات التسارع في مواقع قريبة من محامل المحرك وبعيدة عنها، حيث تم توثيق ظروف الاختبار الفعلية للمحرك بالإضافة إلى حالات الخطأ بعناية لكل تجربة.

تم زرع محامل المحرك بأعطال باستخدام آلية التفريغ الكهربائي

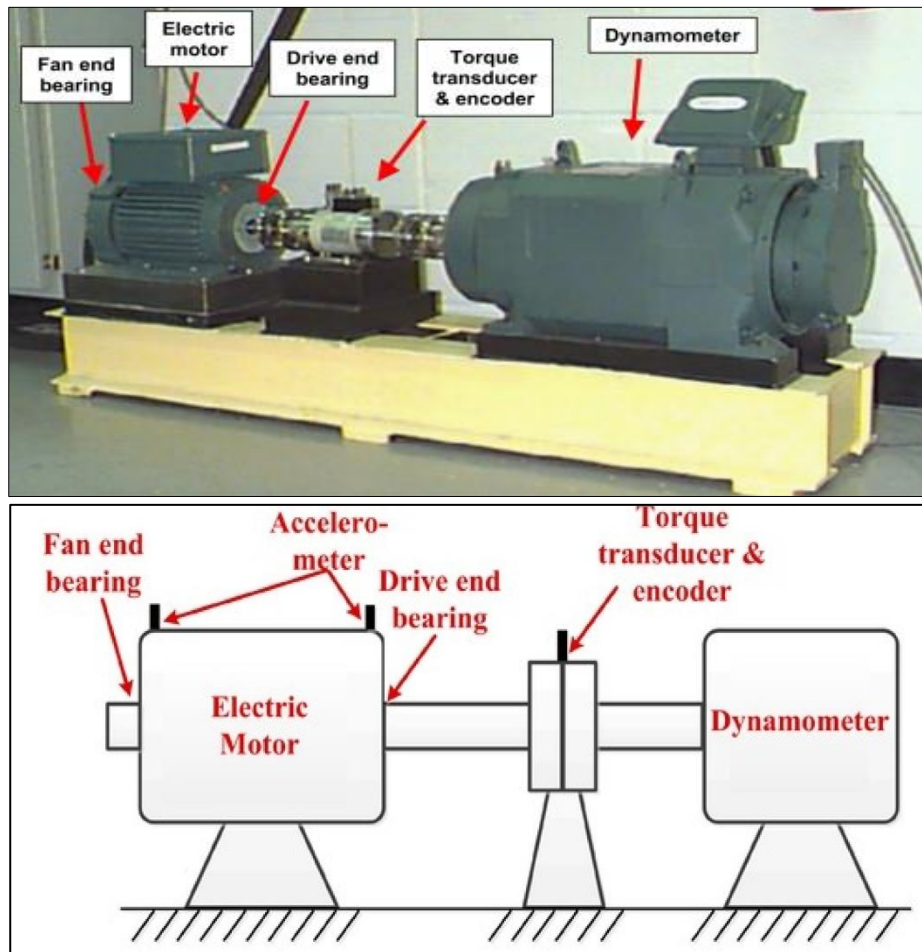
(EDM). تم إدخال أخطاء تتراوح من 0.007 بوصة في القطر إلى 0.040 بوصة في القطر بشكل منفصل في المجرى الداخلي، وعنصر التدحرج (أي الكرة) والمجرى الخارجي. تم إعادة

تركيب المحامل التالفة في محرك الاختبار وتم تسجيل بيانات الاهتزاز لأحمال المحرك من 0 إلى 3 حصانا (سرعات المحرك من 1797 إلى 1720 دورة في الدقيقة).

✓ الأجهزة والإجراءات:

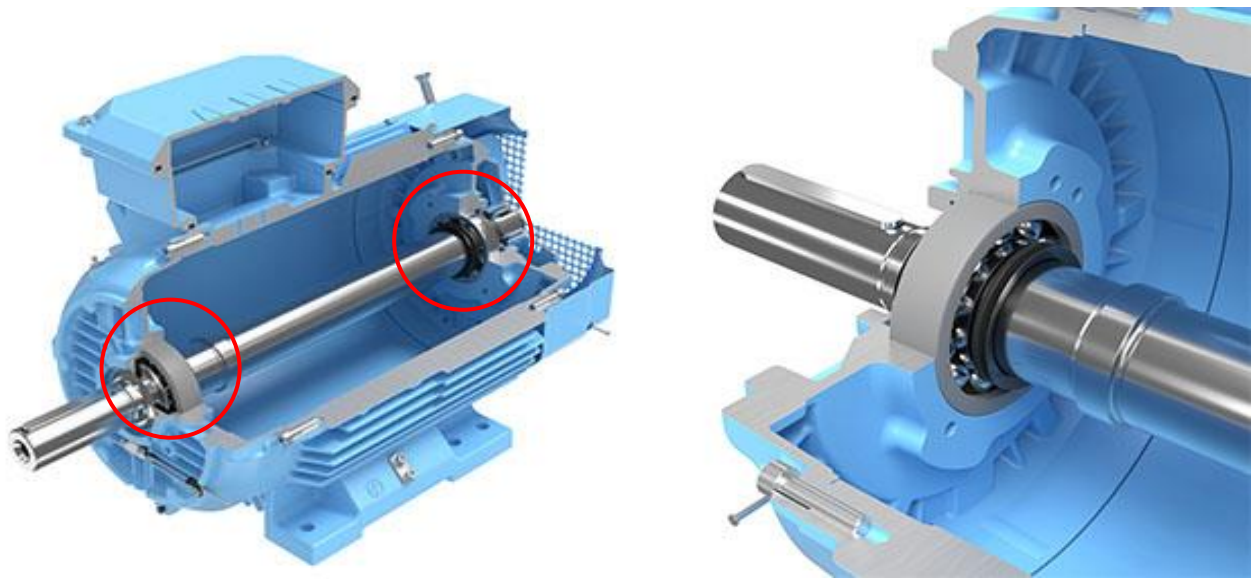
كما هو موضح في الشكل (6)، يتكون نموذج الاختبار من محرك بقوة 2 حصان (يسار)، محول / مشفر عزم الدوران (وسط)، دينامومتر (يمين)، وإلكترونيات تحكم (غير معروضة). تدعم محامل الاختبار عمود المحرك. تم إدخال أخطاء نقطة واحدة إلى محامل الاختبار باستخدام الآلات التفريغ الكهربائي بأقطار خطأ من 7 مل و 14 مل و 21 مل و 28 مل و 40 مل و 1 مل = 0.001 بوصة).

تم استخدام محامل **SKF** لأخطاء قطرها 7 و 14 و 21 مل، وتم استخدام محامل **NTN** المكافئة لعيوب 28 مل و 40 مل.



الشكل (5) نموذج الاختبار

تم جمع بيانات الاهتزاز باستخدام مقاييس التسارع (Accelerometers) التي تم تثبيتها على الغلاف بقواعد مغناطيسية. تم وضع مقاييس التسارع بوضعية الساعة 12 على نهايتي المحرك (نهاية محرك الأقراص **drive end** ونهاية المروحة **fan end**). تم جمع إشارات الاهتزاز باستخدام مسجل DAT 16 قناة، وتمت معالجتها بعد ذلك في بيئة MATLAB. تم جمع البيانات الرقمية عند 12000 عينة في الثانية، كما تم جمع البيانات في 48000 عينة في الثانية لأخطاء حمل نهاية محرك الأقراص. تم جمع بيانات السرعة والقدرة الحصانية باستخدام محول / مشفر عزم الدوران وتم تسجيلها يدوياً.



الشكل (6) توضع المحامل الكروية على نهايتي المحرك

تعريف موجزة بالأجهزة المستخدمة ضمن نموذج الاختبار:

▪ الدينامو متر (Dynamometer): اله تستخدم لقياس عزم الدوران للمحرك.

طبعاً تختلف انواعه باختلاف الية ومبدأ عمله.

من أنواعه:

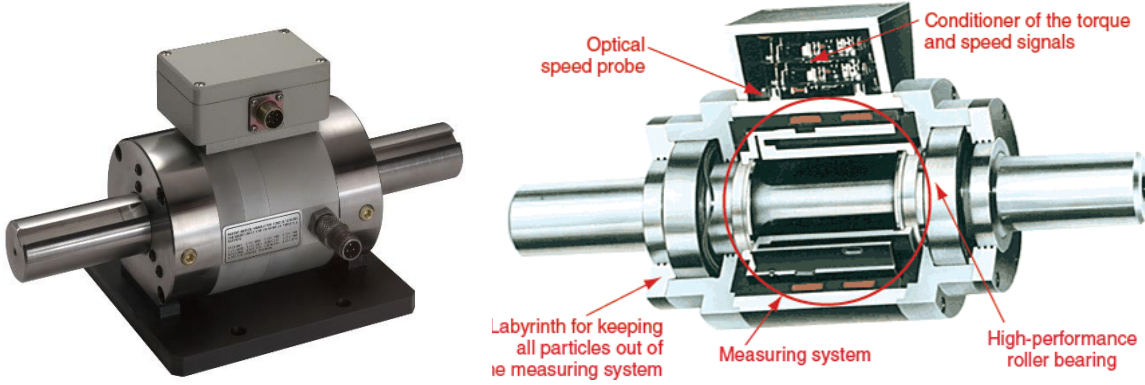
- الدينامو متر الهيدروليكي.
- الدينامو متر الكهربائي.
- الدينامو متر الامتصاصي.
- الدينامو متر الناقل.



الشكل (7) DYN.

▪ محول عزم الدوران (Torque transducer/encoder) :

مستشعر عزم الدوران (حساس)، أو عداد عزم الدوران هو جهاز لقياس وتسجيل العزم على نظام دوار، مثل المحرك، عمود المرفق، علبة التروس، ناقل الحركة، أو اختبار عزم الدوران.



الشكل (8) محول عزم الدوران.

▪ جهاز قياس التسارع (ACCELEROMETER):

مقياس التسارع هو مستشعر (كهر ضغطي / كهربائي) يقيس التسارع الديناميكي للجهاز المادي كجهد. مقاييس التسارع عبارة عن محولات طاقة كاملة التلامس يتم تركيبها بشكل مباشر على عناصر عالية التردد، مثل المحامل ذوات العناصر الدوارة أو علب التروس أو شفرات الغزل...، يمكن أيضًا استخدام هذه المستشعرات المتعددة في قياسات الصدمات (الانفجارات واختبارات الفشل) وقياسات الاهتزاز البطيئة ذات التردد المنخفض.

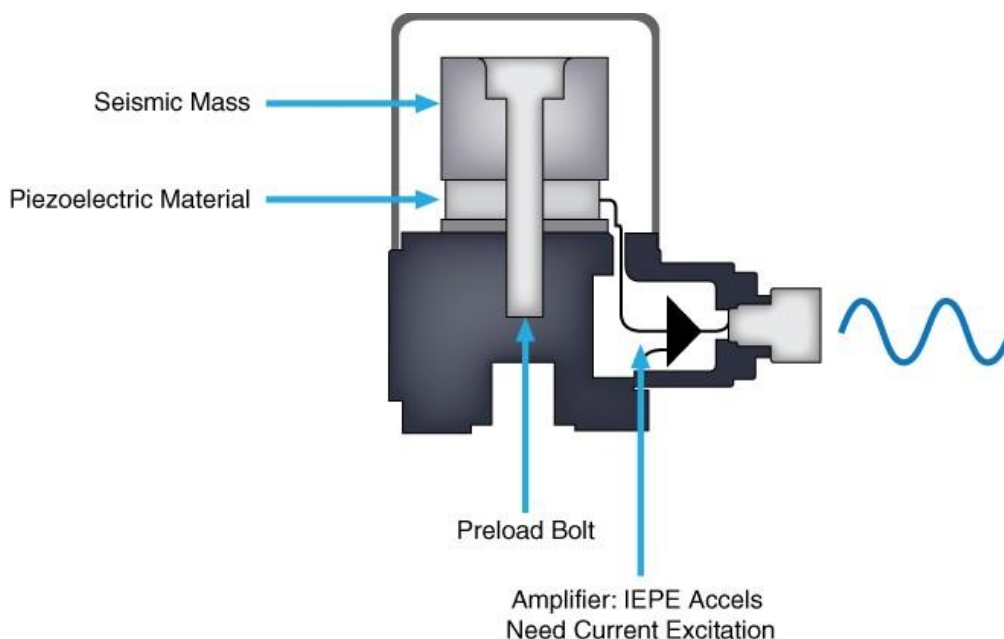


الشكل (9) Accelerometer

كيف تعمل مقاييس التسارع؟

تعتمد معظم مقاييس التسارع على استخدام التأثير الكهرضغطي، والذي يحدث عندما يتم توليد جهد عبر أنواع معينة من البلورات، وعند إجهاها ينتقل تسارع هيكل الاختبار إلى كتلة

زلزالية داخل مقياس التسارع الذي يولد قوة متناسبة على البلورة الكهرو ضغطية. ثم يولد هذا الضغط الخارجي على البلورة شحنة كهربائية عالية المقاومة تتناسب مع القوة المطبقة، وبالتالي تتناسب مع التسارع.



الشكل (10) مبدأ عمل مقياس التسارع.

تتطلب مقاييس التسارع الكهروضغطية مضخمًا خارجيًا أو محول شحن داخلي (ضمني) لتضخيم الشحنة المولدة، وخفض مقاومة الخرج للتوافق مع أجهزة القياس، وتقليل القابلية للتأثر بمصادر الضوضاء الخارجية والتداخل المتبادل. تحتوي مقاييس التسارع الأخرى على مضخم حساس للشحن بداخلها. يقبل مضخم الصوت هذا مصدر تيار ثابت ويغير مقاومته فيما يتعلق بشحنة متغيرة على البلورة الكهروضغطية. ويشار إلى هذه المستشعرات بأجهزة استشعار كهروضغطية إلكترونية متكاملة (IEPE).

وبالعودة الى اجراءات التجربة:

يوضح الجدول (1) مواصفات الأخطاء التي تم زرعها في المحامل حيث يتضمن:

- موقع الخطأ (المجرى الخارجي، المجرى الداخلي، الكرة).
- ابعاد الخطأ أو التشقق (العمق والقطر).
- موضع المحمل والشركة الصانعة.

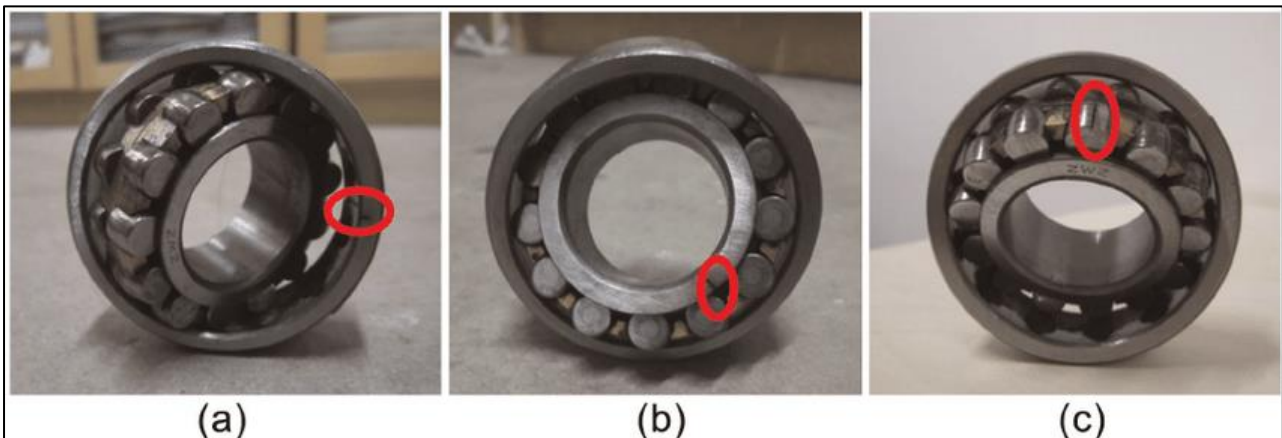
(1) الجدول

Fault Specifications

Bearing	Fault Location	Diameter	Depth	Bearing Manufacturer
Drive End	Inner Raceway	.007	.011	SKF
Drive End	Inner Raceway	.014	.011	SKF
Drive End	Inner Raceway	.021	.011	SKF
Drive End	Inner Raceway	.028	.050	NTN
Drive End	Outer Raceway	.007	.011	SKF
Drive End	Outer Raceway	.014	.011	SKF
Drive End	Outer Raceway	.021	.011	SKF
Drive End	Outer Raceway	.040	.050	NTN
Drive End	Ball	.007	.011	SKF
Drive End	Ball	.014	.011	SKF
Drive End	Ball	.021	.011	SKF
Drive End	Ball	.028	.150	NTN

Fan End	Inner Raceway	.007	.011	SKF
Fan End	Inner Raceway	.014	.011	SKF
Fan End	Inner Raceway	.021	.011	SKF
Fan End	Outer Raceway	.007	.011	SKF
Fan End	Outer Raceway	.014	.011	SKF
Fan End	Outer Raceway	.021	.011	SKF
Fan End	Ball	.007	.011	SKF
Fan End	Ball	.014	.011	SKF
Fan End	Ball	.021	.011	SKF

(All dimensions in inches)



الشكل (11)

يوضح الشكل (11) نموذجاً عن الأعطال (الشقوق) في أجزاء المحمل الرئيسية.

وبالنسبة الى مواصفات المحامل المستخدمة:

الجدول (2)

Bearing Information

Drive end bearing: 6205-2RS JEM SKF, deep groove ball bearing

Size: (inches)

Inside Diameter	Outside Diameter	Thickness	Ball Diameter	Pitch Diameter
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

Defect frequencies: (multiple of running speed in Hz)

Inner Ring	Outer Ring	Cage Train	Rolling Element
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

Fan end bearing: 6203-2RS JEM SKF, deep groove ball bearing

Size:(inches)

Inside Diameter	Outside Diameter	Thickness	Ball Diameter	Pitch Diameter
0.6693	1.5748	0.4724	0.2656	1.122

Defect frequencies: (multiple of running speed in Hz)

Inner Ring	Outer Ring	Cage Train	Rolling Element
4.9469	3.0530	0.3817	3.9874

يقدم الجدول (2) المعلومات التالية:

- نوع المحمل ورقمه لكلا الطرفين (Fan end & Drive end).
- هندسة المحمل (الأبعاد والقياسات) (Inches) .
- ترددات الأخطاء (Hz).

✓ منهجية تحليل بيانات الاهتزازات:

من المعلوم أن عملية تحليل البيانات هي عملية تقييم البيانات باستخدام التفكير التحليلي والمنطقي لدراسة كلِّ مُكوّن من مكونات بيانات البحث، ويعتبر هذا التحليل مُجرّد خطوة واحدة من الخطوات العديدة التي يجب أن تكتمل عند إجراء تجربة البحث، ويتم جمع البيانات من مصادر مختلفة، ومراجعتها، ومن ثم تحليلها للوصول الى النتائج.

في هذا البحث تم جمع البيانات المطلوبة حيث تم اخذ العينات للمحامل المستخدمة في النموذج التجريبي في حالة العمل الطبيعية أي (دون أخطاء او اعطال)، وتم اخذ العينات أيضا لحالات العمل بوجود أخطاء (شقوق) بعدة ابعاد تحت ظروف عمل وحمولات مختلفة، حيث سنقوم في هذا البحث بتحليل هذه البيانات وذلك باستخدام طرق وأدوات تحليلية للحصول على النتائج المطلوبة. وضمن إطار البحث عن أفضل هذه الطرق التحليلية وأكثرها دقة وشيوعا واستخداما في مجالات التشخيص ودراسة الإشارات والاهتزازات وجدنا ما يلي:

بشكل عام يوجد الكثير من الطرق التي يمكن استخدامها لتحقيق هذه الغاية (كما ذكر سابقا) ، ولكن يوجد تفاوت واضح في دقة النتائج المستخلصة وامكانيات هذه الطرق والأدوات التحليلية .

من الممكن تصنيف بعض هذه الطرق الى:

1- طرق تحليل إشارات المجال الزمني:

(TIME DOMAIN SIGNAL ANALYSIS METHODS)

حيث يتم هنا معالجة إشارات المجال زمني لاستخراج الميزات الإحصائية مثل الانحراف المعياري **Standard division**، معامل التفرطح (التسطيح) **kurtosis**، معامل القمة **Crest factor**، المتوسط **Mean** و **Root mean square** المتوسط من الدرجة الثانية...

فمثلا تشير زيادة قيمة الانحراف المعياري للإشارة الاهتزازية الى وجود قمم (spikes) في هذه الإشارة مما يشير الى وجود خلل في العمل كما هو الحال في المحامل الكروية، كما يقيس أيضا مربع متوسط الجذر (المتوسط من الدرجة الثانية) محتوى الطاقة في الإشارة الاهتزازية، أيضا هذه الطرق تستخدم لتتبع مستوى الضجيج العام وتستخدم للكشف عن حالة عدم توازن رئيسية في المعدات الدوارة، لكنها لن تستطيع تحديد موقع الفشل بدقة.

2- تحليل التردد الزمني (TIME FREQUENCY ANALYSIS):

وهي الطرق التي سيتم اعتمادها في هذا البحث لتحليل بيانات الإشارات الاهتزازية.

في معالجة الإشارات، يشمل تحليل التردد الزمني تلك التقنيات التي تدرس إشارة في كلا المجالين (الزمن والتردد) في وقت واحد، وذلك باستخدام تحليلات تردد الوقت المختلفة حيث يعمل تحويل التردد الزمني على تعيين إشارة المجال الزمني في بعدين لإظهار تطور طيف محتوى البيانات مع الزمن.

من أهم هذه الطرق لدينا: تحويلات فورييه (FT)، تحويلات فورية القصيرة (STFT)، تحويلات فورييه السريعة (FFT)، تحويلات ويفليت (الموجيات) WAVELET بنوعيتها المنقطعة DWT والمستمرة CWT، بنك المرشح FILTER BANK، التحليل متعدد الدقة (MRA)

تم العمل في هذا البحث بشكل رئيسي على تحويلات فورييه (FT) والموجيات (WAVELET).

2-1- تحويلات فورييه (Fourier Transform):

وهي تعبير رياضي للعلاقة بين دالة الزمن ودالة التردد المقابلة أي التحويل من المجال الزمني الى المجال الترددي.

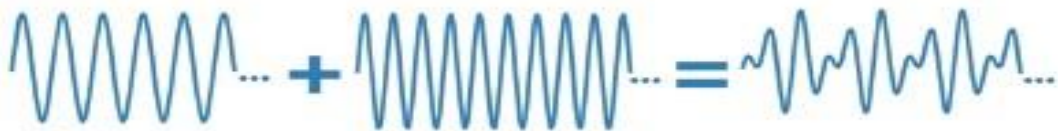
$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \quad \dots (1)$$

$$e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t \quad \text{حيث:}$$

$y(t)$ إشارة المجال الزمني.

$Y(\omega)$ إشارة المجال الترددي.

يعتبر تحويل فورييه أداة قوية وشائعة لتحليل البيانات ولكن لا يستطيع التعامل مع التغيرات المفاجئة في الإشارات الاهتزازية بكفاءة عالية، والسبب في ذلك هو أن فورييه يعرض البيانات كمجموع ل موجات جيبية غير محددة الزمان او المكان.



وتكمن محدودية تحويلات فورييه في النقاط التالية:

- يمكن حسابها لتردد واحد فقط في المرة الواحدة.
- تغير بسيط في الإشارة سيؤثر على طيف التردد بأكمله لهذه الإشارة.
- لا تعطي الصيغة الرياضية أية معلومات حول كيفية تغير الترددات مع الزمن.

لذلك ولتجاوز هذه الصعوبات سنقوم بالتبديل الى:

🔗 تحويلات فورييه القصيرة (Short Time Fourier Transform):

تستخدم تحويلات STFT للحصول على معلومات تقريبية من كلا المجالين (الزمن والتردد) في وقت واحد.

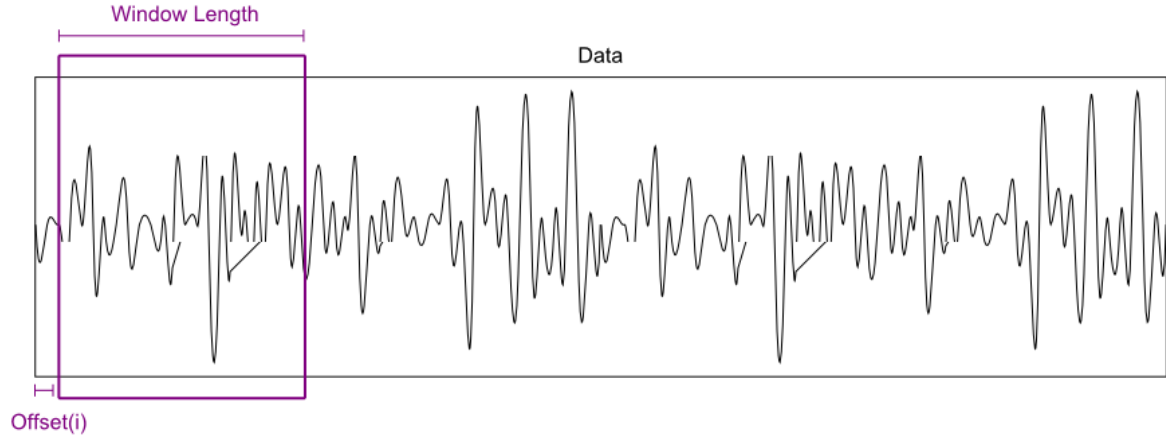
وتعطى بالعلاقة:

$$Y(t_0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \overline{\omega(t - t_0)} e^{-i\omega t} dt \quad \dots (2)$$

حيث:

$$e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$$

تعتمد تحويلات فورييه القصيرة على اخذ قطاع زمني صغير (نافذة زمنية) من الإشارة ثم يتم إزالة هذا القطاع في كل مرة وهكذا على امتداد المجال الزمني للإشارة الاهتزازية المدروسة.. كما هو موضح في الشكل (12).



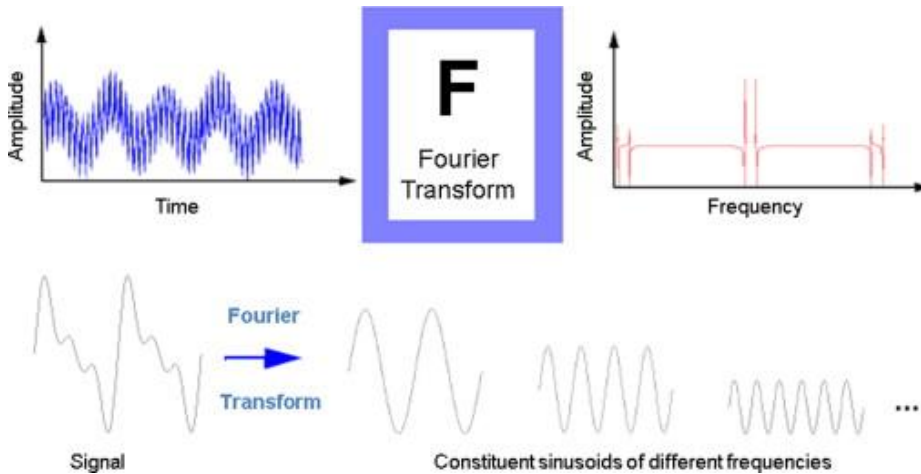
الشكل (12) STFT (Time Window)

توفر تحويلات فورييه القصيرة نوع من التوافق بين إشارة الزمن والتردد، كما انه يوفر بعض المعلومات حول متى وعند أية ترددات تحدث الإشارة، ومع ذلك يمكن فقط الحصول على هذه المعلومات بدقة محدودة (ضعيفة)، وهذا الأمر يتحدد بحجم النافذة.

تكمّن محدودية ال STFT في أن:

بمجرد اختيار حجم معين للنافذة الزمنية، ستكون هذه النافذة هي نفسها لجميع الترددات.. الأمر الذي يتنافى مع متطلبات العديد من الإشارات، إذ تتطلب مقارنة أكثر مرونة بحيث نستطيع تغيير حجم النافذة للحصول على دقة أكبر سواء في المجال الزمني أو الترددي، ولكن هذه المتطلبات يمكن تحقيقها باستخدام

تحويل WAVELET.



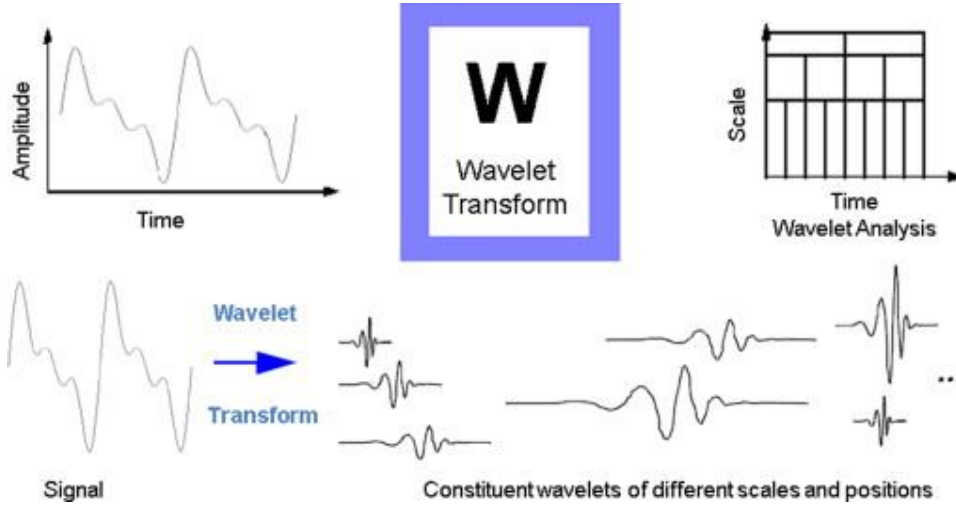
الشكل (13) FOURIER TRANSFORM OUTPUT

يبين الشكل (13)

المرفق جانبا خرج تحويل فورييه.

2-2- تحويل ويفليت (WAVELET Transform):

يعيد تحويل WAVELET طرح تقنية (النافذة الزمنية) ولكن بأطوال متغيرة على عكس STFT التي لا تدعم هذه الميزة. ويتيح تحويل WAVELET إمكانية استخدام مجالات زمنية طويلة حيث نريد معلومات دقيقة بترددات منخفضة، ومجالات أقصر حيث نريد معلومات عالية التردد.



الشكل (14) WAVELET TRANSFORM OUTPUT

كما ذكرنا سابقا يوجد لدينا نوعين ل تحويل WAVELET هما المتقطع (DWT) والمستمر (CWT) في هذا البحث سنعتمد على CWT.

تحويل ويفليت المستمر (The continuous WAVELET Transform):

الصيغة الرياضية:

$$C\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s,a}(t) dt \quad \dots (3)$$

$$\psi_{s,a}(t) = \frac{\varphi\left(\frac{t-s}{a}\right)}{\sqrt{|a|}} \quad \dots (4) \quad \text{حيث:}$$

تدعى $\psi_{s,a}(t)$ ب (Baby wavelets) أو المويجات ...

هذه المويجات صغيرة جدا جدا وغير منتظمة السلوك ضمن مجال زمني ضيق.

وعلى عكس الإشارات الجيبية التي تمتد الى ما لا نهاية، فان الموجات تكون قصيرة ومعدومة المطالات على الاطراف.

ان تحويل WAVELET يقوم على مفهومين أساسين (مميزتين) هما:

• **Scaling**

• **Shifting**

لنبدأ أولاً بمفهوم **scaling**: هذا المفهوم يشير الى عملية تمديد او تقليص الإشارة. حيث يمكن التعبير عنه رياضياً من خلال التابع التالي:

$$\Psi\left(\frac{t}{s}\right) \quad ; s > 0 \quad \dots (5)$$

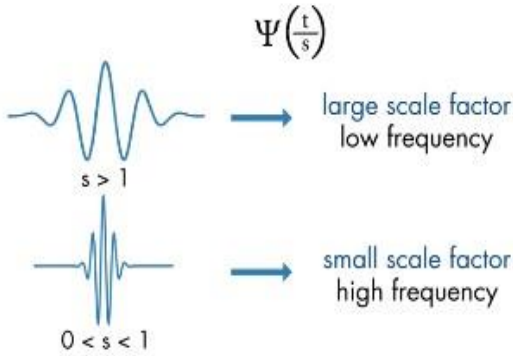
حيث S هي معامل ال Scaling وهي قيمة موجبة وتشير الى مقدار تمدد او تقلص الإشارة مع الزمن،



Scaling the 10Hz sine wave by 2



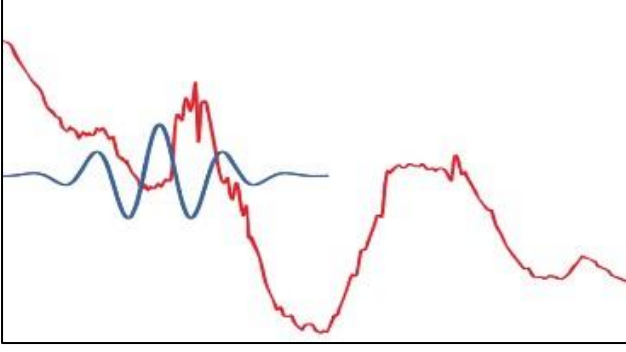
ويتناسب عكساً مع التردد. فمثلاً إذا طبقنا عملية ال scaling بمقدار $s=2$ على اشارته بتردد قيمته $t=10$ HZ فالنتيجة ستكون بتخفيض الإشارة الأساسية بمقدار النصف 5Hz.



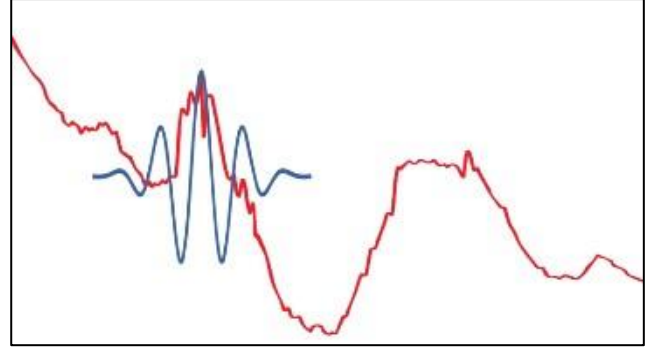
- قيمة أكبر للمعامل ($s > 1$) في موجة ممتدة تتوافق مع ترددات منخفضة.

- قيمة صغيرة للمعامل ($1 > s > 0$) في موجة مضغوطة تتوافق مع ترددات عالية.

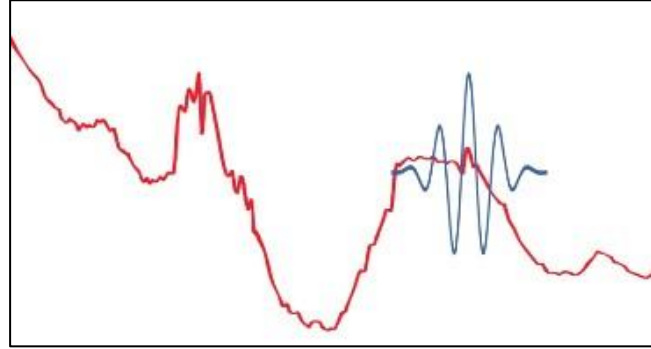
حيث الموجة الممتدة تساعد في التقاط الترددات البطيئة في الإشارة الاهتزازية كما في الشكل (15) بينما الموجة المضغوطة (المتقلصة) تساعد في التقاط التغيرات المفاجئة السريعة كما في الشكل (16) و (17).



الشكل (15)



الشكل (16)



الشكل (17)

أما مفهوم ال **Shifting**: فهو ببساطة يشير الى عملية تقديم او تأخير الموجة على طول المحور الزمني للإشارة الاصلية، فنحن نحتاج الى هذه العملية لكي تتطابق الموجة مع المميزات التي نبحث عنها في الإشارة الاهتزازية وبالتالي التقاط هذه المميزات.

في الخطوة القادمة والتي هي تطبيق هذه الطرق التحليلية على البيانات الخاصة بالمحامل الكروية ستتوضح قدراتها كما ستبين عملية معالجة البيانات الفروق في النتائج ودقتها في اكتشاف الأخطاء ومميزات هذه الأخطاء.

✓ عملية معالجة البيانات:

ستتم عملية معالجة البيانات للحصول على المخططات والقراءات المطلوبة باستخدام برنامج تم اعداده في بيئة **MATLAB** البرمجي حيث سنقوم بمعالجة 4 حالات للأخطاء المحتملة.



MATLAB

هذه الحالات المفترضة تم اختيارها من أصل كم كبير من الحالات التي

يمكن افتراضها واحتمالها وذلك بسبب الغنى الكبير للبيانات التي قدمها موقع جامعة **CASE**

.WESTERN RESERVE

تنويه: ستتضمن صيغ البرامج التي تم تصميمها لمعالجة البيانات أدوات تحليلية إضافية مثل التباين (VARIANCE) وال (PCA)، التي سيتم توضيحها تباعاً...، وذلك بهدف الحصول على توصيف وفرز أوضح للنتائج وتسهيل عملية مناقشتها.

أيضاً بالنسبة لتطبيق فورييه على النتائج تم استخدام تحويل فورييه السريع (FFT)

سنستخدم للاختصار الدلالات التالية (DE-FE-BA-Time-RPM) حيث:

DE – drive end accelerometer data

FE – fan end accelerometer data

BA – base accelerometer data

time – time series data

RPM– rpm during testing

سنبدأ ب الحالة الأولى:

موضع المحمل DE (الموضح في الشكل 6) / حمولة المحرك: 0 [HP] / موقع الخطأ: Inner race

سرعة دوران [rpm] 1772 .

```
% Copy right Basel Ibrahim 2020
% MATLAB 2018b
```

%This code for data loading and visualization of time-series data and variance for DE/IR under motor load %[HP] wit increased fault diameter

```
load 97 % Normal_0h Normal data with no fault
load 105 % IR007_0 Vibration data with fault diameter 0.007 inch
load 169 % IR014_0 Vibration data with fault diameter 0.014 inch
load 209 % IR021_0 Vibration data with fault diameter 0.021 inch
load 3001% IR028_0 Vibration data with fault diameter 0.028 inch

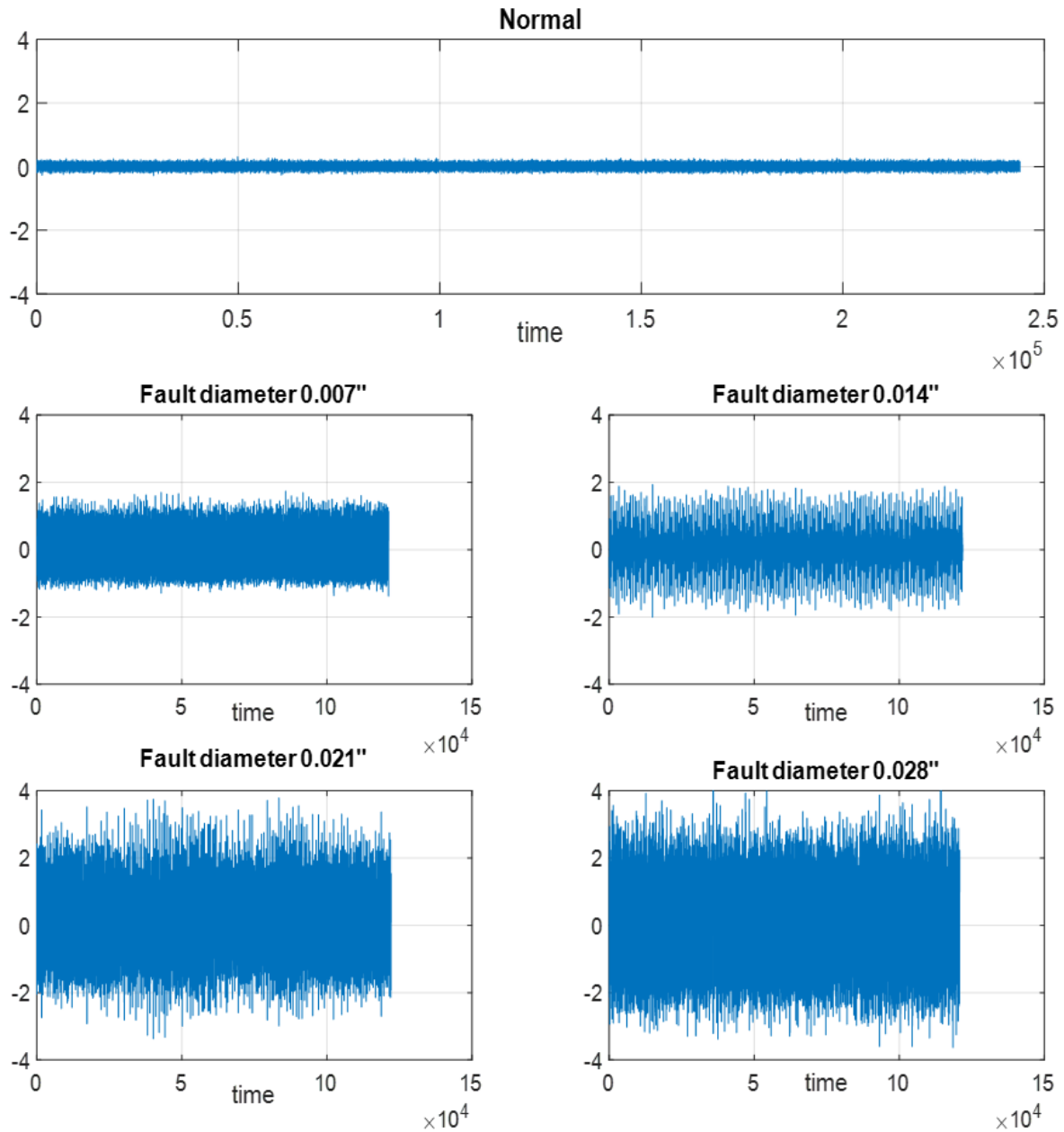
figure
suptitle('Visualization of DE/IR vibration data of normal and faulty DE when Motor Load =0 [HP]')
subplot(311);plot(X097_DE_time);title('Normal');xlabel('time');ylim([-4 4]);grid on
subplot(323);plot(X105_DE_time);title('Fault diameter 0.007"');xlabel('time');ylim([-4 4]);grid
subplot(324);plot(X169_DE_time);title('Fault diameter 0.014"');xlabel('time');ylim([-4 4]);grid
subplot(325);plot(X209_DE_time);title('Fault diameter 0.021"');xlabel('time');ylim([-4 4]);grid
subplot(326);plot(X056_DE_time);title('Fault diameter 0.028"');xlabel('time');ylim([-4 4]);grid

figure
suptitle('Histogram of DE vibration data of normal and faulty DE when Motor Load =0 [HP]')
subplot(311);hist(X097_DE_time,20);title('Normal');xlim([-4 4]);grid on
subplot(323);hist(X105_DE_time,20);title('Fault diameter 0.007"');xlim([-4 4]);grid
subplot(324);hist(X169_DE_time,20);title('Fault diameter 0.014"');xlim([-4 4]);grid
subplot(325);hist(X209_DE_time,20);title('Fault diameter 0.021"');xlim([-4 4]);grid
subplot(326);hist(X056_DE_time,20);title('Fault diameter 0.028"');xlim([-4 4]);grid

Variance_DE_0=[var(X097_DE_time) var(X105_DE_time) var(X169_DE_time)
var(X209_DE_time) var(X056_DE_time)]
%
labels= {'Normal' 'Fault diameter 0.007"' 'Fault diameter 0.0014"'
'Fault diameter 0.021"' 'Fault diameter 0.028"'};
figure;
bar(Variance_DE_0)
set(gca,'XTick',1:size(labels,2),'XTicklabel', labels);grid on
ylabel('Variance of vaibraiton data')
```


تنفيذ البرنامج السابق (CODE 1) يوضح تمثيلاً بيانياً لحالة العمل الطبيعية للمحمل DE بدون أخطاء ومع أخطاء تحت حمولة 0 [HP]. كما هو موضح في الشكل (18). بالإضافة إلى رسم بياني HISTOGRAM شكل (19) ومخطط التباين الشكل (20).

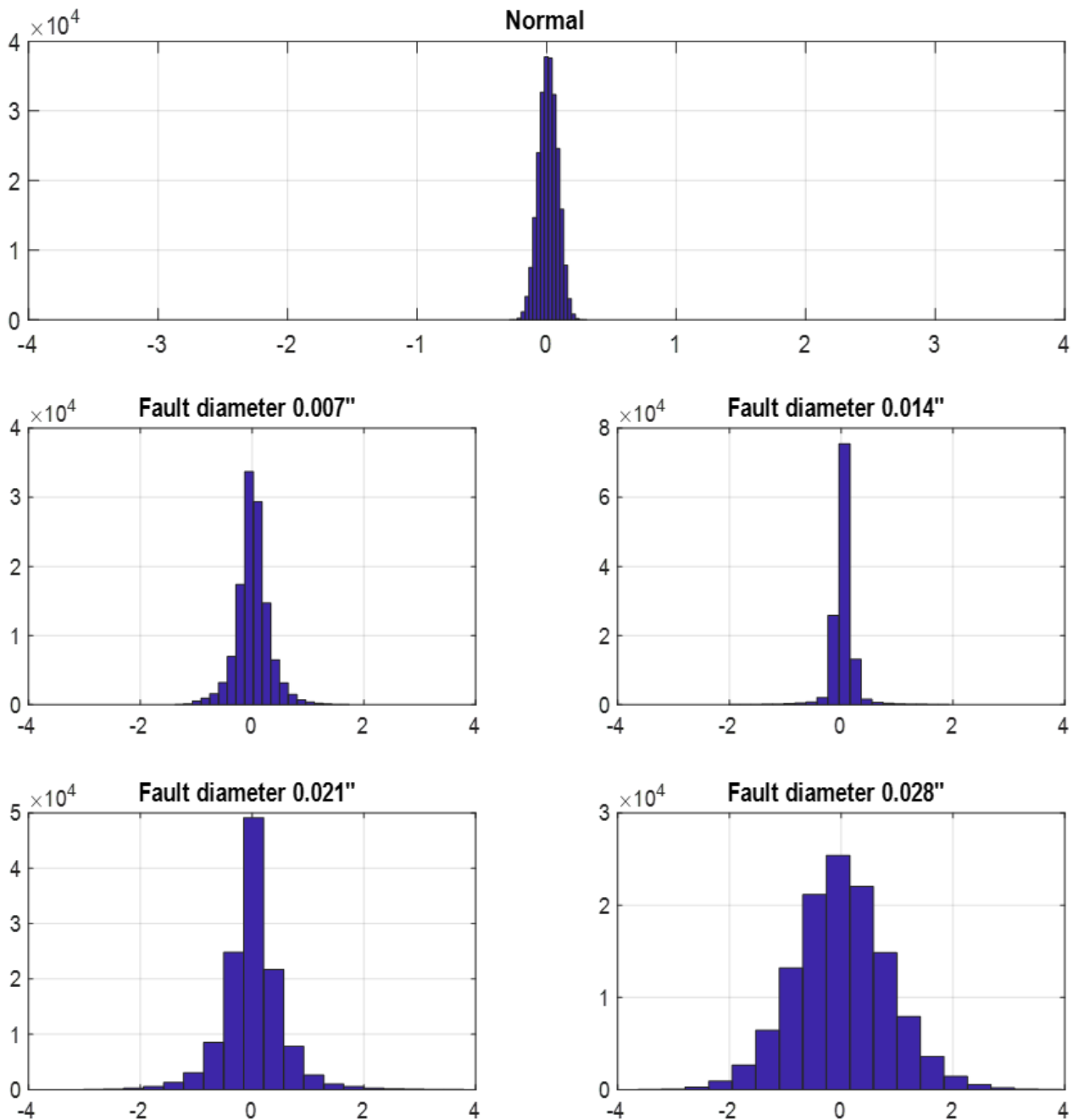
Visualization of DE vibration data of normal and faulty DE when Motor Load =0 [HP]



الشكل (18)

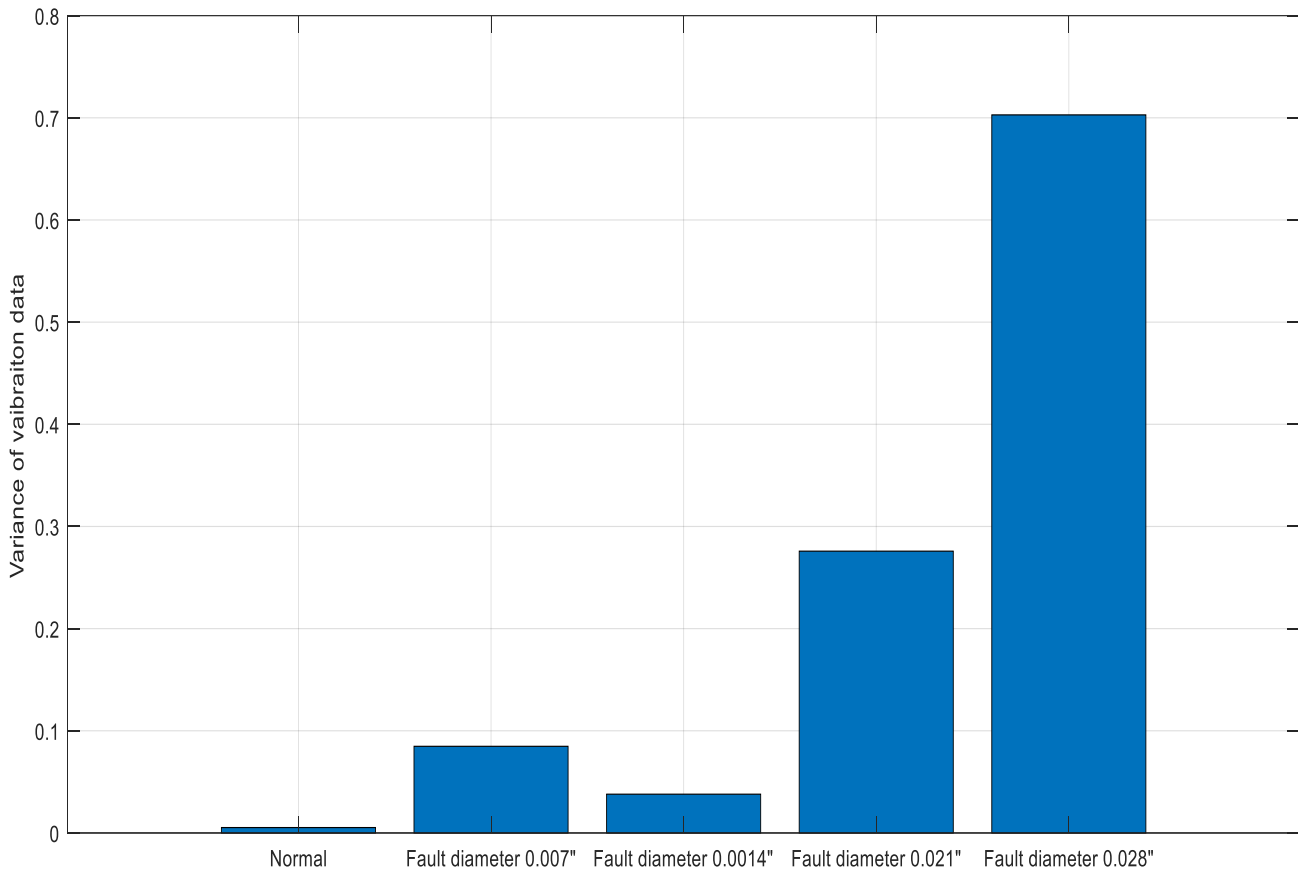
نلاحظ من خلال الشكل السابق زيادة مقدار التغير للإشارة بزيادة قطر الخطأ.

Histogram of DE vibration data of normal and faulty DE when Motor Load =0 [HP]



الشكل (19)

يوضح الشكل السابق (19) رسماً بيانياً HISTOGRAM بطريقة أخرى والغاية من تطبيقه هي ملاحظة تغير الانحراف المعياري أو التباين مع تزايد قطر الخطأ.



(20) الشكل

يوضح الشكل (20) نتيجة تطبيق التباين (Variance) على البيانات حيث يعطى بالعلاقة:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \dots (6)$$

التباين في مجال الإحصاء ونظرية الاحتمالات (لمتغير عشوائي أو توزيع احتمالي أو عينة ما) هو مقياس للتشتت الإحصائي للقيم الممكنة حول القيمة المتوقعة بحيث يصف التباين مدى انتشار القيم الممكنة لهذا التوزيع حول القيمة المتوقعة (المتوسط). الهدف من استخدام التباين في هذا البحث: هو مقارنة تغيره مع تغير قطر الخطأ، وذلك لأجل اكتشاف ما اذا هنالك علاقة خطية (طردية) بين قطر الخطأ والتباين.

```
% Copy right Basel Ibrahim 2020
% MATLAB 2018b
```

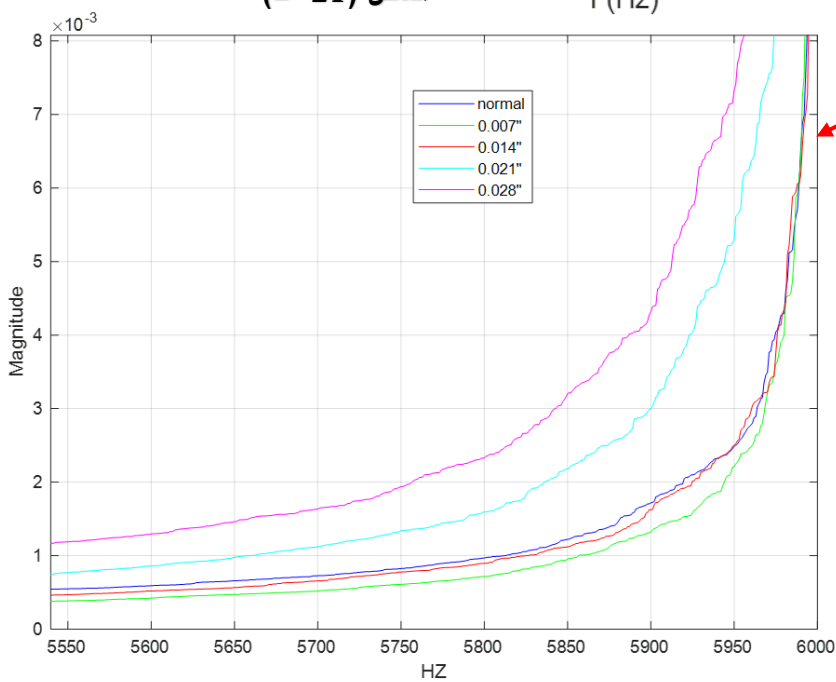
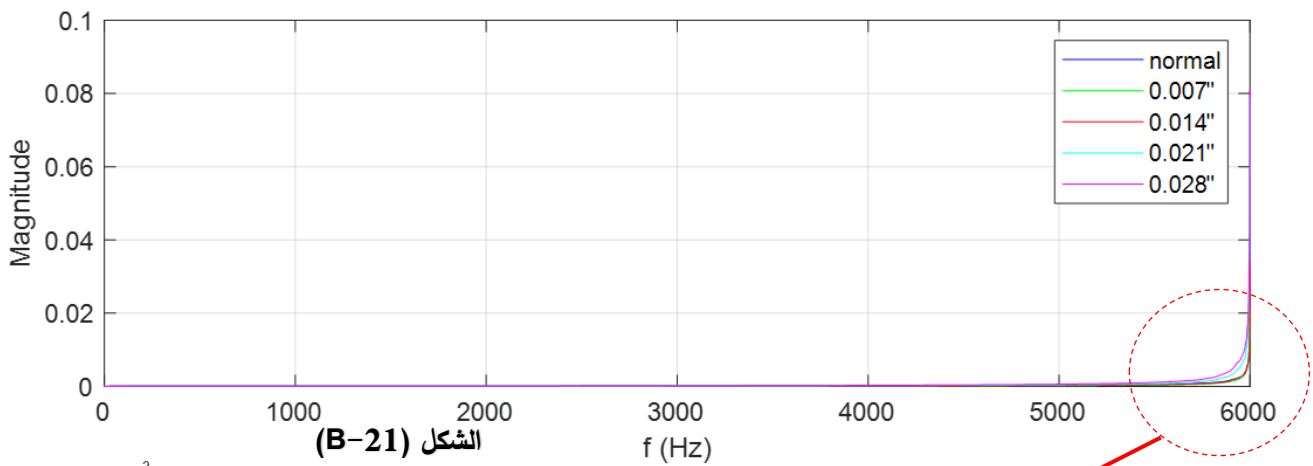
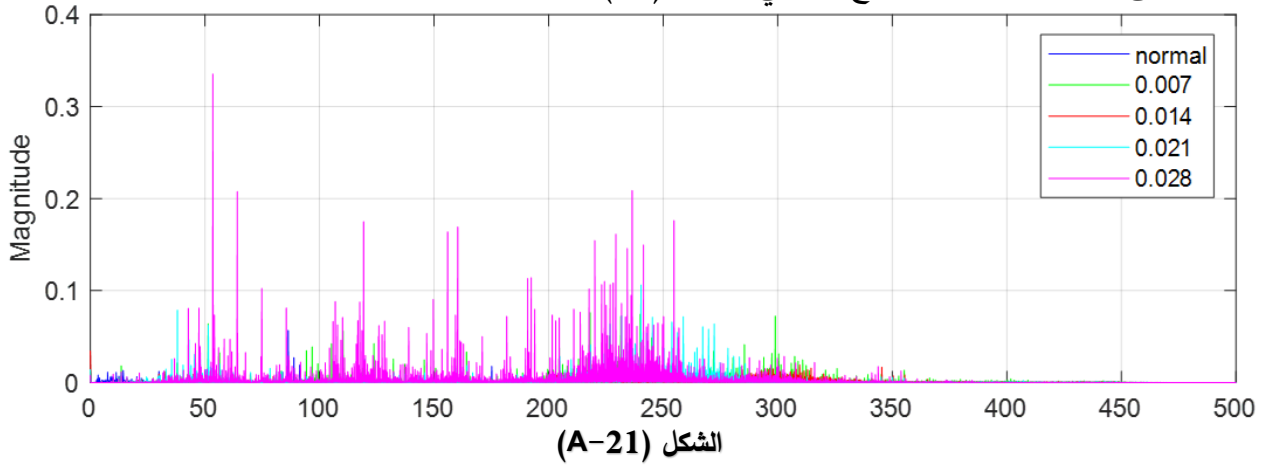
%This code for data loading and FFT frequency analysis with variance of the frequencies

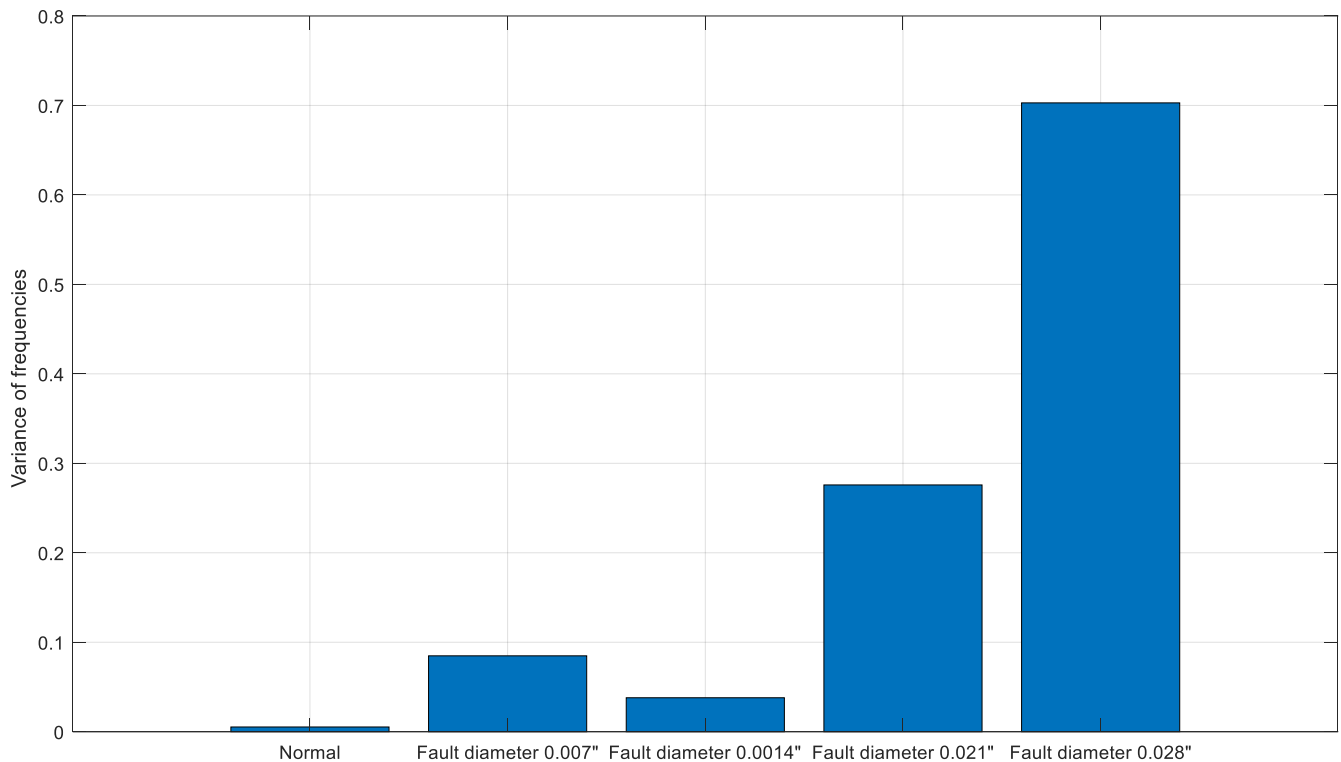
```
load 97 % Normal_0h Normal data with no fault
load 105 % IR007_0 Vibration data with fault diameter 0.007 inch
load 169 % IR014_0 Vibration data with fault diameter 0.014 inch
load 209 % IR021_0 Vibration data with fault diameter 0.021 inch
load 3001 % IR028_0 Vibration data with fault diameter 0.028 inch
% Using FFT to extract frequencies features from vibration signal
[f1,P1]=freq_analysis(X097_DE_time);% Normal_0
[f2,P2]=freq_analysis(X105_DE_time);% IR007_0
[f3,P3]=freq_analysis(X169_DE_time);% IR014_0
[f4,P4]=freq_analysis(X209_DE_time);% IR021_0
[f5,P5]=freq_analysis(X056_DE_time);% IR028_0
% Where
function [f,P1]=freq_analysis(X)
Fs = 1000; % Sampling frequency
L = length(X); % Length of signal
% FFT
Y = fft(X);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:(L/2)+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;

figure;
suptitle('Impact of fault diameter increase on FF dominant
frequencies Case 1) Drive End/Inner Race under motor load = 0
[HP]/1797 rpm')
subplot(211);
plot(f1,P1,'b') ;hold on;grid on
plot(f2,P2,'g');grid on
plot(f3,P3,'r');grid on
plot(f4,P4,'c');grid on
plot(f5,P5,'m');grid on
legend('normal','0.007','0.014','0.021','0.028')
ylabel('|P1(f)|');
subplot(212);
plot(sort(P1(1:6000)),'b') ;grid on;hold on; % Sorting data
plot(sort(P2(1:6000)),'g');grid on
plot(sort(P3(1:6000)),'r');grid on
plot(sort(P4(1:6000)),'c');grid on
plot(sort(P5(1:6000)),'m');grid on
legend('normal','0.007','0.014','0.021','0.028')
xlabel('f (Hz)');ylabel('|P1(f)|');
%
Variance_DE_FFT=[var(P1) var(P2) var(P3) var(P4) var(P5)]
labels= {'Normal' 'Fault diameter 0.007' 'Fault diameter 0.0014'
'Fault diameter 0.021' 'Fault diameter 0.028'};

figure;
bar(Variance_DE_0)
set(gca,'XTick',1:size(labels,2),'XTicklabel', labels);grid on
ylabel('Variance of frequencies ')
```

تنفيذ البرنامج السابق (CODE2) يتضمن تطبيق تحويل فورييه على البيانات الخاصة بشروط الحالة الأولى، وعرضا للنتائج عن طريق الرسم البياني الموضح في الشكل (21-A-B-C)، أيضا تطبيق التباين على البيانات وعرض النتائج كما في الشكل (22).





الشكل (22)

يوضح الشكل (A-21) الترددات الموجودة في الإشارات

في الشكل (B-21) تم إعادة ترتيب الترددات بشكل تصاعدي لتسهيل عملية المقارنة بينها.

في الشكل (C-21) تم تكبير الشكل (B-21).

نلاحظ في الشكل (C-21) يمكن التمييز بوضوح أكبر بين ترددات الأخطاء الأكبر قطرا أكثر من ترددات الأخطاء الأصغر قطرا، وهذا أيضا يمكن ملاحظته في الشكل (22).

```

% Copy right Basel Ibrahim 2020
% MATLAB 2018b
%This code for data loading and Wavelet Transform
%frequency analysis with variance of the
frequencies
load 97 % Normal_0h Normal data with no fault
load 105 % IR007_0 Vibration data with fault diameter 0.007 inch
load 169 % IR014_0 Vibration data with fault diameter 0.014 inch
load 209 % IR021_0 Vibration data with fault diameter 0.021 inch
load 3001% IR028_0 Vibration data with fault diameter 0.028 inch
% Using CWT to extract frequencies features from vibration signal
[varwv Per coef] =
cwt(X097_DE_time,'morse',1,'WaveletParameters',[3,60]);

scales_X097_DE_time=abs(varwv).*abs(varwv);scales_X097_DE_time=scales
_X097_DE_time';
%
[varwv Per coef] =
cwt(X105_DE_time,'morse',1,'WaveletParameters',[3,60]);

scales_X105_DE_time=abs(varwv).*abs(varwv);scales_X105_DE_time=scales
_X105_DE_time';
%
[varwv Per coef] =
cwt(X169_DE_time,'morse',1,'WaveletParameters',[3,60]);

scales_X169_DE_time=abs(varwv).*abs(varwv);scales_X169_DE_time=scales
_X169_DE_time';
%
[varwv Per coef] =
cwt(X209_DE_time,'morse',1,'WaveletParameters',[3,60]);

scales_X209_DE_time=abs(varwv).*abs(varwv);scales_X209_DE_time=scales
_X209_DE_time';
%
[varwv Per coef] =
cwt(X056_DE_time,'morse',1,'WaveletParameters',[3,60]);

scales_combined_signal=abs(varwv).*abs(varwv);scales_combined_signal=
scales_combined_signal';

figure;mesh(scales_X097_DE_time(:,1:5:end));title('X097 DE
time');xlabel('Scales');ylabel('Time');zlabel('Magnititude');zlim([0
8])
figure;mesh(scales_X105_DE_time(:,1:5:end));title('X105 DE
time');xlabel('Scales');ylabel('Time');zlabel('Magnititude');zlim([0
8])
figure;mesh(scales_X169_DE_time(:,1:5:end));title('X169 DE
time');xlabel('Scales');ylabel('Time');zlabel('Magnititude');zlim([0
8])
figure;mesh(scales_X209_DE_time(:,1:5:end));title('X209 DE
time');xlabel('Scales');ylabel('Time');zlabel('Magnititude');zlim([0
8])

```

```

figure;mesh(scales_combined_signal(:,1:5:end));title('X056 DE
time');xlabel('Scales');ylabel('Time');zlabel('Magnitude');zlim([0
8])

mean_var_Scales= [mean(var(scales_X097_DE_time))
mean(var(scales_X105_DE_time)) mean(var(scales_X169_DE_time))
mean(var(scales_X209_DE_time)) mean(var(scales_combined_signal)) ]
figure;
bar(mean_var_Scales)
set(gca,'XTick',1:size(labels,2),'XTicklabel', labels);
ylabel('Average variance of Scales')

[coeff_X097_DE_time, score_X097_DE_time, latent_X097_DE_time,
tsquared_X097_DE_time, explained_X097_DE_time]=
pca(scales_X097_DE_time);

[coeff_X105_DE_time, score_X105_DE_time, latent_X105_DE_time,
tsquared_X105_DE_time, explained_X105_DE_time]=
pca(scales_X105_DE_time);

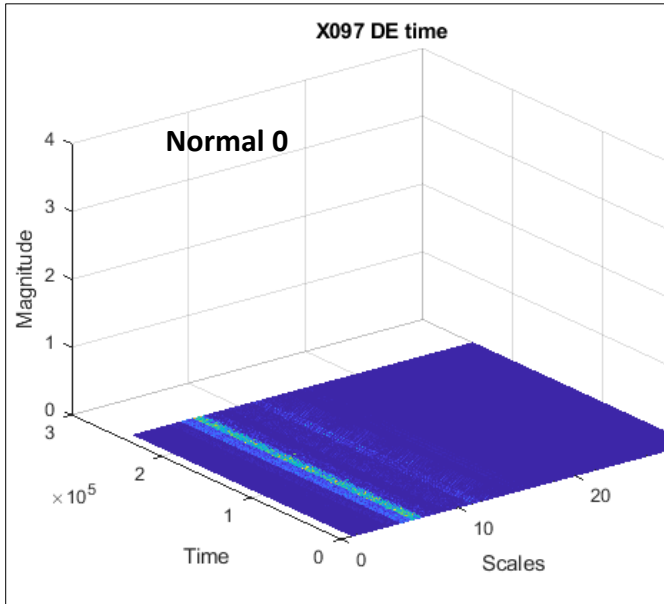
[coeff_X169_DE_time, score_X169_DE_time, latent_X169_DE_time,
tsquared_X169_DE_time, explained_X169_DE_time]=
pca(scales_X169_DE_time);

[coeff_X209_DE_time, score_X209_DE_time, latent_X209_DE_time,
tsquared_X209_DE_time, explained_X209_DE_time]=
pca(scales_X209_DE_time);

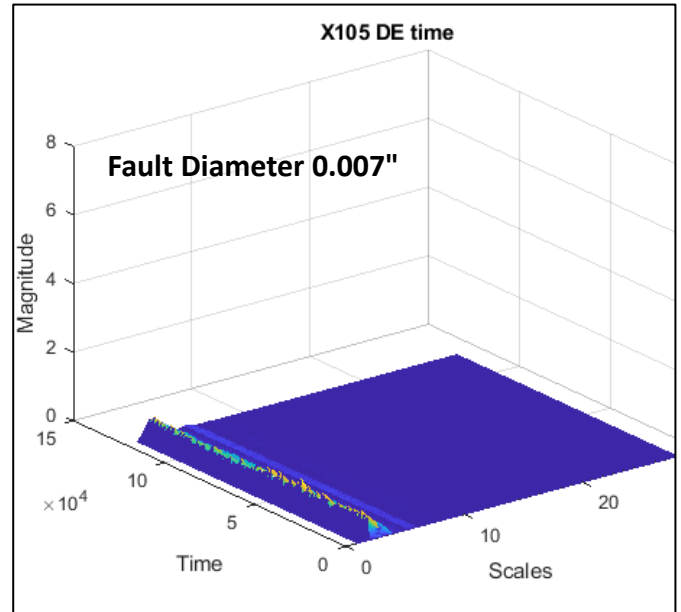
[coeff_X056_DE_time, score_X056_DE_time, latent_X056_DE_time,
tsquared_X056_DE_time, explained_X056_DE_time]=
pca(scales_combined_signal);

```

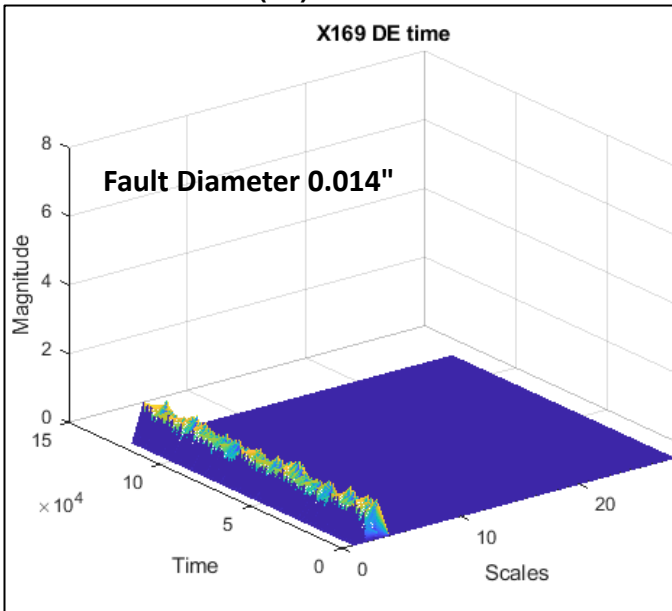
يقوم البرنامج السابق (CODE 3) بتطبيق تحويل ويفليت المستمر CWT على بيانات الحالة الأولى وعرضا للنتائج كما في الأشكال من (23) حتى (27)، أيضا سيتم تطبيق التباين كما في الشكل (28). أيضا يتضمن CODE3 تطبيق لـ PCA ، الذي سيتم شرحه تباعا، ذلك بهدف استخراج سمات مميزة. (Discriminative Features).



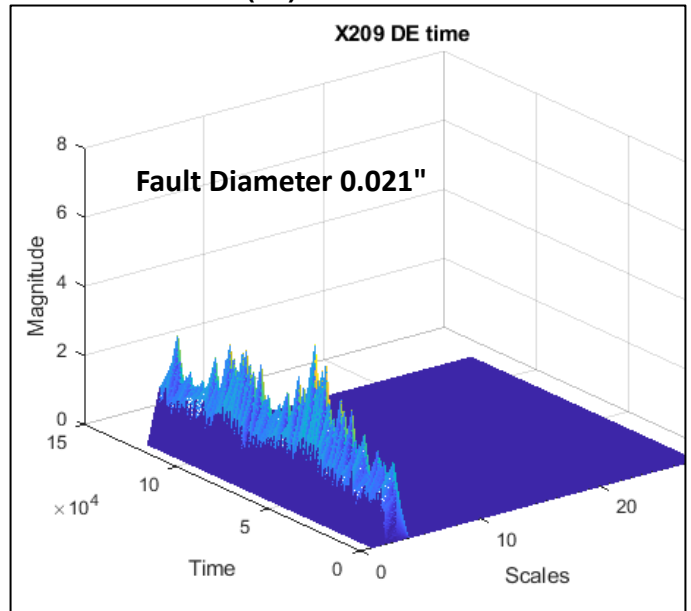
الشكل (23)



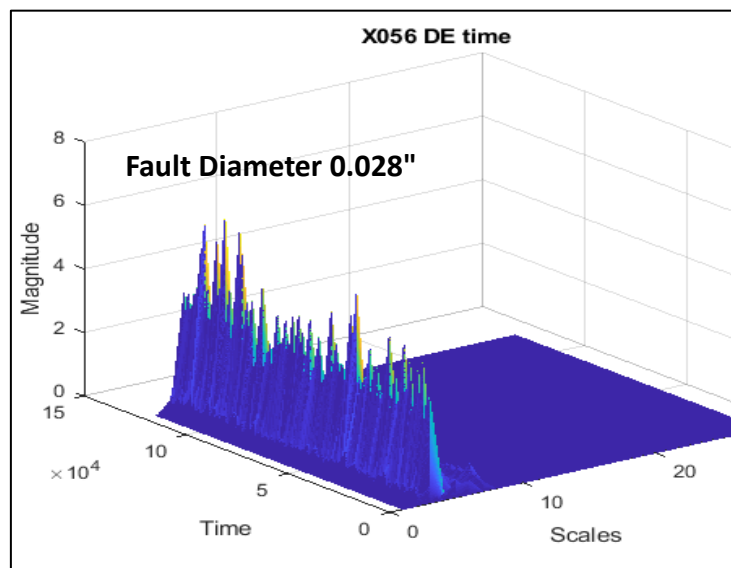
الشكل (24)



الشكل (25)

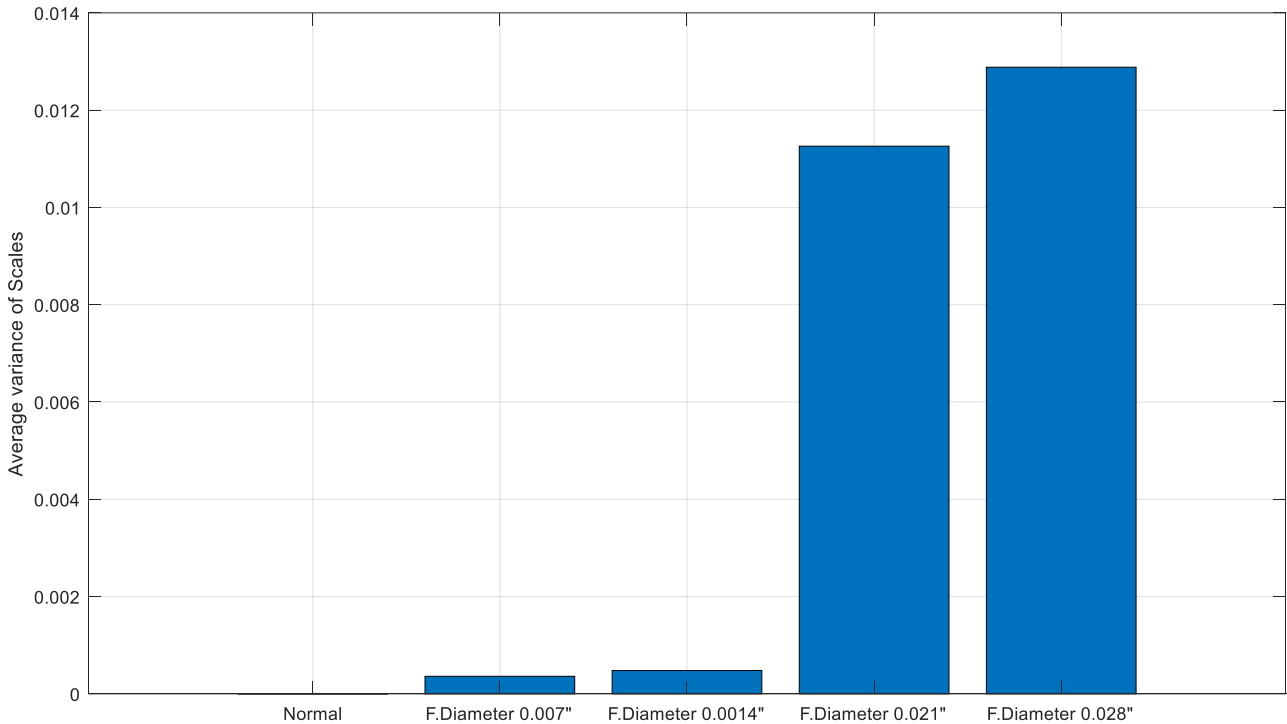


الشكل (26)



الشكل (27)

نلاحظ من خلال الأشكال السابقة (23 حتى 27) وجود علاقة طردية واضحة بين قطر الخطأ والترددات، وقدرة على التمييز خصوصا بالنسبة للأقطار الصغيرة للأخطاء كما في الشكل (24-25). وهذه واحدة من النقاط التي يتفوق بها تحويل wavelet مقارنة بتحويل FFT كما لاحظنا في الشكل (C-21)



الشكل (28)

يوضح الشكل (28) تأكيداً لوجود علاقة طردية متزايدة بين قطر الخطأ والترددات.

الخطوة التالية هي تطبيق الـ PCA:

(Principal Component Analysis) التحليل عبر المركبات (المكونات) الأساسية.

وهو عملية تحليل للبيانات باستخدام الجبر الخطي حيث يتم تحويل عدد كبير من المتغيرات المترابطة كثيرة العدد (كثيرة الأبعاد/High-dimensional) كمتحولات فيزيائية وهندسية (مثل درجة الحرارة، الضغط، التدفق، الخ...) إلى أقل عدد من المركبات غير المترابطة تسمى بالمركبات الرئيسية وهي قليلة العدد أي (منخفضة الأبعاد/Low-dimensional).

تتميز هذه المكونات الرئيسية خصوصاً أول مكونين رئيسيين أو ثلاثة PC1 و PC2 و PC3 بكونها تعبر عن أكبر عدد ممكن من التباينات بين المتغيرات التي تم تطبيق هذه الطريقة عليها ،

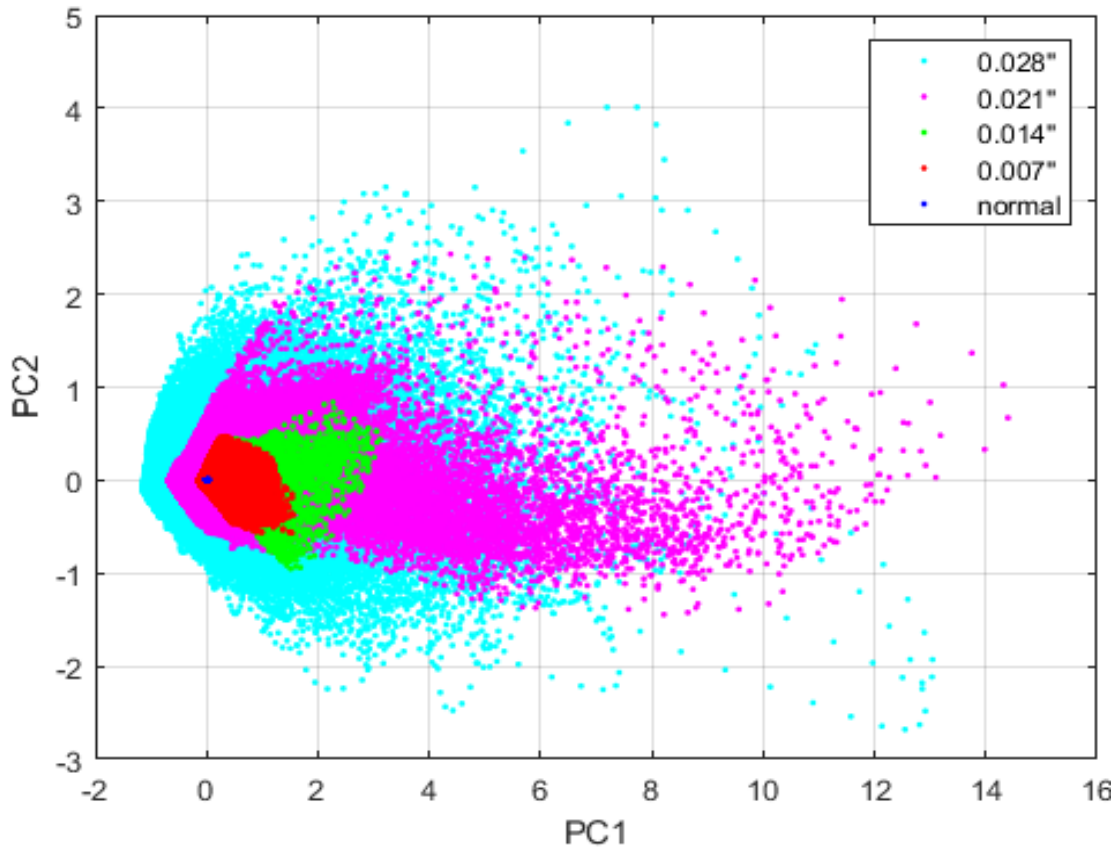
هذا يسمح باستخراج السلوك الأساسي المسيطر في مجموعة المتغيرات التي تم تطبيق هذه الطريقة عليها وإزالة المعطيات المتكررة وقليلة الأهمية.

لقد تم تطبيق هذه المنهج (PCA) في الدراسة المقدمة على خرج تحويل WAVELET (الترددات المتغيرة مع الزمن/Scales) حيث تعتبر هذه الترددات مترابطة وكثيرة الأبعاد.

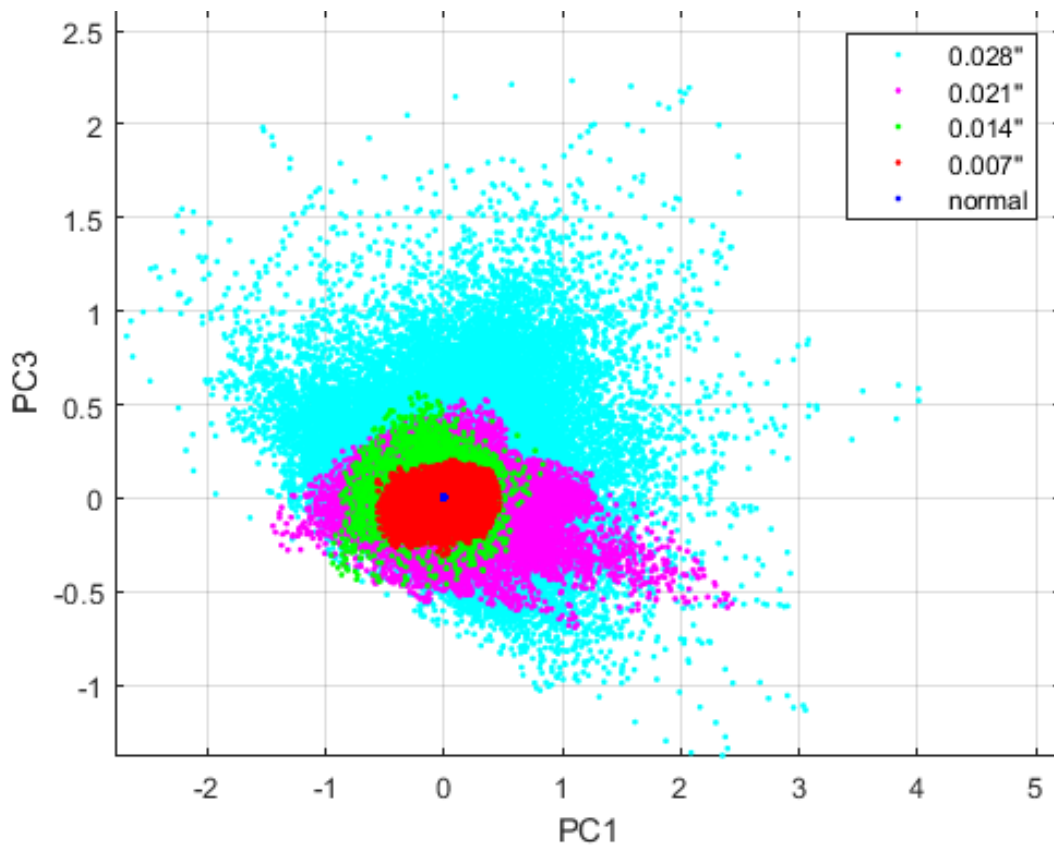
النتائج أظهرت قدرة الـ PCA على اظهار التباين (الاختلاف) في بيانات (WAVELET Scales) بشكل واضح ومختصر من قطر خطأ الى اخر. أي يستعمل مركبين اثنين او ثلاثة فقط مقارنة مع العدد الكبير لخرج الـ WAVELET الذي هو بالمئات (High-dimensional).

سنوضح من خلال الاشكال التالية (نتائج تطبيق الـ PCA)، قدرة المركبات الأساسية للـ PCs على التمييز بين الأخطاء بالمقارنة مع التباين (Variance).

ولهذا يمكن استخدامها كسمات مميزة (discriminative features) للتمييز بين الأخطاء.



الشكل (29)



الشكل (30)

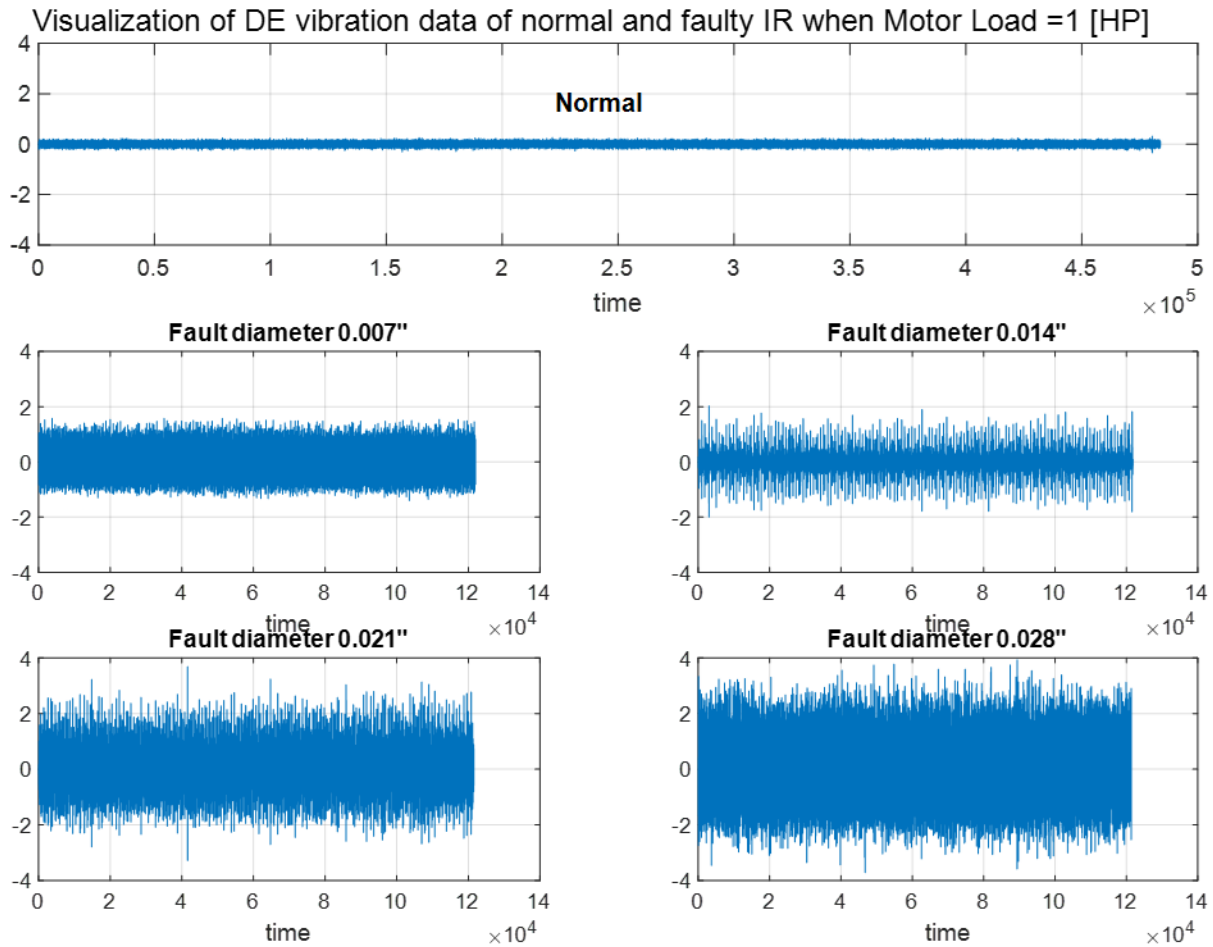
نلاحظ من خلال الشكلين السابقين قدرة الـ PCA على التمييز خصوصا بين الأخطاء الصغيرة (0.007 باللون الأحمر و 0.0014 باللون الأخضر) مقارنة بالشكل (C-21).

سننتقل الآن الى دراسة:

الحالة الثانية

موضع المحمل DE (الموضح في الشكل 6) / حمولة المحرك: [HP]1 / موقع الخطأ: Inner race
سرعة دوران [rpm] 1772.

نقوم بتطبيق CODE1 المذكور سابقا مع الاخذ بعين الاعتبار المتغيرات الجديدة لشروط الحالة الثانية (تغيير حمولة المحرك الى [HP]1).



الشكل (31)

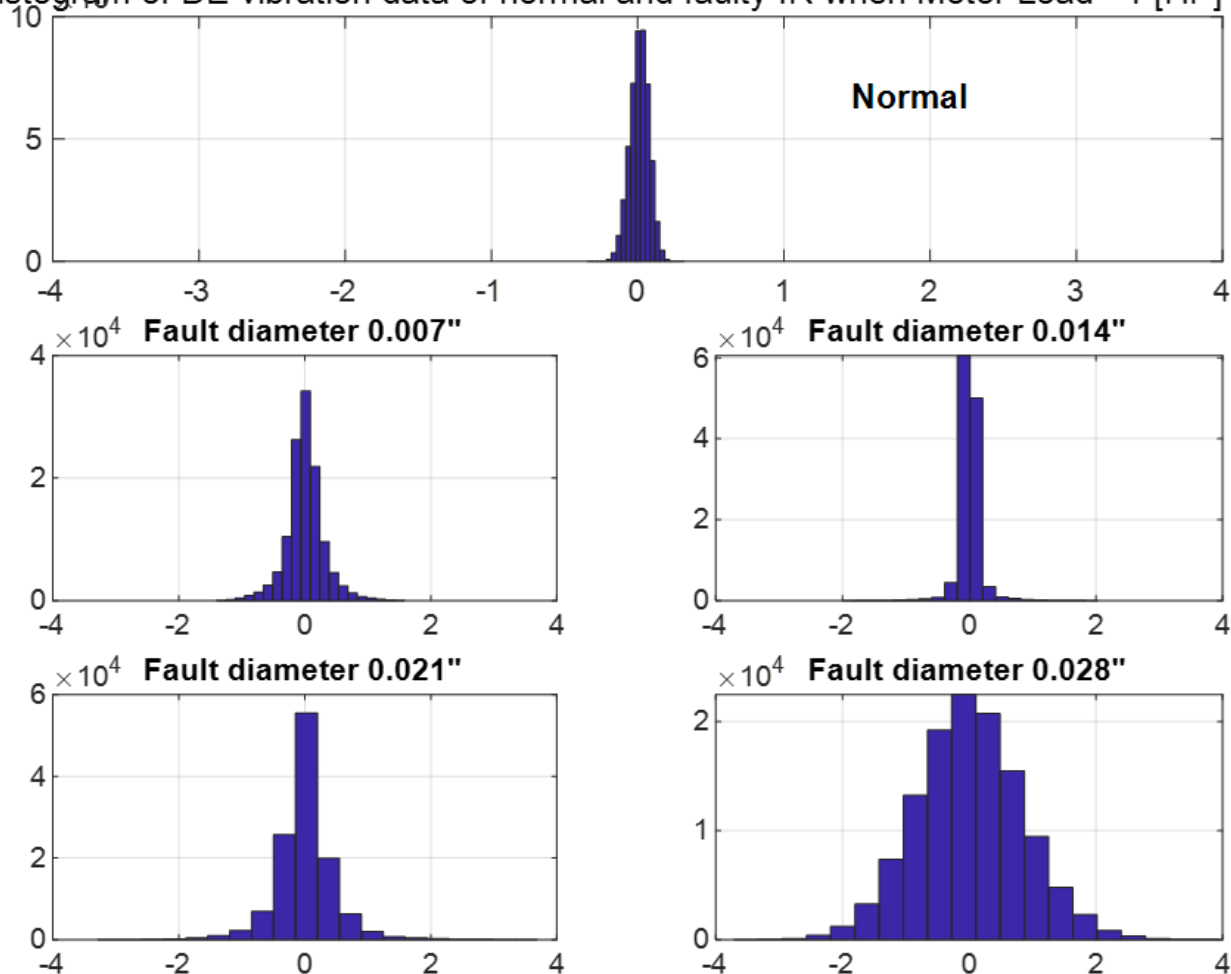
الشكل (31) يوضح رسماً بيانياً للبيانات الخاصة بالحالة الثانية، يمكننا من خلال هذا الشكل ملاحظة التغيرات الطارئة على الإشارة مع تغير الخطأ بحالة وجود حمولة 1[HP].

الشكل (32) رسماً بيانياً HISTOGRAM مرافق.

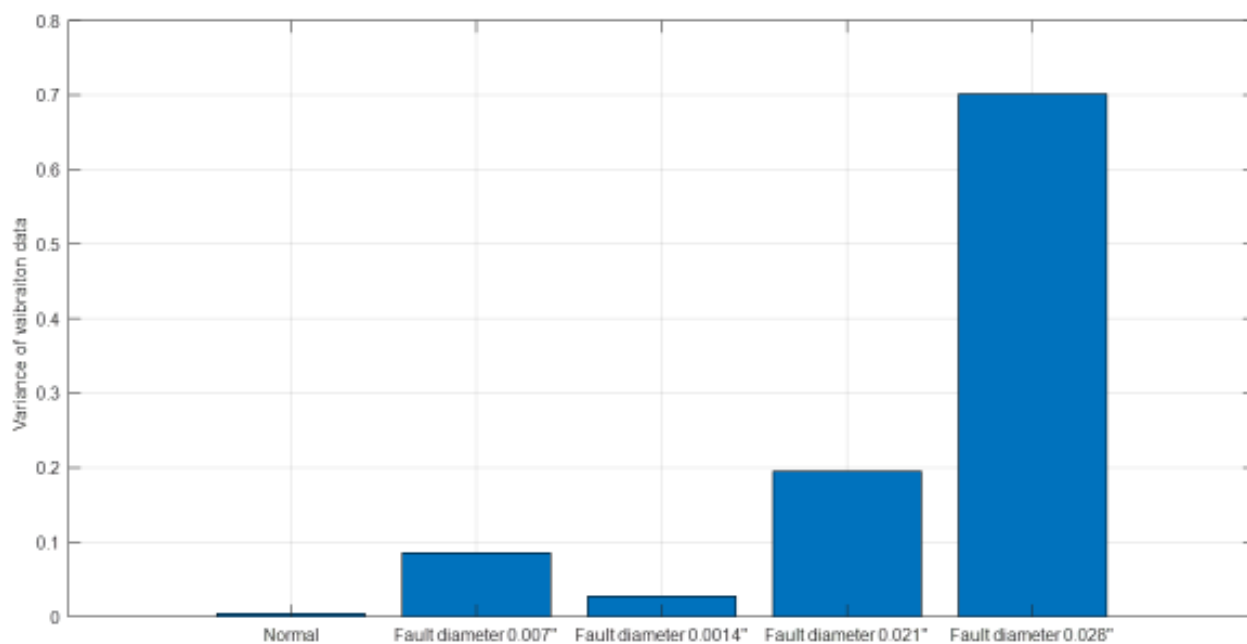
الشكل (33) تطبيق التباين على النتائج.

الغرض من الخطوات السابقة هو التأكد من وجود نسق (نظام) واحد للبيانات الأمر الذي يعطي إمكانية تطبيق الأدوات التحليلية المختلفة FT, WAVELET, PCA عليها.

Histogram of DE vibration data of normal and faulty IR when Motor Load =1 [HP]



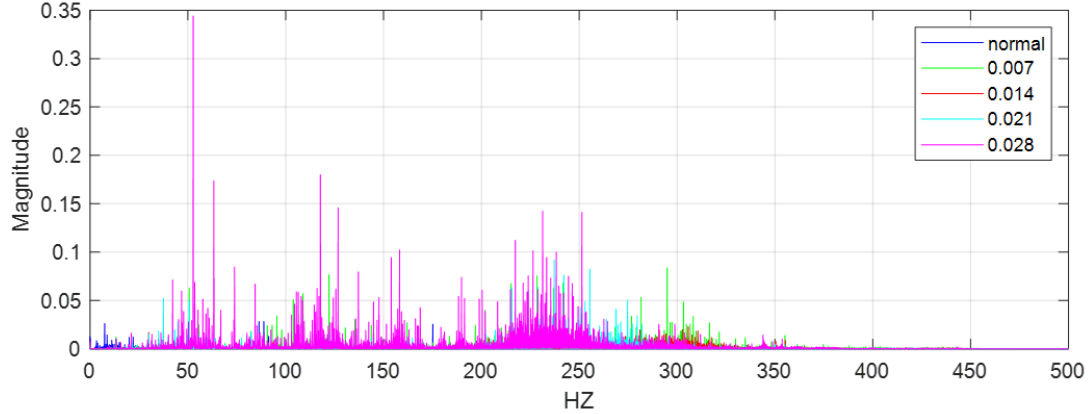
الشكل (32)



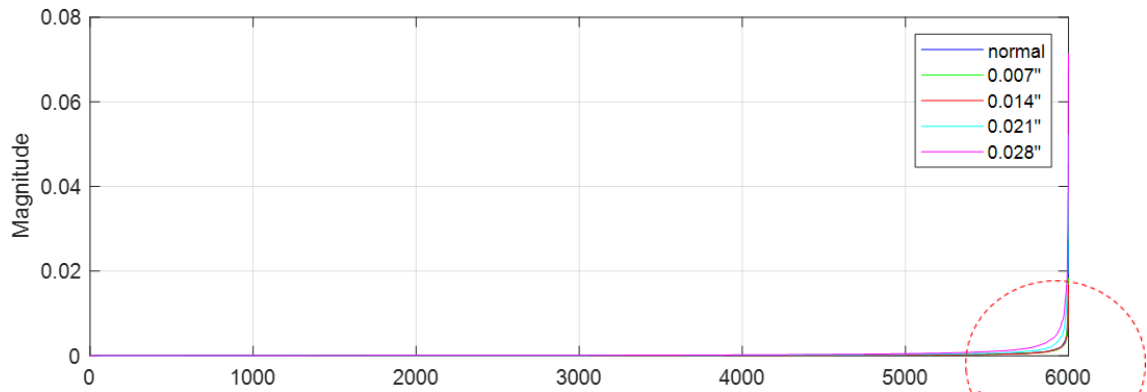
الشكل (33)

سنقوم الان بتطبيق CODE2 الخاص بتحويل فورييه على بيانات الحالة الثانية

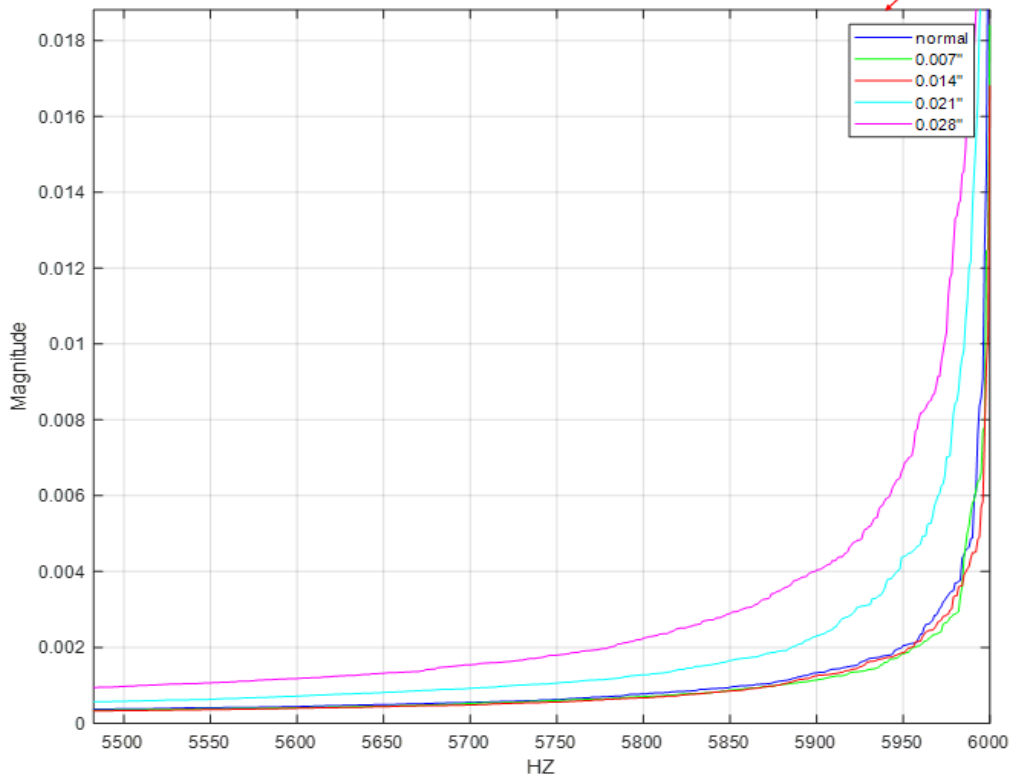
Impact of fault diameter increase on FF dominant frequencies Case 2) Drive End/Inner Race under motor load = 1 [HP]/1772 rpm



الشكل (A-34)



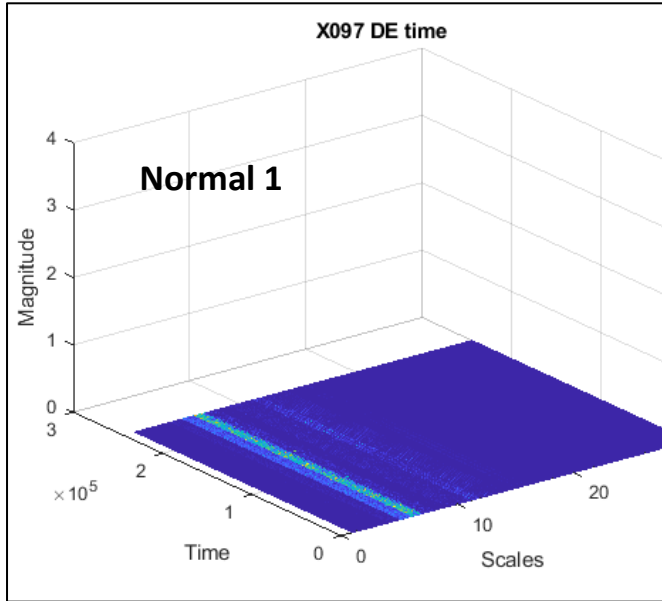
الشكل (B-34)



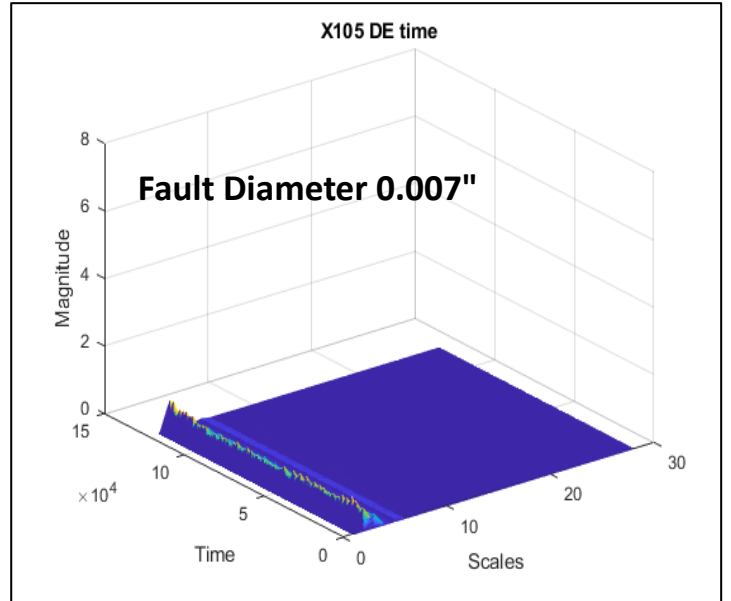
الشكل (C-34)

نلاحظ من خلال الأشكال السابقة (A-B-C-34) تشابه في السلوك مع الحالة الأولى (حمولة محرك 0) حيث انه لا يمكن التمييز بين سمات الأخطاء الصغيرة.

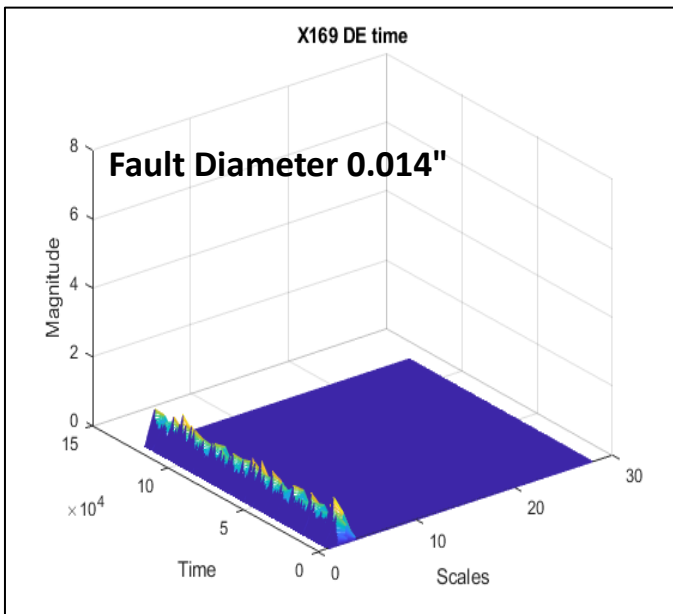
سنقوم الان بتطبيق CODE3 الخاص ب تحويل WAVELET والمتضمن تطبيق ال PCA على البيانات. وسنقوم بعرض النتائج بشكل مباشر.



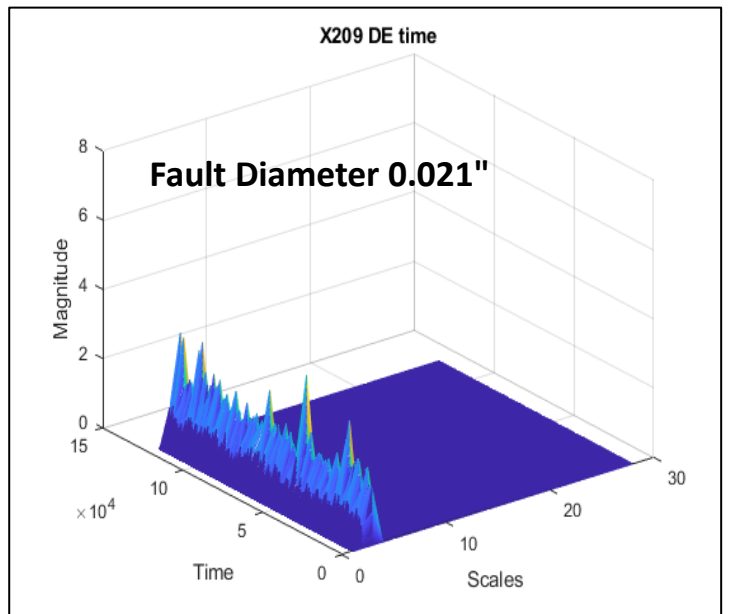
الشكل (36)



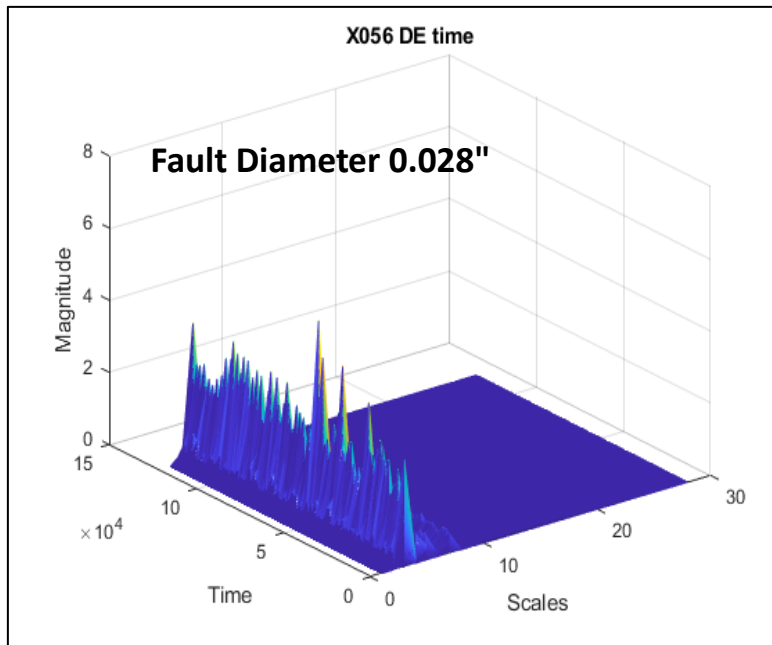
الشكل (35)



الشكل (38)

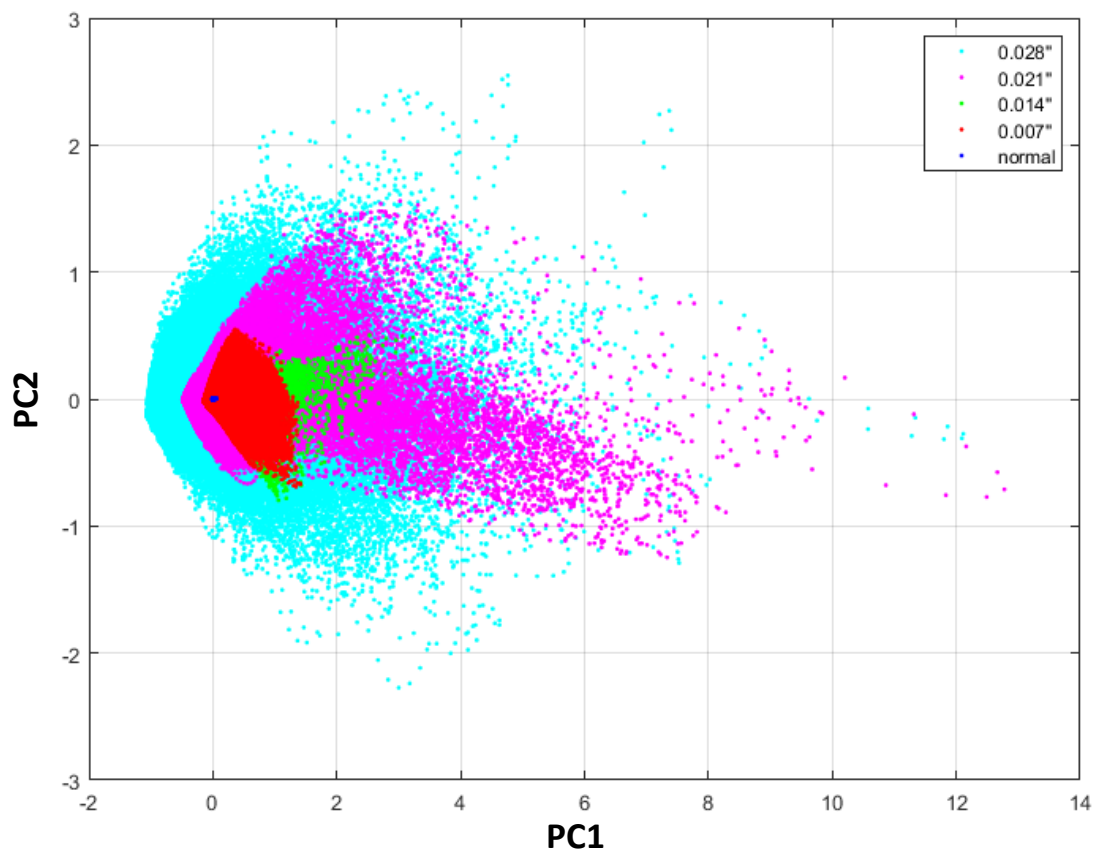


الشكل (37)

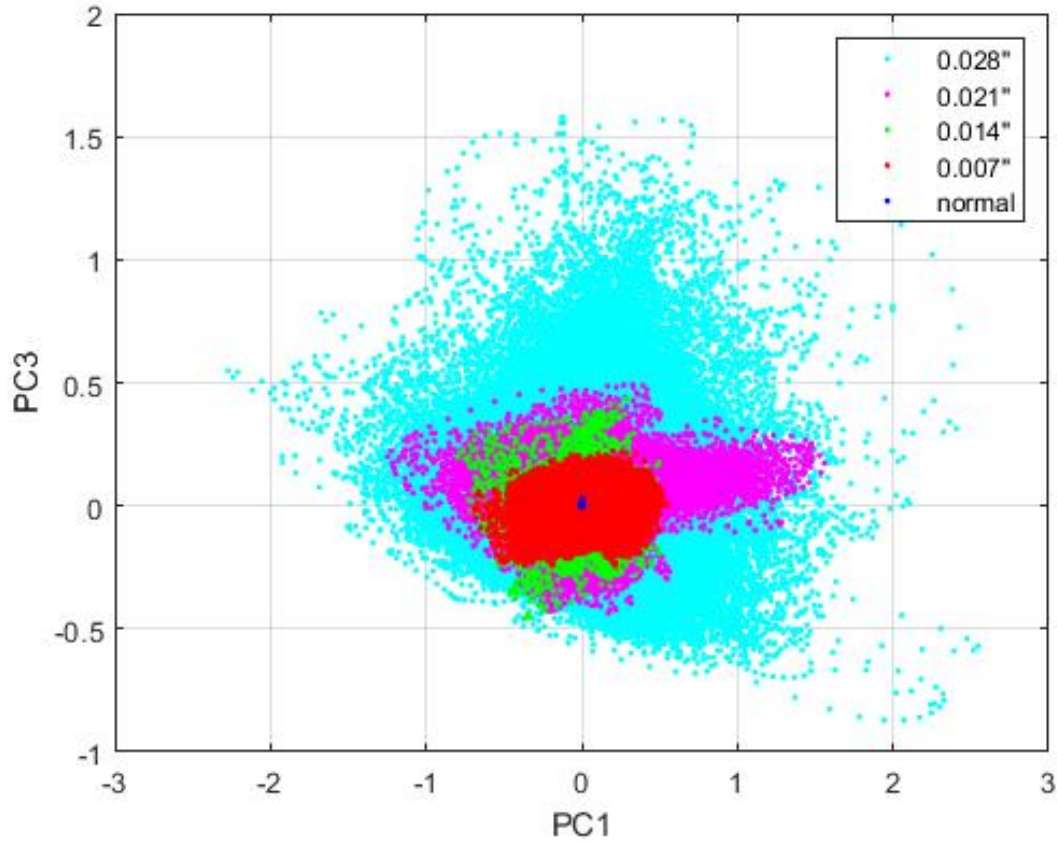


الشكل (39)

سنقوم الآن بعرض نتائج ال PCA :



الشكل (40)



الشكل (41)

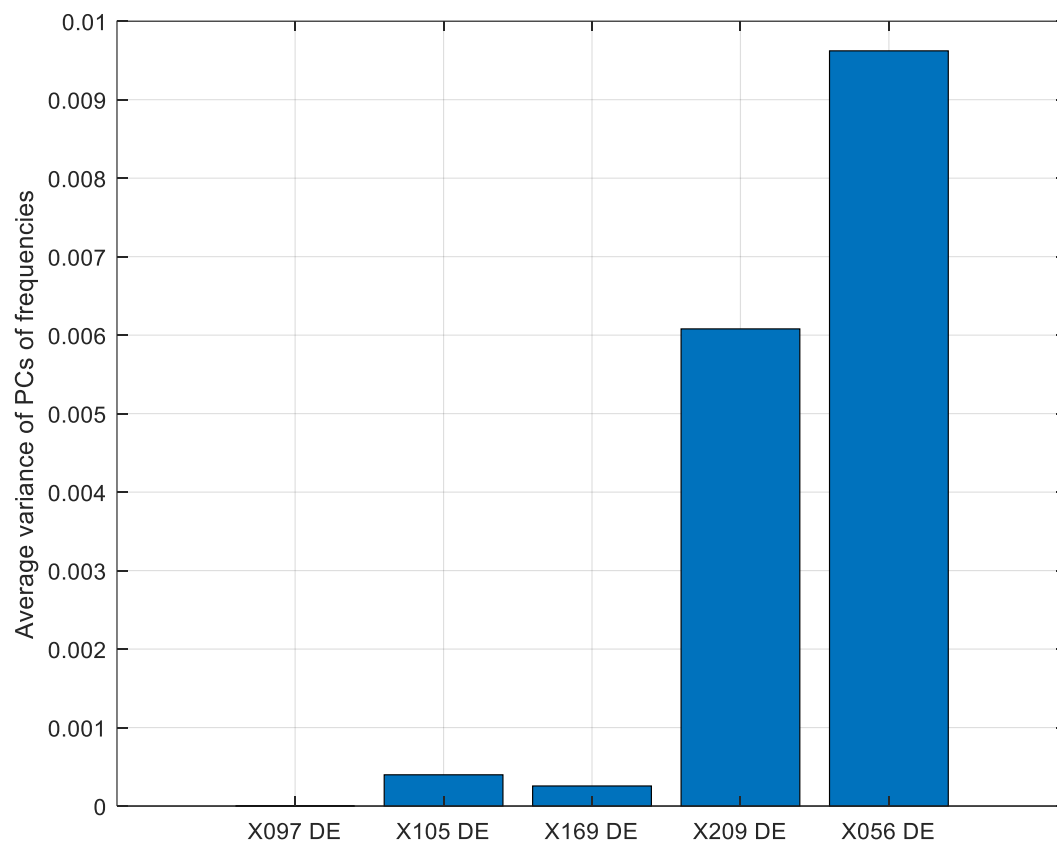
تؤكد النتائج التي عرضتها الاشكال السابقة من الشكل (36) حتى الشكل (41) على قدرة الطريقة المقترحة (بتطبيق الـ PCA على تحويل WAVELET) بالحصول على سمات مميزة لفرز الأخطاء والتمييز بينها حتى القيم الصغيرة لأقطار الأخطاء.

بمقارنة الحالتين الأولى والثانية نلاحظ مايلي:

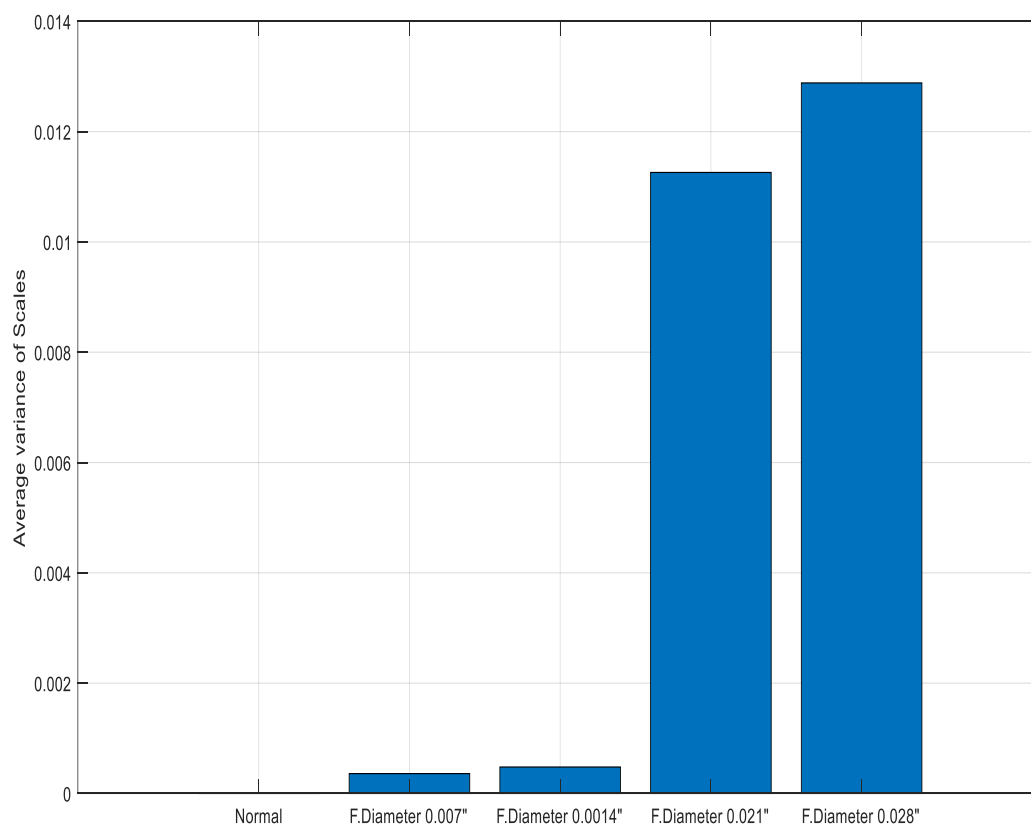
لقد استطعنا من خلال تقييم نتائج مخطط التباين في الشكل (42) ملاحظة وجود علاقة طردية متزايدة بين زيادة قطر الخطأ وزيادة تباين الترددات حتى عند القيم الصغيرة لأقطار الأخطاء وذلك عند حمولة 0 [HP] للمحرك.

وبتقييم نتائج مخطط التباين الموضح ادناه في الشكل (43) للحالة الثانية عند وجود حمولة للمحرك بمقدار 1 [HP] لاحظنا عدم وجود هذه العلاقة وخصوصا عند القيم الصغيرة لأقطار الأخطاء.

كما أن زيادة الحمولة أدت الى زيادة التباين كما نلاحظ من خلال الشكلين (42) و (43) أدناه.



الشكل (43)



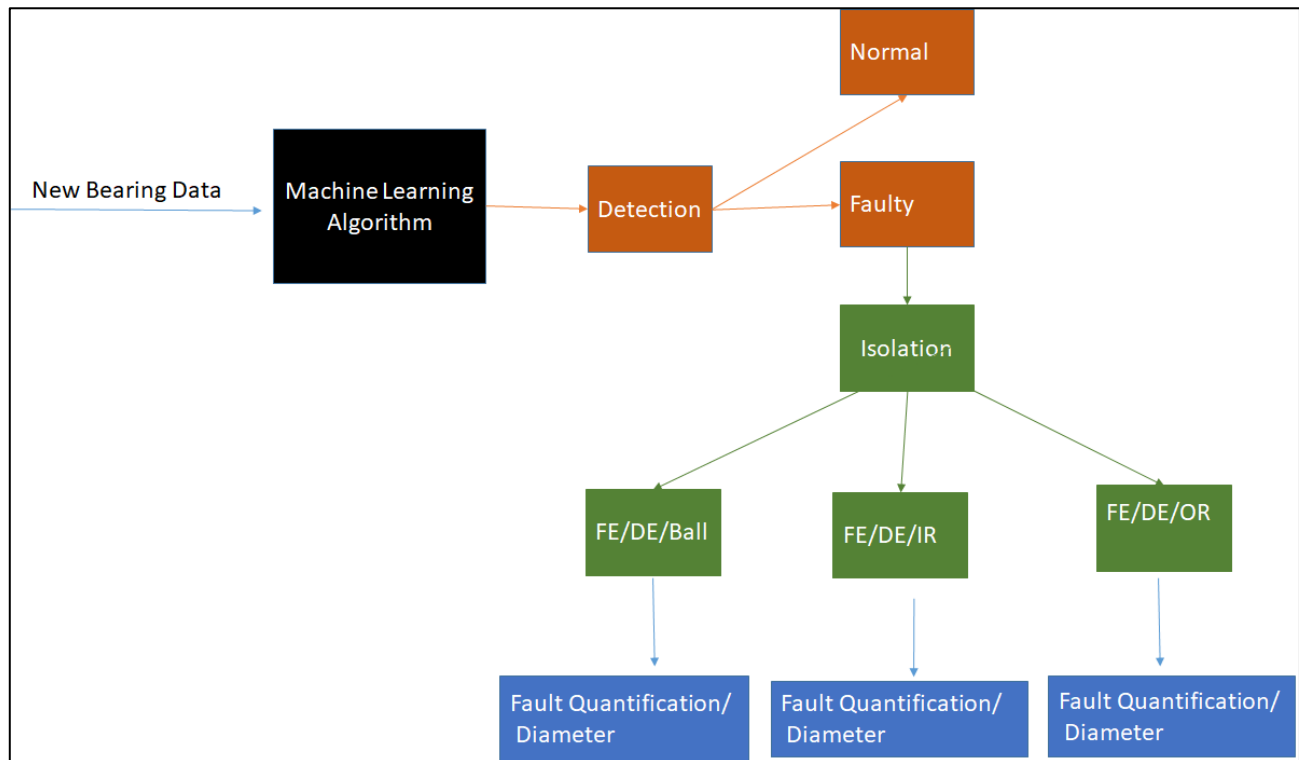
الشكل (42)

نتائج وتوصيات:

من خلال ما تم مناقشته في البحث السابق نلاحظ مجموعة النقاط التالية:

- نلاحظ تفوق الطرق متعددة الدقة (MRA) مثل الـ WAVELET في استخلاص السمات المميزة (DISCRIMINATIVE FEATURES) والتي تعتمد على التردد والزمن في وقت واحد (SCALES) على مقابقتها من الطرق التي تعتمد على التردد فقط مثل الـ FFT أو الزمن مثل الأدوات الإحصائية كالتباين (VARIANCE).
- نلاحظ أهمية استعمال المركبات الأساسية (PCA) كسمات مميزة مختصرة أو منخفضة الأبعاد (LOW-DIMINTIONAL) في دقة التمييز بين الأخطاء.
- بشكل عام أثبتت طرق تحليل المجال الترددي فعاليتها في مجال تحليل بيانات الاهتزازات للمحامل الكروية.
- اثبتت هذه الدراسة أهمية الالمام بمهارات استخدام الأدوات التحليلية في مجال تحليل البيانات ومعالجتها، اذ ان اكتساب الخبرة والمهارة في هذا النطاق سيتيح إمكانات أكبر أمام كل شخص يعمل في مجال التشخيص الفني لمختلف المجالات الهندسية والميكانيكية خاصة في مواضيع الصيانة التنبؤية والكشف المبكر عن الأخطاء والاعطال.
- يعد هذا البحث تجربة بسيطة لتوضيح المراحل الرئيسية التي ستمر بها عملية التشخيص بالاعتماد على اهتزازات الآلات وبالتالي الانطلاق منها للمراحل المتقدمة للوصول الى ابتكارات تقنية جديدة بالاعتماد على المفاهيم الرائدة حالياً عالمياً مثل الذكاء الاصطناعي وتعليم الآلة.
- في النهاية سنقوم بتمثيل صغير ومبسط ل خوارزمية (ALGORITHM) متعدين على مراحل العمل المذكورة في هذا البحث، الهدف من هذه الخوارزمية هو انشاء تقنية معينة ل كشف وتحديد وقياس الأخطاء في المحامل الكروية (كشف وجود التشقق او التآكل وتحديد موقع الخطأ في بنية المحمل وقياس قطر الخطأ وابعاده).

يتطلب تحقيق هذه الخوارزمية اجراء تجارب شبيهة بالتجارب المذكورة في البحث ولكن على نطاق أعم وأكثر شمولية ليتم تغطية كافة أصناف وأنواع واحتمالات الأخطاء وذلك بتحليل البيانات الخاصة بهذه المحامل على أكثر من مستوى والبحث في إمكانية ادخال ابعاد للاخطاء اكثر تنوع ودقة وذلك بهدف جعل الخوارزمية اكثر كفاءة و حساسية لأقل المتغيرات وبالتالي تشخيصا أدق و وثوقيه استثمارية وفنية لهذه المحامل.



- [1] CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY Bearing Data Center Website.
- [2] COMPARISON OF SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR FAULT DETECTION IN ROLLING ELEMENT BEARINGS (S. Al-Sulti, B. Samanta*, K. R. Al-Balushi and S. A. Al-Araimi).
- [3] Elementary Theory of WAVELET and Filter Bank (pinal choski)
- [4] MATLAB help
- [5] How Ball Bearings Work (Engineering)
[<https://www.youtube.com/watch?v=IIEHscqWJAK&t=140s>]
- [6] Measuring Vibration with Accelerometers
[<https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>]
- [7] Wikipedia . Google.
-

