الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
الجامعة الافتراضية السورية
ماجستير إدارة تقانة

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education
Syrian Virtual University
PMTM

تقنيات الصيانة التنبؤية وتطبيقاتها باستخدام أنظمة التحكم الآلي المبرمج وإنترنيت الأشياء (دراسة حالة مطحنة جبلة)

Predictive Maintenance : Techniques and Applications In PLC & IoT (Case Study In Jableh's Mill)

بحث مقدم لنيل درجة الماجستير في إدارة التقانة
PMTM

الفصل F21

إعداد الطالب

حسان خوري الياس

إشراف
الدكتور عماد شلفون

كلمة شكر

أود أن أقدم أسمى عبارات الشكر والتقدير لجميع أفراد الكادر التدريسي والإداري لبرنامج ماجستير التأهيل والتخصص في إدارة التقانة في الجامعة الافتراضية السورية على جهودهم العظيمة في فتح آفاق ومجالات جديدة وقدرتهم الرائعة والمميزة في إعطاء المحاضرات والتي منحتني الشرف في أن أكون واحدا من تلاميذها .

أخص بالشكر الدكتور عماد شلفون الذي لم يبخل يوما في تقديم يد المساعدة والعون وكان لخبرته اليد الفضلى في إنجاز هذا البحث عبر متابعته المستمرة والدائمة لمراحله.

كما أرغب في تقديم الشكر لجميع أفراد الطاقم الإداري والفني في المؤسسة العامة للحبوب في اللاذقية بالإضافة إلى المدراء والفنيين والمهندسين القائمين على مطحنة الشهيد أيمن بنيات في جبلة لما قدموه من مساعدة في الحصول على مختلف المعلومات التي استطاعت إغناء البحث .

وأخيرا أتوجه بالشكر لزوجتي الغالية و لأفراد عائلتي الصغيرة الذين لم أجد منهم سوى كل المحبة والدعم و كانوا السند الأول لي في الوصول إلى ما وصلت إليه .

وفقنا الله لما فيه خير لسوريا الحبيبة ولرقيها بين الأمم ولما فيه خير لأبناء هذا الوطن العزيز الصابرين على الشدائد .

فهرس المحتويات

قائمة الأشكال IV

قائمة المختصرات والمصطلحات VI

ملخص X

Abstract XI

الفصل الأول : الإطار العام للمشروع

1-1 مقدمة 1

2-1 مشكلة البحث 3

3-1 هدف البحث 4

4-1 أهمية البحث 4

5-1 الدراسات السابقة 5

6-1 أوجه الاستفادة من الدراسات السابقة 13

7-1 حدود البحث 14

8-1 خطة البحث 14

الفصل الثاني : الإطار النظري

1-2 مفهوم الصيانة 16

2-1-2 تعريف الصيانة 18

2-1-2 أهمية الصيانة 19

3-1-2 أنواع الصيانة 21

2-2 الصيانة التنبؤية 30

1-2-2 تعريف الصيانة التنبؤية 30

2-2-2 فوائد الصيانة التنبؤية 32

3-2-2 الصيانة التنبؤية والثورة الصناعية الرابعة 35

3-2 تقنيات الصيانة التنبؤية 39

2-3-1 حساسات الاهتزاز 39
2-3-2 التصوير الحراري 41
2-3-3 تحليل الاحتكاك 43
2-3-4 تحليل الأمواج الفوق صوتية 46
2-4 نموذج استخدام الصيانة التنبؤية بالاعتماد على حساسات الاهتزاز 48

الفصل الثالث : الإطار العملي

3-1 دراسة حالة الصيانة في مطحنة حبوب جبلة 54
3-1-1 البنية الهيكلية لأقسام المطحنة 54
3-1-2 أنواع المحركات في المطحنة 55
3-1-3 أساليب الصيانة في المطحنة 56
3-1-4 عيوب أساليب الصيانة الحالية 57
3-2 تصميم الحلول المناسبة باستخدام تقنيات الصيانة التنبؤية 57
3-2-1 باستخدام أنظمة التحكم المبرمج PLC 59
3-2-2 باستخدام أنظمة الـ SCADA 67
3-2-3 باستخدام تقنية إنترنيت الأشياء IoT 71
3-2-4 معوقات تطبيق الحلول المقترحة 74

الفصل الرابع : الاستنتاجات والمقترحات

المراجع 75

77

قائمة الأشكال List of Figures

الشكل	العنوان	الصفحة
1-1	خطة البحث	15
1-2	منحني حوض الاستحمام Bathtub Curve	16
2-2	مخطط أنواع الصيانة	26
3-2	نموذج تحليل الأهمية	28
4-2	مصفوفة استراتيجية الصيانة	29
5-2	الاختلاف بين استراتيجيات الصيانة RM,PM,PdM	31
6-2	مقارنة بين أنواع الصيانة RM,PM,PdM من حيث التكلفة	33
7-2	الثورات الصناعية	35
8-2	مستوى النضج في استخدام الصيانة التنبؤية	37
9-2	البنية الهيكلية لـ PdM4.0	37
10-2	حساسات الاهتزاز Vibration Sensors	40
11-2	تقنية التصوير الحراري Thermography	42
12-2	مخطط Trivector	45
13-2	جهاز MiniLab	45
14-2	جهاز كاشف الأمواج الفوق صوتية	46
15-2	جهاز قياس الاهتزازات الصوتية	47
16-2	مسدس التشحيم	47
17-2	موجة الاهتزاز	49
18-2	اختيار بارامتر الاهتزاز المناسب	51
19-2	جدول المواصفة ISO 10816	52
20-2	منهجية تطبيق الصيانة التنبؤية بالاعتماد على حساسات الاهتزاز	53
1-3	مخطط عمل المطحنة	55
2-3	مراوح الضغط العالي	56
3-3	تحديد نقاط التثبيت لحساسات الاهتزاز	58
4-3	جهاز مرسل الاهتزاز Vibration Transmitter	59
5-3	مكونات نظام الـ PLC	60
6-3	جهازSIEMENS CPU211C	62
7-3	بنية منظومة الـ PLC المقترحة	63
8-3	خوارزمية البرنامج	64
9-3	تعليمات المعايرة	65

10-3	تعليمات المقارنة	65
11-3	تعليمة TMAIL_C لإرسال الإيميل	66
12-3	عناصر الـ SCADA	67
13-3	الشاشة اللمسية ومنافذ الاتصال	69
14-3	الأدوات Gauge , I/O	70
15-3	نتائج تطبيق نظام الـ SCADA	70
16-3	البنية الهيكلية لـ Mindsphere	71
17-3	آلية توصيل Mindsphere	72
18-3	استخدام تطبيق Fleet Manager في محطات الضخ	73

List of Abbreviations and Terms قائمة المختصرات والمصطلحات

A	
Age Based Maintenance (AGM)	الصيانة المعتمدة على العمر
Amazon Web Service (AWS)	موقع خدمات أمازون عبر الويب
Analog Input (AI)	مداخل تشابهية
Analog Signal	إشارة تشابهية
Association	الاقتران
Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)	الخط المشترك الرقمي غير المتناظر
B	
Bathtub Curve	منحني حوض الاستحمام
British Standards Institute (BSI)	المعهد البريطاني للمقاييس
C	
Central Processing Unit (CPU)	وحدة المعالجة الرئيسية
Classification	التصنيف
Cloud Based	المعتمد على السحابة
Cloud Computing	الحوسبة السحابية
Cloud Platform	منصة سحابية
Clustering	العنقدة
Condition Based Maintenance (CBM)	الصيانة المعتمدة على الحالة
Comma –Separated Values (CSV)	ملف القيم المفصولة بفواصل
Communication Port (CP)	منفذ الاتصال
Computerized Maintenance Management System (CMMS)	نظام إدارة الصيانة المحوسبة
Corrective Maintenance (CM)	الصيانة التصحيحية
Cyber Physical Systems (CPS)	النظم السيبرانية الفيزيائية
D	
Dashboard	لوحة التحكم
Data Mining (DM)	التنقيب في البيانات
Deferred Corrective Maintenance (DCM)	الصيانة التصحيحية المؤجلة
Digital Input (DI)	مدخل رقمي

Digital Output (DQ)	مخرج رقمي
Direct Current (DC)	التيار المستمر
E	
Equipment Ware Out	هلاك المعدات
F	
Friction	الاحتكاك
G	
Gauge	مقياس
H	
Human Machine Interface (HMI)	واجهة استخدام الآلة
I	
Immediate Corrective Maintenance (ICM)	الصيانة التصحيحية الفورية
Industrial PC	حاسب صناعي
Industrial Revolution 4.0 (4IR)	الثورة الصناعية الرابعة
Infrared (IR)	الأشعة تحت الحمراء
Input/output Field	حقل دخل / خرج
Integer	عدد صحيح
Internet Of Services (IoS)	إنترنيت الخدمات
Internet Of Things (IoT)	إنترنيت الأشياء
Internet Protocol Address (IP)	عنوان بروتوكول الإنترنيت
K	
Key Performance Indicators (KPIs)	مؤشرات الأداء الرئيسية
L	
Lubrication	التشحيم
M	
Mean Time Between Failure (MTBF)	متوسط الزمن بين الأعطال
Mean Time To Repair (MTTR)	متوسط زمن الإصلاح
O	
Optimum Point	النقطة المثالية
Overall Equipment Effectiveness (OEE)	الفعالية الشاملة للمعدات

P	
Programmable Logic Controller (PLC)	أجهزة التحكم الآلي القابلة للبرمجة
Predictive Maintenance (PdM)	الصيانة التنبؤية
Predictive Maintenance 4.0 (PdM4.0)	المستوى الرابع للصيانة التنبؤية
Preventive Maintenance (PM)	الصيانة الوقائية
Proactive Maintenance	الصيانة الاستباقية
R	
Reactive Maintenance (RM)	الصيانة التفاعلية
Real	عدد حقيقي
Reliability Centered Maintenance (RCM)	الصيانة المرتكزة على الوثوقية
Remote Terminal Unit (RTU)	وحدة التحكم الطرفية
Root Mean Square (rms)	متوسط الجذر التربيعي
Run To Failure	التشغيل حتى الفشل
S	
Safety , Health , Environment (SHE)	السلامة, الصحة , البيئة
Simple Network Management Protocol (SNMP)	بروتوكول إدارة الشبكة البسيط
Simulation	محاكاة
Sonic	صوتي
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)	التحكم الإشرافي وتحصيل البيانات
T	
Thermal Image	صورة حرارية
Thermography	التصوير الحراري
Time Based Maintenance (TBM)	الصيانة المعتمدة على الزمن
Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP)	بروتوكول الإنترنيت
Transmitter	مرسل إلكتروني
Tribology	علم الاحتكاك
Total Productive Maintenance (TPM)	الصيانة الإنتاجية الشاملة
U	
Used Based Maintenance (UBM)	الصيانة المعتمدة على الاستخدام
Ultrasonic	الأمواج الفوق صوتية

V	
Vibration	الاهتزاز
Vibration Acceleration	تسارع الاهتزاز
Vibration Displacement	انزياح الاهتزاز
Vibration Velocity	سرعة الاهتزاز
W	
Wear	التآكل

ملخص

استطاعت الصيانة التنبؤية تغيير المفاهيم التقليدية لاستراتيجيات الصيانة القديمة وكان لتقنياتها مثل مقاييس الاهتزاز والكاميرات الحرارية الأثر الكبير في تحقيق مستويات عالية من الجودة وتحسين أداء عمل الآلات في المنشآت الصناعية وزيادة كفاءتها الإنتاجية بالإضافة إلى قدرتها على تخفيض التكاليف التي كانت تتكبدها تلك المنشآت على صيانة المعدات لديها , خاصة مع دخول الثورة الصناعية الرابعة وظهور مفاهيم إنترنيت الأشياء التي ساهمت في تطوير تقنيات هذا المنهج الجديد للصيانة .

يتناول هذا البحث مفهوم الصيانة التنبؤية من خلال عرض رؤية شاملة للتقنيات والأساليب الحديثة المتبعة في تنفيذ الصيانة وإلقاء نظرة على تكاليف تلك التقنيات وكيف نستطيع من خلالها تحقيق أهداف الصيانة التنبؤية .

يسلط البحث أيضا الضوء على واقع الصيانة الموجود في مطحنة جبلة والتي تعتبر مؤسسة اقتصادية ذات أثر كبير في حياة المواطن السوري وذلك من خلال دراسة أقسام المطحنة وأنواع محركاتها وإجراء جولات ميدانية والمقابلات الشخصية لمعرفة أساليب الصيانة المتبعة حاليا ضمنها .

يهدف البحث إلى تصميم خطة تجريبية تساعد في انتقال مفهوم الصيانة المتبع حاليا في مطحنة جبلة إلى مفهوم الصيانة التنبؤية وذلك من خلال اقتراح الحلول التالية:

المقترح الأول :استخدام أنظمة التحكم الآلي المبرمج PLC لمراقبة بيانات سرعة الاهتزاز عبر الحساسات المثبتة على المحرك ومن ثم تفعيل عمليات الإنذار باستخدام الوسائل المرئية والرسائل الإلكترونية لمشرفي الصيانة .

المقترح الثاني :الربط بين نظام الـ PLC ونظام الـ SCADA عبر شاشات اللمس في عرض رسومي لقيم حساسات الاهتزاز بهدف لفت نظر مشغلي الآلات إلى ضرورة تنفيذ الصيانة .

المقترح الثالث : الاستعانة بالتطبيقات السحابية مثل SIEMENS Mindsphere من خلال إرسال بيانات الاهتزاز للمحرك عبر شبكة الإنترنيت ليصار إلى تحليلها وإرسال إشعارات التنبيه للمستخدم.

Abstract

Predictive maintenance has been able to change the traditional concepts of old maintenance strategies. Its techniques, such as vibration meters and thermal cameras, have had a great impact on achieving high levels of quality, improving the performance of machines at industrial plants, increasing their productivity efficiency, and reducing the costs that these facilities incurred in maintaining their equipment, especially with the advent of the Fourth Industrial Revolution and the advent of the Internet, which contributed to the development of the technologies of this new concept of maintenance.

This paper examines the concept of predictive maintenance by offering a holistic view of recent maintenance implementation techniques and by looking at the costs of those techniques and how we might achieve our predictive maintenance goals.

The research also sheds light on the reality of maintenance in the Jableh's mill, which is an economic institution with a great impact on the lives of Syrian citizens by studying the sections of the mill and the types of its engines, and conducting field tours and personal interviews to learn the current maintenance methods in it.

The research aims to design a pilot plan that will help transfer the maintenance concept currently used in Jableh's mill from interactive maintenance to predictive maintenance by proposing the following solutions:

Proposition1: Use PLC systems to monitor vibration rate data via sensors installed on the motor and activate alerts using visual aids and E-mail messages for service supervisors

Proposition 2: By linking the PLC system to the SCADA system via touch screens in a graphical display of vibration sensor values in order to draw the attention of machine operators to the need for maintenance .

Proposition 3: By using Cloud applications such as Siemens Mindsphere to send vibration data of the engine via the Internet for analysis and notification to the user.

الفصل الأول

الإطار العام للمشروع

Chapter 1

General Framework of Research

1-1 مقدمة Introduction

لسنوات عديدة مضت ومنذ بداية ظهور الثورة الصناعية الأولى كانت الصيانة تعتبر أمرا ثانويا أي بمعنى آخر الإبقاء على الآلة في حالة عمل حتى ظهور العطل وتوقف الآلة عن العمل جزئيا أو كليا ليصار عندها لتنفيذ عملية الإصلاح وهو ما يمكن تسميته بـ " الصيانة الإسعافية " فقد كان الاهتمام منصبا فقط على العملية الإنتاجية والتركيز على المنتج [12] .

لكن التطورات السريعة والمتلاحقة على مر السنين وخاصة في مجال الصناعة والإنتاج كان لها الدور الأساسي في دفع المبتكرين لتطوير عمليات الصيانة وإيجاد البدائل المناسبة التي تلبي حاجات الإنتاج وتحاول الإبقاء على الآلة لأطول فترة عمل ممكنة ومنع التوقف المفاجئ للآلات وذلك من خلال تنفيذ عمليات صيانة دورية لتلك الآلات خلال فواصل زمنية محددة في محاولة للحفاظ على استمرارية العمل .

كما أن التغير السريع الحاصل في مجال الأسواق التجارية في العقود الأخيرة ساهم في حصول تغييرات جذرية في مجال طرق وأساليب الصيانة القديمة المتبعة , فقد بدأت تظهر العديد من الشركات المنافسة لشركات قديمة وعريقة كانت تعتبر نفسها متربعة على عرش الإنتاج لفترات طويلة في ظل الانفتاح الكبير للأسواق التجارية وتخطي عمليات الانتاج للحدود الجغرافية للبلدان و ظهور سلاسل التوريد بما تتضمنه من الحاجة إلى الالتزام بتحقيق رغبات الزبائن في الوقت المناسب الأمر الذي يقتضي بموجبه الحفاظ على وثوقية خطوط الإنتاج بحيث تكون قادرة على تنفيذ الأعمال المطلوبة منها دون حدوث أي توقف مفاجئ .

تلك التنافسية باتت مصدر قلق للعديد من المدراء الذين كانوا يحاولون الإبقاء على الميزة التنافسية خاصة من خلال تخفيض أسعار منتجاتهم عن طريق تخفيض تكاليف الإنتاج إلى أدنى مستوياتها مع المحافظة على مستويات الجودة ,وكان لعمليات الصيانة والتقنيات المستخدمة حصة كبيرة في إجراء العديد من الدراسات والأبحاث الاقتصادية التي أظهرت وجود تكاليف عالية وغير مستفاد منها أحيانا في تلك العمليات الأمر الذي اعتبر هدرا في الميزانيات التجارية وسببا رئيسيا في زيادة تكلفة المنتج [13] .

ظهرت الصيانة التنبؤية كنتيجة للعديد من الابتكارات التي كان الهدف منها رأب ذلك الصدع الموجود في القطاع الصناعي, فمن ناحية كان لابد من الحفاظ على الآلات وخطوط الانتاج والتخفيف من كمية الأعطال فيها الأمر الذي يسمح بالحفاظ على سمعة الشركة في قدرتها على تلبية رغبات الزبائن

في الوقت المحدد , ومن ناحية أخرى كان لابد من تخفيف الأعباء المادية والتكاليف المرتفعة التي يتم إنفاقها على عمليات الصيانة مما يؤدي إلى تخفيض تكاليف المنتج وزيادة الميزة التنافسية للشركة وذلك من خلال تنفيذ الصيانة في الزمان والوقت اللازم من دون أية أعباء إضافية غير ضرورية, فاستخدمت العديد من الطرق العلمية المعتمدة على دراسة الحالة الفنية للمحركات من الناحية الكهربائية والميكانيكية بالاعتماد على العديد من الحساسات المتنوعة والتجهيزات التي كان الهدف من استخدامها القدرة على تحديد وثوقية الآلة وبالتالي إمكانية التنبؤ باقتراب الحاجة إلى صيانتها قبل حدوث العطل المفاجئ .

ساهم التطور التكنولوجي في مجال أتمتة خطوط الإنتاج وظهور أنظمة التحكم الآلي المبرمج PLC في زيادة انتشار الصيانة التنبؤية ,فقد ساعدت أنظمة الـPLC مشرفي الصيانة في المصانع على اتخاذ القرار المناسب وذلك من خلال تأمين القراءة الآنية للحساسات المستخدمة وبسرعة عالية الأمر الذي يسمح لهم بالمتابعة الدقيقة والمتواصلة لحالة الآلة ,ومع بداية ظهور أنظمة الـ SCADA التي وفرت القدرة على تخزين وتحليل البيانات وعرضها على مجموعة كبيرة ومتنوعة من واجهات المخاطبة البشرية HMI مثل شاشات التحكم وأجهزة الحاسوب أصبح من الضروري انتقال معظم المصانع إلى اعتماد نهج الصيانة التنبؤية .

في العام 2016 ومع اعلان المنتدى الاقتصادي العالمي المنعقد في دافوس عن بداية ظهور ما بات يطلق عليه اسم الثورة الصناعية الرابعة The Fourth Industrial Revolution بكل ما تحمله من الزخم الهائل في التطورات الحاصلة في مجال الاتصالات وشبكة الإنترنيت وبزوغ إنترنيت الأشياء IoT والقدرة على تخزين كميات هائلة من البيانات ,وتحليلها والتنقيب فيها لاستخلاص ما يلزم لاتخاذ القرارات الصحيحة كان لانتقال الصيانة التنبؤية إلى مستوى أكثرا تطورا أمرا حتميا لابد منه ,فظهرت العديد من المواقع الإلكترونية والمخدمات السحابية المتخصصة في عمليات تخزين البيانات المرسلة عبر الإنترنيت والتي تظهر قراءات حالة الآلة لحظة بلحظة ليتم تنقيتها وتحليلها ومن ثم تحذير المشرفين عن ضرورة إجراء الصيانة عبر إرسال رسائل التنبيه بعدة طرق مثل البريد الإلكتروني E-mail أو استخدام تطبيقات أجهزة الموبايل لاستلام إشعارات الإنذار. هذه التقنيات المتنوعة أدت إلى إحداث الصيانة التنبؤية نقلة نوعية في المجال الصناعي و اعتبارها أمرا أساسيا ومرتكزا يمكن أن يساهم بشكل فعال في دعم الميزة التنافسية للشركة [13] .

يبقى السؤال الأهم الذي يمكن أن يخطر في بالنا . ما هو الموقع الذي تحتله قطاعاتنا الصناعية السورية في مجال الصيانة التنبؤية ؟ وهل تتم الاستفادة من تلك التقنيات المتطورة في تنفيذ إجراءات الصيانة ضمن معاملنا ومنشآتنا الصناعية ؟ للأسف الشديد تظهر البيانات عدم وجود أي اعتماد لخطة الصيانة التنبؤية في الشركات الصناعية إلا ما ندر في بعض الشركات الخاصة أما باقي المنشآت فغالبيتها يعتمد على مبدأ انتظار العطل ليتم عندها إجراء الصيانة والتي يمكن أن تتأخر كثيرا في بعض الأحيان نتيجة عدم توفر بعض المواد والقطع التبديلية للتجهيزات القديمة الموجودة .

من بين تلك القطاعات الهامة كانت المؤسسة العامة للحبوب التي تتبع إداريا إلى وزارة التجارة الداخلية وحماية المستهلك و يقع تحت تصرفها جميع المنشآت المتعلقة بتخزين الحبوب (صوامع الحبوب) بالإضافة إلى مطاحن الحبوب . تتوزع تلك المنشآت على جميع أرضي الجمهورية العربية السورية وتمتلك المؤسسة ما يعادل 34 مطحنة , وتعتبر مطحنة جبلة الواقعة في محافظة اللاذقية والتي ستكون محور هذا البحث من بين تلك المنشآت الهامة حيث بدأ العمل فيها في العام 2012 مع قدرة إنتاج تصل إلى ما يعادل 425 طنا من الطحين يوميا الذي يتم توزيعه على الأفران لإنتاج الخبز اليومي مما يؤدي إلى وضع القائمين عليها دائما في حالة تأهب قصوى عند حدوث أي عطل يمكن أن يؤدي إلى توقف الإنتاج .

2-1 مشكلة البحث Research Problem

هذه الأهمية الاقتصادية لمطحنة جبلة والانعكاسات السلبية التي يمكن أن تنتج عن حدوث أي عطل في المحركات الأساسية تدفعنا إلى طرح التساؤلات التالية :

- ما مدى اهمية الصيانة بشكل عام ؟ وماهي الفروقات التي تميز أنواعها المختلفة؟
- لماذا تعتبر الصيانة التنبؤية من أفضل الطرق المستخدمة لتنفيذ الصيانة؟
- ماهي التقنيات المستخدمة في تطبيق الصيانة التنبؤية؟
- ما هو أسلوب الصيانة المتبع حاليا في مطحنة جبلة ؟ وهل يحقق أية فائدة للمنشأة ؟
- كيف يمكن أن نحقق الربط بين تقنيات التنبؤ عن الأعطال مع أنظمة الـPLC والـ SCADA ؟
- ماهي الفائدة التي يمكن أن تقدمها تقنية إنترنيت الأشياء في هذا المجال وكيف يمكن تحقيقها؟

3-1 هدف البحث Research Objective

يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على مفهوم الصيانة التنبؤية من خلال إظهار الدور الهام لهذا المفهوم في عمليات الإنتاج والقدرة على تخفيض الأعباء والتكاليف المالية بالإضافة إلى زيادة وثوقية خطوط الإنتاج مقارنة مع أنواع الصيانة الأخرى المستخدمة حاليا في مختلف القطاعات الصناعية.

كما يوضح البحث الطرق والتقنيات المستخدمة في الصيانة التنبؤية وماهي الأدوات التي يمكن أن تستخدم في تنفيذ تلك الصيانة وذلك عن طريق إجراء دراسة عملية تجريبية على المحركات الكهربائية الموجودة ضمن مطحنة جبلة في مدينة اللاذقية باستخدام حساسات الاهتزاز واقتراح ثلاث طرق مختلفة للتنبؤ باقتراب حدوث العطل في هذه المحركات :

1- استخدام حساسات الاهتزاز ووصلها مع نظام PLC من النوع SIEMENS S7-1200 بهدف قراءة الحالة الفنية للمحرك وتحديد الوقت المناسب لإجراء الصيانة عبر إرسال E-Mail إلى المشرف الفني وتحذيره باستخدام وسائل الإنذار المرئية والصوتية.

2- الربط بين نظام الـ PLC ونظام الـ SCADA بهدف إظهار مؤشر رسومي على شاشة المراقبة يبين قراءات الاهتزاز للمحركات وإضافة التأثيرات الملونة لتنبيهه بضرورة فحص الآلة قبل تعطلها.

3- استخدام أدوات وتقنيات إنترنيت الأشياء في عملية إرسال بيانات الاهتزاز الخاصة بالمحركات إلى نظام SIEMENS MindSphere السحابي Cloud-Based ليتم تحليلها واستخلاص الوقت المناسب لإجراء الصيانة و متابعة حالة المحركات لحظة بلحظة عبر التطبيق المستخدم على أجهزة الموبايل .

4-1 أهمية البحث Research importance

ترتبط أهمية هذا البحث بالاهتمام المتزايد الذي أبدته العديد من المنشآت الصناعية خارج القطر في اعتماد منهج الصيانة التنبؤية بسبب الوفورات الكبيرة التي تم تحقيقها في تلك المنشآت من خلال تخفيض تكاليف الصيانة ورفع مستويات الوثوقية للآلات وجاهزيتها الأمر الذي ينعكس إيجابا على زمن وكلفة الإنتاج .

كما يأتي هذا البحث في وقت تعاني منه العديد من منشآتنا الصناعية وللأسف من الهدر الكبير في نفقات الصيانة على خطوط الإنتاج القديمة واعتمادها على أساليب وطرق صيانة قديمة عفا عليها الزمن من فترة طويلة مما يؤدي إلى زيادة كلفة المنتج والاضطرار في كثير من الأحيان إلى التوقف عن الإنتاج لفترات طويلة ريثما يتم إصلاح الأعطال الموجودة وهوما يمكن اعتباره كارثيا وخاصة في

بعض المنشآت الحيوية والتي تعتبر الشريان الاقتصادي في بلادنا مثل مصانع التبغ والسكر والدواء بالإضافة إلى مطاحن الحبوب .

بالتالي تكمن أهمية البحث في محاولة نقل منهج وتقانة الصيانة التنبؤية وتوطينها ضمن منشآتنا لخلق قفزة تقانية نوعية تكون قادرة على نقل الواقع الصناعي السوري خطوة مهمة نحو الأمام .

5-1 الدراسات السابقة Literature Review

تناولت العديد من الدراسات الصيانة التنبؤية من خلال العديد من المحاور فمنها من ركز على الشق الاقتصادي والمنفعة التي يمكن الحصول عليها عبر تطبيقها وإيضاح التقنيات المستخدمة لتنفيذ عملية التنبؤ بالأعطال, ومنها من اتجه نحو الشق العملي والتطبيقي عن طريق الاستفادة من عمليات تحليل البيانات واستثمارها في الصيانة التنبؤية ضمن بعض خطوط الإنتاج. تقدم الفقرة التالية بعضا من تلك الدراسات بشيء من الإيجاز :

الدراسة الأولى [4]

استهل (R.Keith Mobley) بداية كتابه (An Introduction To Predictive Maintenance ,2002) في إظهار الأهمية الاقتصادية للصيانة وآثارها على تكلفة المنتجات والتي تبعا للكاتب تتراوح بين 15% من تكلفة المنتجات الغذائية وصولا إلى 60% من تكلفة المنتجات الثقيلة مثل المنتجات المعدنية.

اعتمد الكاتب على الدراسات الاقتصادية التي تظهر بأن مقابل كل دولار أمريكي يتم صرفه على الصيانة يذهب 33 سنت منه أي ما يعادل الثلث إلى عمليات صيانة غير ضرورية و ليست ذات أهمية ,وبالتالي فإنه مقابل 200 مليار دولار أمريكي تصرف على الصيانة في معامل الولايات المتحدة الأمريكية يتم هدر 60 مليار دولار على نشاطات صيانة ليس لها أية منفعة, وذلك بسبب اعتماد العديد من الشركات على المبدأ القائل بأن الصيانة "**شر لابد منه**" وأنهم مضطرين للقيام بأعمال الصيانة مثل استبدال الزيوت والكشف الروتيني الدوري على الآلات بهدف المحافظة على الإنتاج فقط لا غير حتى وإن كانت تلك الآلات ليست بحاجة لمثل هذه الأعمال .

جزئ الكاتب طرق إدارة الصيانة المستخدمة حاليا إلى الأنواع التالية :

النوع الأول التشغيل حتى الفشل Run-to-Failure حيث أنه لا يتم فعليا في هذا النوع تنفيذ أي عملية صيانة للآلة إلى أن تتوقف عن العمل مما يجعل هذا النوع من الإدارة أكثر الأنواع كلفة بسبب تكلفة المخزون من قطع الغيار بالإضافة إلى التكاليف المرتفعة على صيانة الآلة عند

تعطلها في الأوقات الحرجة مثل أوقات ذروة الإنتاج الموسمي كمعامل إنتاج السكر بالإضافة إلى انخفاض الإنتاج ريثما يتم إصلاح العطل .

النوع الثاني الصيانة الوقائية Preventive Maintenance يعتمد هذا النوع على عامل الزمن من خلال إجراء عدة عمليات صيانة مثل التشحيم والتزييت للآلة وذلك خلال فواصل زمنية يتم جدولتها بحسب عدد ساعات العمل للآلة على اعتبار أن احتمال تعطل الآلة يزداد بزيادة عدد ساعات عملها ويكون احتمال فشل الآلة منخفضا نسبيا في بداية استخدامها ولفترة محددة . يحتاج هذا النوع من الصيانة إلى برامج جدولة تبين ساعات العمل الخاصة بكل آلة وأوقات تنفيذ الصيانة .

النوع الثالث الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance عرف الكاتب هذا النوع بأنها فلسفة ومنهجية تعتمد على المراقبة المنتظمة للحالة الميكانيكية والتشغيلية الفعلية للآلة بهدف توفير البيانات اللازمة لضمان أقصى فترة زمنية بين الإصلاحات ,وذلك من خلال برامج إدارة صيانة متخصصة تقوم بتحليل تلك البيانات ليتم جدولة جميع أنشطة الصيانة اعتمادا على الحاجة إلى الإصلاح بعكس الأنواع السابقة التي كانت تعتمد على الجدولة الزمنية المتكررة كما هو الحال في الصيانة الوقائية أو على الحدس والخبرة الشخصية لمدير الصيانة.

من وجهة نظر الكاتب تتوفر خمس تقنيات لإدارة الصيانة التنبؤية :

- **مراقبة الاهتزازات وتحليلها Vibration Monitoring and Analysis** من خلال تثبيت مجموعة من الحساسات على المحركات لقراءة قيم الاهتزازات أو استخدام الحساسات الفوق صوتية Ultrasonic لتحليل مستوى الضجيج في المحرك والذي سيزداد تلقائيا عند بداية حدوث عطل ما في أجزائه .
- **التصوير الحراري Thermography** باستخدام تقنيات الأشعة تحت الحمراء Infrared .
- **علم الاحتكاك Tribology** الذي يعتمد على جمع البيانات الناتجة عن تحليل زيت المحركات والتي يستدل بواسطتها عن مدى جودة الزيت المستخدم وفاعليته.
- **مراقبة بارامترات العملية Process Parameter Monitoring** للتحقق من فعالية الآلة و كفاءة انتاجها عبر قراءة بارامتراتها بشكل مستمر خاصة تلك المتعلقة بالقياسات الكهربائية مثل قيم التيارات التي سترتفع بشكل ملاحظ في بداية الأعطال.
- **الفحص المرئي Visual Inspection** من قبل مستخدمي ومشرفي الآلة لملاحظة أي تغير في الآلة مثل حدوث تسرب في زيت المحرك .

تستخدم التقنيات السابقة ضمن برنامج إدارة الصيانة التنبؤية وذلك تبعا لنوعية التجهيزات فمثلا تستخدم حساسات الاهتزاز في مراقبة الأجزاء الميكانيكية للآلة في حين يمكن استخدام التصوير الحراري في التجهيزات الكهربائية.

النوع الرابع الطرق الحديثة في الصيانة وهي التي بدأت بالظهور في السنوات الأخيرة مثل الصيانة الإنتاجية الشاملة (TPM) Total Productive Maintenance و تم تبنيها في اليابان ثم انتشرت إلى معظم دول العالم وتعتمد في جوهرها على المشاركة بين جميع أقسام المنشأة من تصنيع وإنتاج وصيانة بالإضافة إلى المهندسين والفنيين و الإداريين بهدف تحسين ما يطلق عليه الفعالية الشاملة للمعدات Overall Equipment Effectiveness (OEE) مما يؤدي لرفع جودة وأداء الإنتاج .

كذلك الأمر بالنسبة للصيانة المرتكزة على الوثوقية (RCM)Reliability Centered Maintenance التي ظهرت في الستينات من القرن الماضي كمفهوم جديد في أساليب الصيانة وتهتم بالنظام الوظيفي للصيانة وتوجه تركيزها على سلامة وأمان الأفراد والآلات .

اعتمد الكاتب على استخدام برامج حاسوبية متخصصة تقوم بقراءة البيانات وتحليها بهدف وضع برنامج إدارة للصيانة التنبؤية ووضع أيضا بعضا من المواصفات الفنية التي يجب توفرها عند اختيار البرامج الحاسوبية مثل السرعة والوثوقية والدقة في التعامل مع البيانات بالإضافة إلى الواجهة البشرية الملائمة .

الدراسة الثانية [3]

في محاولتها لمقاربة واقع المنشآت السورية في مجال الصيانة التنبؤية سعت (م. تغريد ظريف علي) في بحثها الذي أعد لنيل شهادة الدكتوراه بعنوان (تحليل وتصميم منهجية لصيانة تنبؤية وقائية في محطة حاويات مرفأ اللاذقية الدولية ,2017) إلى تطبيق منهجية الصيانة التنبؤية من خلال تحليل البيانات الواقعية التي تم توفيرها من قسم الصيانة وتكنولوجيا المعلومات في محطة حاويات مرفأ اللاذقية والمتمثلة في إتلاف ثلاث شركات : سوريا القابضة , Terminal Link , وشركة CMA-CGM الفرنسية .

تم استخدام تلك البيانات والتنقيب فيها باستخدام عدة خوارزميات بهدف التنبؤ بأعطال مختلف المعدات كالرافعات الجسرية والشوكية بالإضافة إلى الحاضنات والستافات, وشملت تلك البيانات خمس مستويات :

- **المستوى الأول** : وصف العطل مثل إصلاح تسرب الزيت , استبدال مضخة الماء .
- **المستوى الثاني** : نوع العطل ميكانيكي أو إلكتروني أو هيدروليكي .. .
- **المستوى الثالث** : موضع العطل مثل محرك , علبة سرعة .
- **المستوى الرابع** : نوع نشاط الصيانة مثل استبدال , إصلاح , معايرة .. .

- **<u>المستوى الخامس</u>:** الزمن اللازم للإصلاح .

تم تطبيق البحث على عدة مراحل بدأت بعمليات جمع البيانات وذلك باتباع عدة أساليب :

- المقابلات الشخصية مع عدة مستويات إدارية وفنية ضمن شركة الحاويات .
- الاطلاع على السجلات في دفاتر الصيانة الموجودة في الورشات الفنية .
- البيانات الإلكترونية التي يقدمها نظام إدارة الصيانة المحوسبة Computerized Maintenance Management System (CMMS) والمستخدم في المحطة بهدف جدولة أعمال الصيانة الدورية والإبلاغ عن الأعطال, وإدارة مخزون القطع التبديلية .

من ثم استخدمت خوارزمية الكشف عن النقاط الشاذة في تحسين جودة البيانات k-means تلتها مرحلة التنبؤ بزمن إصلاح المعدات باستخدام خوارزمية Box-Jenkins , وفي المرحلة الأخيرة تم تطبيق تقنيات التنقيب في البيانات (الاقتران Association, والعنقدة Clustering , والتصنيف Classification) بهدف التنبؤ بموضع العطل وأنشطة الصيانة اللازمة .

عرفت الباحثة **<u>الصيانة التنبؤية</u>** : بأنها الصيانة المرتكزة على التنبؤ بالعطل والتي تتم عبر مجموعة من الأنشطة التي تكشف عن التغيرات في الحالة المادية للمعدات مع الزمن لتنفيذ أعمال الصيانة ,ولتحقيق أطول عمر خدمي للآلات .

كما اعتبرت أن الوظيفة الأساسية للصيانة التنبؤية هي جمع البيانات التاريخية للآلات قيد التشغيل مثل الزمن ,التدفق , الضغط , الاهتزاز , درجة الحرارة , الجهد والمقاومة الكهربائية ومن ثم دراستها وتحليلها ليتم بعد ذلك تحديد المشاكل المحتملة في المستقبل .

قسم البحث الصيانة التنبؤية إلى نوعين وفقا لطريقة الكشف عن إشارات العطل :

1- صيانة تنبؤية معتمدة على مراقبة الحالة Condition-Based Predictive Maintenance(CBM) والتي تعتمد على أجهزة رصد الحالة بشكل دوري أو مستمر للكشف عن إشارات الفشل .

2- صيانة تنبؤية معتمدة على البيانات الإحصائية Statistical-Based Predictive Maintenance(SBM) استنادا على التسجيل الدقيق لتوقفات عناصر ومكونات المصنع لتطوير نماذج التنبؤ بالعطل .

بهدف التأكد من نتيجة تطبيق البحث وفائدته اعتمدت الباحثة على مجموعة من مؤشرات الأداء الرئيسية Key Performance Indicators (KPIs) والتي تسمح بقياس المسافة بين الوضع الحالي والوضع المرغوب المستهدف وذلك وفقا للمؤشرات التالية :

- متوسط الزمن بين الأعطال Mean Time Between Failure (MTBF) .
- متوسط زمن الإصلاح Mean Time To Repair (MTTR) .
- متوسط زمن الإصلاح للصيانة الدورية Mean Time To Repair for Preventive Maintenance (MTTR_PM) .
- الوثوقية Reliability .
- الجاهزية Availability .

استطاعت الباحثة ومن خلال استخدام منهجية Box-Jenkins من بناء سلسلة زمنية تعطي نتائج دقيقة وقيم مستقبلية لزمن الصيانة الأمر الذي ساهم في إدارة مخزون القطع التبديلية بشكل جيد وتخفيض متوسط زمن الإصلاح وزيادة متوسط الزمن بين الأعطال وتحسين قيم الجاهزية .

الدراسة الثالثة [5]

في دراسة تطبيقية أخرى قام (Prabhu.A.Doss) في بحث بعنوان (Design and Implementation of Predictive Maintenance in Mechatronic System,2019) أعد لنيل شهادة دبلوم في أنظمة التحكم والمعلومات من جامعة أوسترافا Ostrava باستخدام تقنيات وأساليب مختلفة في تطبيق الصيانة التنبؤية .

حيث تم تنفيذ الدراسة على نظام مخبري مصغر يحاكي خطوط الإنتاج الصناعية و يقوم بنقل المنتجات من قسم الإنتاج إلى مستودعات التخزين باستخدام مجموعة من محركات السير والحساسات المختلفة أما عن قيادة المنظومة فتتم من خلال نظام PLC .

هدف البحث في هذه الدراسة هو تطبيق إجرائية الصيانة التنبؤية على النظام وذلك عن طريق تحليل البيانات القادمة من الحساسات الموصولة مع نظام الـ PLC من أجل التنبؤ بقرب حدوث العطل , وعند ذلك يتم إرسال رسالة إنذار إلى المستخدم بضرورة إجراء عملية الصيانة .

بالإضافة إلى نظام الـ PLC استخدم الباحث تقنية إنترنيت الأشياء في تحليل البيانات الواردة من النظام وذلك عبر الاستفادة من المنصات السحابية Cloud Platform المتخصصة التي تتيح لمستخدميها تخزين بيانات الحساسات عبر شبكة الإنترنيت بشكل مستمر ومن ثم القيام بتحليلها وإظهار المعلومات الضرورية من خلال لوحة تحكم Dashboard يمكن للمستخدمين الوصول إليها باستخدام مختلف الأجهزة مثل الحواسب و أجهزة الموبايل عبر تثبيت تطبيق محدد على تلك الأجهزة ,بالإضافة إلى ذلك تقوم تلك

المنصات ووفق المعطيات الموجودة باستخدام خوارزميات مختلفة للتنبؤ بقرب حدوث عطل ما في المنظومة وإرسال إشعارات الإنذار للمستخدم .

فسر الباحث استخدامه للمنصات السحابية بسبب الكمية الكبيرة من البيانات التي يمكن تحليلها ضمن المنصة خلال ثوان قليلة خاصة في مجال الصيانة التنبؤية التي تتطلب كما هائلا من البيانات يتم تمريرها إلى المنصة بشكل مستمر ولحظي , كذلك وعلى الرغم من أن المنصات تتقاضى أجرا يتناسب مع كمية البيانات التي يتم معالجتها ولكن تبقى تكلفتها أقل من تكلفة شراء البرمجيات وأدوات التخزين المرتفعة الثمن في حال استخدام أجهزة الحاسب الشخصي مما يساعد المستخدمين في تحسين إدارة الوقت والجودة والصيانة بأقل التكاليف .

عرض الباحث شرحا تفصيلا للميزات والمساوئ لخمس منصات سحابية تستخدم في مجال التنبؤ والصيانة التنبؤية:

- AWS (Amazon Web Services)
- Google Cloud.
- Microsoft Azure IoT Hub .
- SIEMENS Mindsphere .
- IBM Cloud .

وفي سعيه لتطبيق البحث بشكل يحاكي الأنظمة الصناعية تم استخدام منصة IBM Cloud بالإضافة إلى نظام PLC من النوع SIEMENS S7-1500 والعديد من تقنيات الاتصال عبر الإنترنيت التي تؤمن إيصال وتبادل البيانات بين نظام الـ PLC مع المنصة السحابية و استطاع الباحث من خلال استخدام تقنيات المنصة السحابية عرض القراءات الخاصة بالحساسات المرتبطة بعملية الصيانة و إبلاغ المستخدمين بالوقت المناسب لإجراء الصيانة .

الدراسة الرابعة [6]

اقتصاديا فقد خلصت الدراسة التي قام بها كل من (Dr.Milos Milojevic , Dr.Franck Nassah) وتم نشرها ضمن تقرير حمل عنوان Digital Industrial Revolution With Predictive Maintenance) (2018, لصالح مجموعة CXP Group التقنية إلى العديد من النتائج التي تبين المنفعة التي تحققها استراتيجية الصيانة التنبؤية .

اعتمد التقرير في منهجيته على المقابلات الشخصية مع صانعي القرار في مجال الأعمال وتكنولوجيا المعلومات والمسؤولين عن الصيانة في 232 شركة تصنيع ونقل أوروبية موزعة على الشكل التالي :

43% شركات صناعة السيارات, 35% شركات صناعات تحويلية , 22% شركات نقل. تم التطرق إلى العديد من التساؤلات في المقابلات الشخصية كان من أهمها :

- وصف مدى فعالية وكفاءة استراتيجية الصيانة المتبعة في الشركة .
- نقاط الضعف الرئيسية في عمليات الصيانة .
- الفوائد التي حققتها الشركات التي اعتمدت منهجية الصيانة التنبؤية .

وقد خلصت الدراسة إلى النتائج التالية :

- 91% من شركات تصنيع السيارات اعتبرت أن تقليل زمن الإصلاح و التوقف الغير مخطط له والناتج عن الفشل المفاجئ من أهم الفوائد المكتسبة من الصيانة التنبؤية .
- اعتبرت 93% من شركات الصناعات التحويلية أن تحسين البنية التحتية الصناعية القديمة هو الهدف الرئيسي لاعتمادها على الصيانة التنبؤية .
- تعتبر شركات النقل من أوائل المستخدمين لمنهجية الصيانة التنبؤية والذين ساهموا في نشر تلك المنهجية حيث دلت الإحصائيات إلى أن 72% من شركات النقل الأوروبية تعتمد على استراتيجية التنبؤ بالعطل .

تطرق التقرير كذلك إلى ذكر العديد من الأمثلة حول الشركات التي اعتمدت بالفعل على تطبيق أساليب الصيانة التنبؤية ومن أهمها :

- شركة Vestas الدنماركية المختصة في تصنيع تور بينات الرياح والتي استخدمت الصيانة التنبؤية لتوفير العديد من البيانات التشغيلية لمنتجاتها المنتشرة في العديد من البلدان حول العالم بهدف القراءة المستمرة لتلك البيانات والتأكد من وثوقية الأداء عبر شبكة الإنترنيت .
- اعتمدت شركة Nestle العالمية على تزويد مكنات القهوة الخاصة بها بتقنيات إنترنيت الأشياء بهدف التنبؤ واكتشاف العطل وإجراء عملية الصيانة عن بعد .
- استطاعت شركة النقل Transport For London البريطانية توفير ما يقارب 3 ملايين جنيه استرليني سنويا من خلال التنبؤ بموعد عطل محركات القطارات .

العامل المشترك لجميع الأمثلة التي قدمها التقرير كان قدرة الصيانة التنبؤية على دعم الشركات في تقديم خدمات الصيانة للزبائن عن طريق قراءة معطيات الآلات عبر شبكة الإنترنيت الأمر الذي ساهم في رفع مستوى الجودة وخدمة الزبائن لهذه الشركات ومنحها العديد من الميزات التنافسية .

الدراسة الخامسة [7]

في مقالة علمية باسم

(Initiating Predictive Maintenance for a Conveyor Motor in a Bottling Plant Using Industry 4.0 Concepts , 2018) قام بها كل من

(Kahiomba Sonia Kianngala & Zenghui Wang) و تم نشرتها في مجلة

(The International Journal of Advanced Manufacturing Technology) وهدفت إلى تسليط الضوء على أهمية الصيانة التنبؤية ضمن المشاريع الصناعية الصغيرة والمتوسطة وذلك من خلال استخدام تقنيات الاهتزاز لقراءة حالة محرك ناقل ضمن آلة تعبئة مصغرة و الكشف عن الأخطاء أو التهديديات المبكرة في المحرك.

اعتمدت المقالة على استخدام وظائف البرمجة المتقدمة لأجهزة التحكم الآلي المبرمج الـ PLC حيث تم اختيار جهاز من نوع SIEMENS S7-1200 ليقوم بمراقبة بيانات سرعة الاهتزاز من خلال حساسات الاهتزاز المثبتة على المحرك الناقل ومن ثم يتم إنشاء خطة للصيانة التنبؤية ترتكز على مقارنة هذه البيانات مع قيم حدية معيارية تم اعتمادها ضمن المواصفة ISO 2372, وبناء على نتيجة المقارنة يتم اتخاذ قرار ضرورة إجراء الصيانة .

بحسب خوارزمية الخطة الموضوعة في المقالة يقوم جهاز الـ PLC بتسجيل نتائج المقارنة السابقة بشكل آلي ومستمر ضمن سجلات رقمية محفوظة في ملف قواعد معطيات من النوع CSV يتم إنشاؤه من قبل النظام , ومن ثم تأتي الخطوة التالية المتمثلة في تشغيل برنامج خاص مكتوب بلغة برمجة البايثون Python يهدف إلى إرسال رسائل تنبيه إلى مشرفي الآلة بالبريد الإلكتروني وذلك تبعا لنتائج المقارنة .

يتصل جهاز الـ PLC مع نظام SCADA بهدف تصدير تلك البيانات إلى واجهة رسومية مرئية يمكن للمستخدمين عن طريقها قراءة البيانات بشكل أوضح وتحليلها اعتمادا على قواعد الصيانة المتبعة .

كما يقترح المقال أيضا استخدام نظام مراقبة لا مركزي بالاعتماد على البيانات الموجودة في ملف الـ CSV من خلال إرسالها عبر الإنترنيت إلى منصة ClicData السحابية والتي ستقوم بدورها بتحليل تلك البيانات واستخدام خوارزميات التنبؤ وإرسال التقارير والإشعارات بالبريد الإلكتروني لمشرفي الآلة والذين يمكنهم أيضا الاطلاع على تلك البيانات عبر أجهزة الحاسب والهواتف المحمولة المتصلة بشبكة الإنترنيت عبر لوحة التحكم Dashboard الخاصة بالمنصة .

6-1 أوجه الاستفادة من الدراسات السابقة The Benefits of Literature Review

شكلت الدراسات السابقة التي استعرضناها مسبقا خارطة طريق استطعنا من خلالها تحديد ملامح هذا البحث وذلك عبر النقاط التالية :

- شكلت **الدراسة الأولى** بوابة الدخول لمفهوم الصيانة بشكل عام عبر عرضها لأهمية الصيانة في مجال القطاع الصناعي بالإضافة إلى الشرح المفصل لمختلف طرق إدارة الصيانة , كذلك ساهمت في إيصال فكرة واضحة وجلية عن منهجية الصيانة التنبؤية من خلال الشرح التطبيقي لأنواع التقنيات المستخدمة في تنفيذها .
- استطعنا عبر **الدراسة الثانية** مقاربة واقع الصيانة في القطاع الصناعي السوري وفهم المنهجية المطلوبة لنقل وتطوير أساليب الصيانة في تلك القطاعات وتوجيهها نحو الصيانة التنبؤية من خلال الأسلوب المتبع في المقابلات الشخصية والجولات الميدانية للباحثة ضمن مرفأ اللاذقية الأمر الذي سنحاول إسقاطه في الدراسة العملية لحالة مطحنة جبلة , كما أضافت الدراسة معلومات غنية في قياس نتائج تطبيق خوارزميات التنبؤ عن طريق استخدام مؤشرات الأداء المختلفة .
- يكمن وجه الاستفادة الهام من **الدراسة الثالثة** في الطريقة التي استطاع البحث من خلالها تحقيق التكامل المتناسق بين تقنيات الاهتزاز وأنظمة الـ PLC وتوجيه ذلك النظام المتكامل وتوظيفه في تنفيذ الصيانة التنبؤية ,بالإضافة إلى توضيح آلية عمل المنصات السحابية و عرضه الشامل لأنواعها وتحديد النقاط الإيجابية والسلبية لكل منها مما يساعد في تحديد الاختيار الأمثل لنا ضمن بحثنا .
- وضحت لنا **الدراسة الرابعة** وبالأرقام والإحصائيات أهمية الصيانة التنبؤية وقدرتها على تخفيض التكاليف ورفع مستويات الإنتاج والجودة في أي قطاع صناعي يقوم باستثمارها بالشكل المناسب وهو ما يمكن أن يشكل دافعا قويا للمنشآت الصناعية في بلدنا وخاصة في حالة مطحنة جبلة التي يتم دراستها في هذا البحث إلى حتمية وضرورة استخدام ذلك النهج الجديد والمتطور من الصيانة .

- قدمت لنا **الدراسة الخامسة** منهجية واضحة لتطبيق الصيانة التنبؤية على محركات المطحنة باستخدام تقنيات الاهتزاز من خلال المواصفة ISO2372 مع شرح مفصل لخوارزمية التطبيق خطوة بخطوة بالاعتماد على أنظمة الـ PLC وقواعد المعطيات .

7-1 حدود البحث Research Limitations

- الحدود الزمانية : الفصل F21 في العام 2022 .
- الحدود المكانية : مطحنة جبلة في مدينة اللاذقية .
- الحدود البشرية : رؤساء قسمي الكهرباء والميكانيك في مطحنة جبلة و مشرفي الصيانة في القسمين المذكورين .

8-1 خطة البحث Research Plan

يعتمد هذا البحث على معالجة المشاكل الموجودة في أغلب المحركات الكهربائية نتيجة استخدام طرق صيانة لا تتمتع بالكفاءة والفعالية , وذلك باستخدام تقنيات الصيانة التنبؤية التي تعتمد على تحليل البيانات التي تمثل القراءة الحقيقية والآنية لحالة المحركات .

يعالج البحث المشاكل السابقة من خلال تقييم استراتيجيات الصيانة المتبعة حاليا في أغلب المنشآت وذلك بعرض سلبيات تلك الاستراتيجيات واقتراح الحلول التي تستطيع تقديم نتائج أفضل في أداء الآلات وفي نفس الوقت تخفيض التكاليف وذلك عبر استخدام قراءات حساسات الاهتزاز والتي يمكن من خلالها التنبؤ باقتراب حدوث العطل , حيث يستفيد البحث من الربط بين تلك الحساسات وأنظمة التحكم الآلي المبرمج PLC ليتم عن طريقها جمع البيانات التي توضح الحالة الفعلية والحقيقية لأداء الآلة ومن ثم يقدم البحث اقتراحاته من خلال ثلاث طرق يمكن أن تستخدم جميعها أو كل طريقة على حدى تبعا لاستراتيجية المنشأة ونظرتها للتكاليف التي يتم إنفاقها على عمليات الصيانة :

- **الطريقة الأولى:** باستخدام أنظمة الـ PLC في قراءة قيم حساسات الاهتزاز ومقارنتها مع قيم معيارية ليتم إرسال رسائل تحذير بمختلف الوسائل المرئية و الإلكترونية لمشرفي الصيانة بضرورة تنفيذ الصيانة قبل حدوث العطل .
- **الطريقة الثانية** : الربط بين نظام الـ PLC ونظام الـ SCADA لعرض بيانات حساسات الاهتزاز على شاشة مرئية تمكن مشرفي الآلة من متابعة وقراءة تلك البيانات بشكل مستمر .
- **الطريقة الثالثة** : استخدام تقنيات إنترنيت الأشياء عبر معالجة تلك البيانات وتحليلها واستخلاص النتائج منها باستخدام مزودي خدمات الصيانة السحابية مثل MindSphere

بالإضافة إلى توفير إمكانية عرض تلك البيانات عبر لوحة التحكم Dashboard على مختلف الوسائل المحمولة مثل أجهزة الحاسب و الموبايل والقدرة على التنبؤ بانخفاض مؤشرات الأداء للآلة و اقترابها من حالة الفشل وتحذير القائمين عليها . يبين الشكل (1-1) الخطوات التي تمثل خطة البحث .

الشكل (1-1) خطة البحث

الفصل الثاني

الإطار النظري للمشروع

Chapter 2

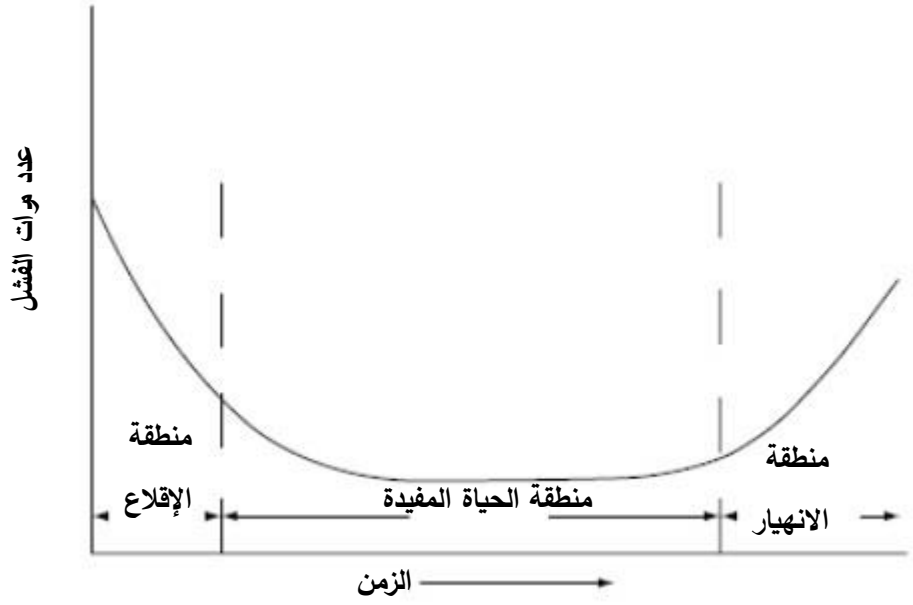
Theoretical Framework of Research

1-2 مفهوم الصيانة Maintenance Concept

تشكل الصيانة بأنواعها واستراتيجياتها المختلفة مرتكزا أساسيا في أي منشأة بغض النظر عن حجم تلك المنشأة ونوعها , فالصيانة لا تقتصر فقط على المنشآت الصناعية الكبيرة بل تعتبر عملية في غاية الأهمية بدءا من المنشآت المنزلية مرورا بالمنشآت الصناعية الصغيرة وخطوط الإنتاج البسيطة وصولا إلى المصانع الضخمة بخطوط إنتاجها المعقدة .

" **لا شيء يدوم للأبد** " حقيقة لا يمكن أن نتغاضى عنها عندما يتعلق الأمر بالآلة الصناعية التي تكون في حالة العمل ,فبالرغم من كل التطورات التقنية والثورات الصناعية المتعددة التي أثرت في عمليات مكننة الإنتاج بقيت الآلة معرضة لاحتمال حدوث العطل الذي يؤدي إلى توقفها عن أداء وظيفتها , ومع مرور الوقت تبين أن هذا الاحتمال يزداد بزيادة المدة التي تستخدم فيها الآلة ,وهو الأمر الذي دفع بمصممي الآلات بأن يعتبروا أن " **كل آلة لديها دورة حياة محسوبة أو فترة حياة تشغيلية محددة** " كأن نقول مثلا عن آلة أن عمرها التشغيلي 7000 ساعة عمل أو 20000 عملية تشغيل/إيقاف , وبالتالي يمكن أن نعتبر أن العمر التشغيلي لأي آلة هو تابع للزمن [1] .

يمثل الشكل التالي ما يسمى بمنحني حوض الاستحمام Bathtub Curve والذي يمثل العلاقة بين عدد مرات فشل الآلة مقابل الزمن



الشكل (2-1) منحني حوض الاستحمام Bathtub Curve [11]

يمكن أن نقسم المنحني إلى ثلاث مناطق زمنية تختلف مدتها تبعا لنوع الآلة [1], [11] :

- **منطقة الإقلاع Start Up** : هي الفترة الزمنية التي تبدأ عند بداية تشغيل الآلة لأول مرة والتي يتم فيها وضع الآلة فعليا في الخدمة ,ويلاحظ في هذه الفترة أن معدلات الفشل تكون مرتفعة في البداية لتبدأ بالتناقص تدريجيا بعد أن يصبح التعامل مع الآلة الجديدة واضحا .

أما أسباب الفشل في هذه الفترة فعادة ما تكون ناتجة عن عيوب في تصنيع الآلة نفسها, أو مشكلات في تثبيت الآلة وتشغيلها بسبب عدم وجود معرفة كافية في تجميع أجزائها والقيام بإجراءات تشغيل أولية غير صحيحة .

- **منطقة الحياة المفيدة Normal Life** : تتميز بانخفاض معدل الفشل في الآلة وثباته حيث تعتبر هذه الفترة الزمنية هي الفترة التي يتم فيها الاستثمار الأعظمي لقدرات الآلة ضمن العمر التشغيلي المصمم لها.

تعتبر العشوائية هي السمة المميزة لمختلف أسباب الفشل في هذه المرحلة مثل العوامل البيئية الخارجية أو الأخطاء الغير مقصودة للفنيين القائمين على تشغيل الآلة ,كما أنه من الجدير بالذكر أن برامج الصيانة الغير جيدة يمكن أن تلعب دورا مهما في تقليص المدة الزمنية لهذه الفترة كالإهمال في صيانة الأعطال الصغيرة مما ينقص من العمر التشغيلي للآلة.

- **منطقة الانهيار Equipment Warn Out** : أو ما يمكن تسميته بفترة الشيخوخة ,حيث تبدأ معدلات الفشل بالازدياد تدريجيا مع مرور الوقت حتى الوصول إلى حالة الفشل التام والانهيار لوظائف الآلة .

من أهم أسباب الفشل في هذه المرحلة وصول الآلة إلى " **بداية النهاية** " لعمرها التشغيلي نتيجة عدة عوامل تدريجية مثل الإجهاد والتآكل والاحتكاك بالإضافة إلى تراكم الأعطال خلال الفترات السابقة دون معالجتها بشكل جذري واكتشاف الأسباب الحقيقة المتخفية وراء تلك الأعطال والاكتفاء فقط بمحاولة معالجة تبعاتها .

ولكن ما هو دور الصيانة في المخطط السابق ؟

ترافق الصيانة على مختلف أنواعها دورة حياة الآلة و تهدف إلى الحفاظ على الحالة الفنية والتشغيلية والتي تمكن الآلة من القيام بوظائفها بفعالية لفترة زمنية تعادل على الأقل العمر التشغيلي الذي صممت

الآلة لتعمل ضمنه بالإضافة إلى محاولة إطالة هذا الزمن قدر الإمكان لتحقيق أفضل وأطول استثمار ممكن للآلة , وهو الأساس الذي يرتكز عليه مفهوم الصيانة والذي سنتطرق إليه من خلال بحثنا عن تعريف الصيانة وأهميتها ودراسة أنواعها.

2-1-1 تعريف الصيانة Maintenance Definition

تعددت التعاريف التي تحاول أن تصف الصيانة وذلك تبعا لأهميتها و دورها في المجالات المختلفة , و نذكر في ما يلي بعضا منها :

- لغويا يعرف معجم أكسفورد Oxford Dictionary مصطلح الصيانة بأنها " عملية الحفاظ على شيء ما في حالة جيدة من خلال فحصه أو إصلاحه بانتظام " [10] .

" The act of keeping something in good condition by checking or repairing it regularly ".

- يعرف المعهد البريطاني للمقاييس British Standards Institute (BSI) في منشوره (Maintenance – Maintenance Terminology BS EN13306,2010) الصيانة بأنها :

"مجموعة من جميع الإجراءات التقنية والإدارية والتنظيمية التي تتم خلال دورة حياة العنصر بهدف الاحتفاظ به أو استعادته إلى الحالة التي يمكنه من خلالها أداء الوظيفة المطلوبة " .

" Combination of all technical, administrative and managerial actions during the life cycle of an item intended to retain it in, or restore it to, a state in which it can perform the required function " [20] .

- في حين كان تعريف هيئة القياسات الفيدرالية الأمريكية (Federal Standards 1037C,1996) أكثر تفصيلا حيث عرف الصيانة " أي نشاط مثل الاختبارات والقياسات والاستبدالات والتعديلات والإصلاحات والتي تهدف إلى استعادة أو الاحتفاظ بأي وحدة وظيفية في حالة محددة تمكنها من تأدية وظائفها المطلوبة ".

"Any activity, such as tests, measurements, replacements, adjustments and repairs, intended to restore or retain a functional unit in a specified state in which the unit can perform its required functions" [19] .

- من منطلق آخر عرفت الصيانة بأنها " الحفاظ على رأس المال المستثمر في صورة آلات ومعدات وأجهزة ومرافق ومباني بحالة تسمح باستخدامها بمستوى أداء معين وبأسلوب اقتصادي بما يحقق أهداف الإنتاج " [2] .

من الملاحظ أنه بالرغم من الاختلاف في صياغة تعريف الصيانة إلا أن التعاريف كلها اتفقت على أن الصيانة وبغض النظر عن الأسلوب والطريقة المتبعة تهدف في نهاية الأمر إلى الحفاظ على الآلة وإعادتها إلى المستوى الذي يسمح لها بتأدية وظيفتها .

يمكن أن نعرف **الصيانة** في بحثنا على أنها كل نشاط إداري أو تقني يهدف بالدرجة الأولى إلى المحافظة على الآلة وإطالة عمرها الافتراضي وتخفيض احتمال فشلها ,بالإضافة إلى القدرة على اتخاذ كل ما يلزم من إجراءات لإعادة تشغيلها بأقصر مدة في حال فشلها بهدف الحفاظ على مستوى الإنتاج .

2-1-2 أهمية الصيانة Maintenance Importance

تكتسب الصيانة أهميتها من خلال الفوائد المتعددة التي تقدمها الاستراتيجيات المتبعة في الصيانة ضمن المنشآت, وبخاصة في المنشآت الصناعية والتي تعتبر فيها خطوط الإنتاج بمختلف عناصرها البشرية والآلية العصب الرئيسي لتقييم مدى الربح الذي تحققه عملية الإنتاج .

بالرغم من تعدد تلك الفوائد تبقى المنفعة الاقتصادية هي الأهم شأنا والتي تسعى مختلف المنشآت إلى تحقيقها من خلال اتباعها مختلف الأساليب ,ولعل خفض تكاليف الإنتاج يمكن اعتباره أحد أهم العناصر التي يمكن أن تساعد المنشأة في زيادة ربحيتها , ولكن السؤال الذي يطرح كيف يمكن أن تؤثر الصيانة في عملية خفض تكاليف الإنتاج ؟

تشكل تكاليف الصيانة نسبة لا يستهان بها من التكاليف التشغيلية لعملية الإنتاج وذلك على اختلاف نوع الصناعة ,فعلى سبيل المثال تمثل تكاليف الصيانة ما يعادل % 20-50 من تكلفة الإنتاج في الصناعات المعدنية ,كما تشير الإحصائيات إلى أنه يتم صرف ما يقارب حوالي 1500 مليار يورو سنويا على ميزانية الصيانة في أوروبا حيث بلغت حصة السويد فقط منها 20 مليار يورو .أما من ناحية أخرى فإن الخسائر التي يمكن أن تتكبدها الشركات نتيجة توقف أحد خطوط الإنتاج بسبب الفشل في تشغيله تعتبر باهظة الثمن ,ففي الصناعات المعدنية يمكن أن تصل خسائر توقف أحد خطوط السحب إلى مليون دولار أمريكي يوميا أما في شركات الطيران فقد بلغت خسائر توقف طائرة Boeing 747 عن العمل نتيجة العطل 0.5 مليون دولار أمريكي في اليوم الواحد. تتعاظم هذه الخسائر مع التطور الحاصل في الاقتصاد العالمي وبخاصة مع ظهور سلاسل التوريد والتزامات الشركات بتنفيذ العقود وتسليم منتجاتها ضمن الوقت المحدد Just In Time ومن المؤكد أن ظهور مثل هذه الأعطال أمر غير مرغوب فيه لدى تلك الشركات [8] .

استطاعت الشركات التي بادرت إلى جعل الصيانة أحد أهم ركائز الإنتاج لديها من تحقيق المنفعة الاقتصادية وذلك من خلال [1] [9], :

- القدرة على جعل مستويات الأعطال للآلات ضمن حدودها الدنيا وبالتالي إطالة العمر الافتراضي التشغيلي للآلة مما يؤدي إلى تقليل إنفاق الأموال المهدورة لاستبدال تلك الآلات التي فشلت في وقت أبكر مما ينبغي بسبب عدم وجود استراتيجية للصيانة المبكرة .
- تحقيق استقرارية في الإنتاج تضمن للشركة تجنب الخسائر الفادحة الناتجة عن إخلالها في مواعيد تسليم الطلبات للزبائن بسبب الاضطرابات في عملية الإنتاج نتيجة الأعطال المتكررة.
- تحقق الصيانة الوفورات المالية للشركة ليس فقط من خلال تخفيض تكاليف استبدال الآلات وقطع الغيار بل أيضا من خلال تخفيض ساعات العمل الإضافي للصيانة واستقدام خبرات خارجية مكلفة وبخاصة في الأوقات الغير مناسبة لتوقف الآلات مثل إيام العطل وخارج أوقات العمل الرسمية .

بالإضافة إلى المنفعة الاقتصادية الكبيرة التي تحققها الصيانة لابد من ذكر الفوائد الأخرى التي لا تقل أهمية [9], [1] :

- الحفاظ على الروح المعنوية للعاملين والمشرفين على الآلات حيث تتطلب عمليات الصيانة مشاركة فعالة وجدية من القائمين على الآلة كأن يلاحظوا مثلا وجود تسرب للزيت في أحد المحركات أو سماع أصوات اهتزاز قوية مما يستدعي تنفيذ الصيانة قبل أن يتعاظم العطل ونصبح غير قادرين على السيطرة عليه, وبالتالي فإن العاملين سيصبحون غير مكترثين في المشاركة عندما تكثر حالات الأعطال والتوقفات المتكررة لخطوط الإنتاج .
- بقاء مستويات الجودة ضمن الحدود المقبولة والعمل على رفعها خاصة في المنتجات التي يمكن أن تنخفض فيها تلك المستويات نتيجة زيادة اهتزاز المحرك مثلا أو زيادة مستويات الضجيج الذي يؤثر على العامل المشغل للآلة .
- توفير بيئة العمل المناسبة للعاملين في الشركة مما يزيد من انتاجيتهم فمشغل الآلة سيصبح أكثر قدرة على الإنتاج في بيئة تتوفر فيها أجهزة التبريد والتدفئة بشكل متواصل ومنخفضة الأعطال الأمر الذي يساعد في تنامي شعور العامل بملكيته للآلة وبالتالي الحفاظ عليها بشكل دائم .
- ترتبط الصيانة ارتباطا وثيقا مع مستويات الأمن والسلامة لكل من العاملين في المنشأة أو البيئة المحيطة فانخفاض مستويات الصيانة في المنشآت الكيميائية سيؤثر بشكل كبير في مستويات السلامة البيئية أو الشخصية .

ولعل مأساة مصفاة British Petroleum (BP) في عام 2005 التي وقعت في مدينة تكساس من أبرز الأمثلة على أهمية ذلك الارتباط بين الصيانة والسلامة فقد اضطرت الشركة نتيجة اتهامها القضائي بالتقصير في صيانة المعدات إلى دفع غرامة قدرها 21 مليون دولار أمريكي وإنفاق ما يعادل مليار دولار لإصلاح آثار الانفجار الذي حصل فيها والذي خلف وراءه ما يقارب 15 قتيلا و إصابة 500 شخص ,و هو الأمر الذي كان من الممكن تجنبه في حال إنفاق الشركة أموالا أكثر على صيانة الآلات والمعدات لديها [8] .

3-1-2 أنواع الصيانة Maintenance Types

استطاعت الصيانة أن تواكب جميع التطورات التقنية الحاصلة عبر الزمن بحيث تكون قادرة على تلبية الاحتياجات الصناعية لكل جيل ,وكان لذلك الأمر الأثر الهام في ظهور مفاهيم ومدارس مختلفة للصيانة وأنواعها مثل المعيار الأوروبي EN13306 ,والمعيار الألماني DIN2003 ,ووزارة الطاقة الأمريكية US DOE (2004) بالإضافة إلى المعايير الخاصة بالباحثين الأكاديميين في مجال الصيانة [14] .

صنفت الصيانة بناء على ذلك إلى مجموعة متعددة من الأنواع[1] . نذكر فيما يلي بعضا منها :

- **<u>الصيانة التفاعلية Reactive Maintenance</u>** وهي الصيانة التي تتم بعد فشل الآلة وفقدانها القدرة على أداء وظيفتها .يندرج ضمن هذا النوع ما يسمى بالصيانة التصحيحية Corrective Maintenance (CM) والتي تتضمن بدورها :

– الصيانة التصحيحية المؤجلة (Deferred Corrective Maintenance (DCM أي الصيانة التي لا يتم اجراؤها فور اكتشاف العطل ولكن يتم تأخيرها لأسباب متعددة مثل عدم توفر الخبرة الفنية داخل الشركة أو لتجاوز كلفة الإصلاح الميزانية المحددة أو عدم توفر القطع التبديلية.

– الصيانة التصحيحية الفورية Immediate Corrective Maintenance (ICM) يتم اجراء الصيانة فورا دون تأخير لتجنب العواقب الغير مرغوبة مثل صيانة مصعد في حال وجود أشخاص عالقين داخله أو صيانة آلة ضمن خط إنتاج رئيسي يؤدي فشلها إلى التأخر في التزامات محددة مع الزبائن.

[1] نظرا لتعدد المعايير والأنواع المختلفة للصيانة استخدمت المراجع التالية في تحديد أنواع الصيانة والتعريف الخاص بكل نوع
- Maintenance Taxonomy By Khazraei and Deuse (2011)
- Zero- Breakdown Machines and Systems By Lee.J and Scott.L (2006)
- محاضرات مادة الجودة,والوثوقية, والصيانة للدكتور عماد شلفون ,الجامعة الافتراضية الخاصة ,2021
- الموقع الإلكتروني لبرنامج الصيانة MaintainX .
- Proactive Maintenance for mechanical Systems By E.C.Fitch (1992)

تمتلك الصيانة التفاعلية العديد من السلبيات فزمن إصلاح العطل غير معروف وهو الأمر الذي يمكن أن يؤدي إلى خسائر كبيرة نتيجة توقف الإنتاج في أوقات حرجة بالإضافة إلى زيادة في تكلفة الإصلاح خاصة في حال القيام بذلك في أوقات العمل الإضافي كما أن هذا النوع من الصيانة يمكن أن يقلل من العمر التشغيلي للآلة .

لكن وعلى الرغم من تلك السلبيات إلى أن هذا النوع من الصيانة لا يزال مستخدما حتى يومنا الحالي بسبب فوائدها المتمثلة في تكلفتها المنخفضة على المدى القصير فهي لا تحتاج إلى أية نفقات تصرف على صيانتها طالما أن الآلة في حالة عمل وقادرة على تنفيذ المطلوب منها .

- **الصيانة الاستباقية Proactive Maintenance** بعكس الصيانة التفاعلية تهدف الصيانة الاستباقية إلى تحديد أسباب تعطل الآلة وإصلاحها قبل حدوثها وبالتالي فإنها تقوم بمعالجة جذرية لحالات الفشل بدلا من معالجة أعراض الفشل . ينطوي ضمن هذا النوع من الصيانة نوعين أساسيين وهما :

– الصيانة الوقائية Preventive Maintenance (PM) وفيها يتم اجراء الصيانة على فترات زمنية محددة مسبقا أو وفقا لمعايير محددة بهدف التقليل من احتمال الفشل أو تدهور أداء الآلة. لذلك فإن هذا النوع من الصيانة يتضمن العديد من الأنواع الفرعية وذلك تبعا للمعيار المستخدم في تنفيذ الصيانة ومنها على سبيل المثال :

- الصيانة المعتمدة على الحالة Condition –Based Maintenance (CBM) وتعتمد على مراقبة أداء المعدات باستخدام المقاييس والحساسات المختلفة لتحديد الوقت المناسب لإجراء الصيانة مثل صيانة أنابيب المياه وذلك عبر مراقبة قيمة ضغط المياه ضمن الأنابيب لملاحظة أي انخفاض في تلك القيم يكون ناجما عن حدوث تسرب للمياه.
- الصيانة المعتمدة على الزمن Time-Based Maintenance (TBM) وهي الصيانة التي تعتبر مجدولة حسب الزمن كأن يتم إجراء الصيانة لأنظمة التكييف قبل اقتراب فصل الصيف أو اجراء الصيانة لقسم استقبال الشوندر السكري في معامل السكر قبل بداية تسليم الموسم.
- الصيانة المعتمدة على الوثوقية Reliability –Centered Maintenance (RCM) استراتيجية شاملة على مستوى المنشأة مصممة لزيادة الإنتاجية مع تخفيض تكاليف الصيانة وتحديد طرق الصيانة الأنسب بهدف زيادة الوثوقية والإنتاجية. ترتكز الـ RCM

على مجموعة من المبادئ ولعل أكثرها أهمية والذي يلامس جوهرها هو مبدأ " بعض الإخفاقات لها تأثير أكبر من غيرها Some failures have a bigger impact than others " وبالتالي لا تعتبر جميع الآلات والمعدات في أي منشأة صناعية على نفس القدر من الأهمية من حيث التشغيل لذلك توفر الـ RCM خارطة طريق إدارية لتحديد أولويات أنشطة الصيانة بما يضمن استمرار الإنتاجية على نفس الدرجة من الوثوقية ولكن مع التخفيف من أعباء الصيانة الغير ضرورية .

- الصيانة المعتمدة على الاستخدام Use-Based Maintenance (UBM) يتم اجراء الصيانة وذلك تبعا لمقياس يحدد مدى استخدام الآلة مثل عداد ساعات العمل أو كمية الكيلومترات المقطوعة للسيارة .
- الصيانة المعتمدة على العمر Age-Based Maintenance (AGM) والتي تعتمد على معيار عمر الآلة واقترابها من نهايته لتنفيذ الصيانة .

– الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance (PdM) وهي المحور الرئيسي لهذا البحث والتي سنتطرق إليها بالتفصيل ضمن الفقرات القادمة .لكن يمكن أن نعرفها مبدئيا بأنها الصيانة التي تعتمد على التنبؤ المستمد من التحليل المتكرر لحالة الآلة ومن ثم تقييم تلك المعلومات لمعرفة مستوى أدائها .

تقسم الصيانة التنبؤية بحسب التقنية المستخدمة في قراءة البيانات إلى أربعة أقسام :

- التحليل الاهتزازي Vibrational Analysis والذي يعتمد على حساسات الاهتزاز المثبتة على المحركات الدورانية بغرض الكشف على حالات عدم الاتزان والتآكل .
- التحليل الصوتي Sonic Analysis يستخدم خاصة في الكشف على نقص التشحيم في الآلة والذي يؤدي إلى إصدارها ترددات صوتية مسموعة من قبل الأذن البشرية.
- التحليل الفوق صوتي Ultrasonic Analysis يستخدم للمعدات الكهربائية والميكانيكية من خلال تحديد أصوات الإجهاد والاحتكاك الغير مسموعة للأذن باستخدام تقنيات الأمواج فوق صوتية .
- تحليل الأشعة تحت الحمراء Infrared Analysis يستخدم في قراءة الصورة الحرارية للمعدات الكهربائية وأنظمة التبريد والهواء .

- **<u>الصيانة الإنتاجية الشاملة Total Productive Maintenance (TPM)</u>** تتصف الصيانة الإنتاجية الشاملة بأنها لا تعتبر فقط نوع جديد من أنواع الصيانة بل هي نظام شامل للتعامل مع

الآلة بهدف تحقيق الإنتاج المثالي وتحسين وثوقية الآلات وجودة المنتج ورفع الروح المعنوية للعاملين .

ترتكز الصيانة الإنتاجية الشاملة على 8 مبادئ أساسية :

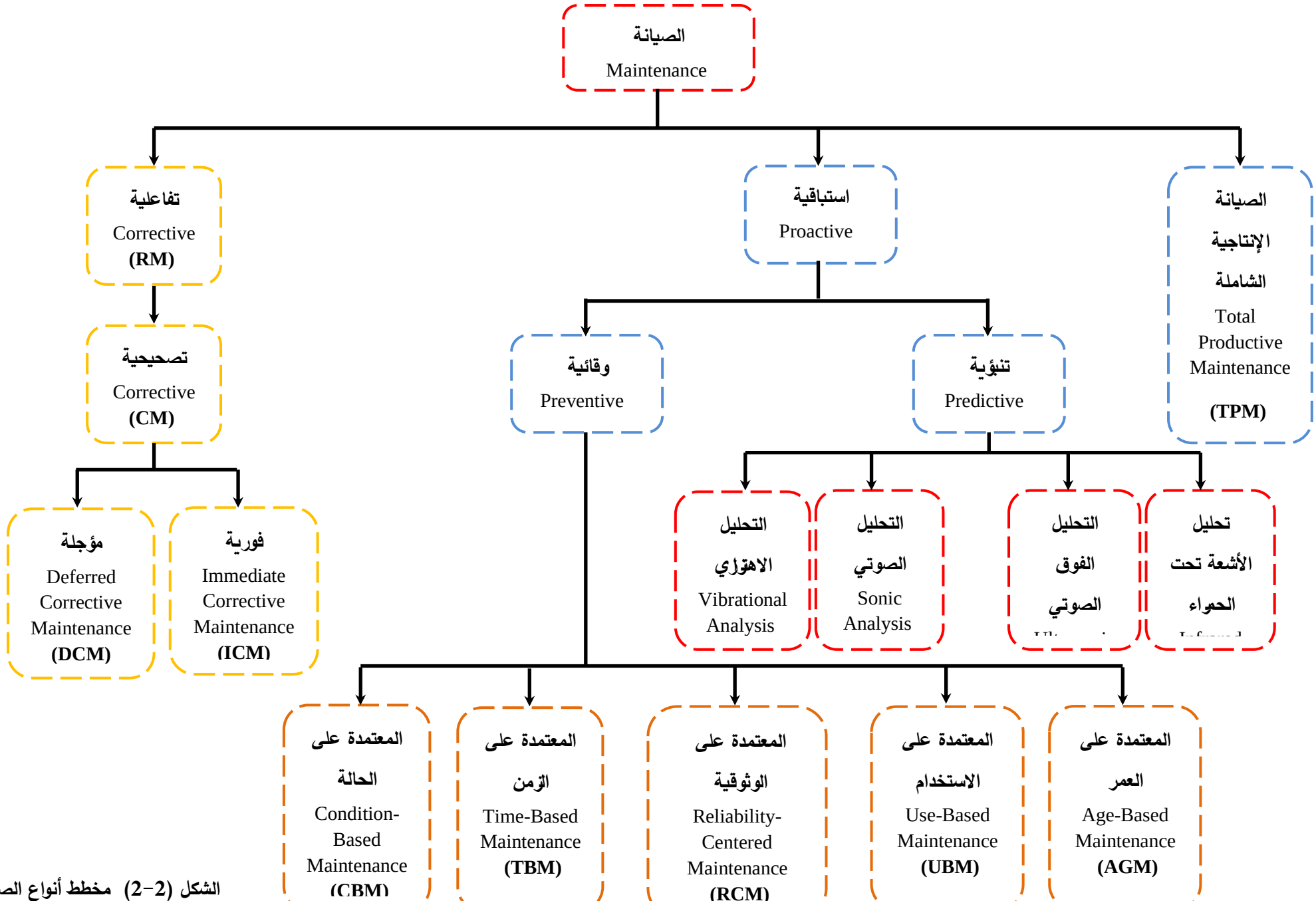
- الصيانة الذاتية Autonomous Maintenance أي تدريب العاملين والمشغلين على أداء مهام صيانة روتينية على الآلات الخاصة بهم مثل التنظيف والتزييت والتشحيم بهدف خلق تقارب بين المشغل والآلة الأمر الذي يؤدي إلى الكشف عن العطل بشكل مبكر .
- التحسين المركز Focused Improvement يعتمد هذا المرتكز على إدخال تحسينات صغيرة في نظام الصيانة ولكن يتم تنفيذها بشكل مستمر وشامل لجميع العاملين في الشركة وذلك انطلاقا من المبدأ القائل بأن العدد الكبير من التحسينات الصغيرة المستمرة أكثر فاعلية من التحسينات الكبيرة الطويلة الأمد وذات الكلفة العالية .
- الصيانة المخططة Planned Maintenance تهتم الصيانة الإنتاجية الشاملة بالتطبيق الدقيق والجيد لبرامج الصيانة الوقائية (المخططة) بهدف الوصول للحد الأدنى من الأعطال .
- الإدارة المبكرة للمعدات Early Equipment Management يستفيد المصممون من الخبرة العملية والمهنية لمشغلي الآلات في تصميم المعدات الجديدة حيث أن الصيانة الإنتاجية الشامل تنطلق من مبدأ أن التطوير المستمر نابغ من كافة مستويات الهيكل التنظيمي للشركة .
- جودة الصيانة Quality Maintenance والتي يتم تحقيقها عن طريق تحديد الأسباب الجذرية لحالات فشل الآلة والتخلص من المشاكل المتكررة والمزمنة من جذورها.
- التعليم والتدريب Training and Education يهدف التعليم والتدريب المستمرين لمشغلي وفنيي الآلات بالإضافة إلى الإداريين إلى تنفيذ مهام الصيانة بشكل مناسب في جميع الأوقات من خلال تلقيهم للتدريب المناسب وبشكل مستمر على أهداف ومعايير الـTPM .
- الصيانة الإنتاجية الشاملة في الإدارة Office TPM لا يقتصر تطبيق معايير ومفاهيم الـ TPM على المشغلين ومسؤولي الصيانة فقط بل تتوسع لتشمل أيضا النظام الإداري للشركة بهدف تحسين العمليات الإدارية مثل إدارة المشتريات ومعالجة طلبات الصيانة .

- السلامة والصحة والبيئة Safety ,Health ,Environment (SHE) تعتمد الـ TPM على مبدأ السلامة أولا فلا ينبغي أن يأتي تحسين الإنتاج على حساب زيادة المخاطر أو وقوع الحوادث ويأتي ذلك من خلال المحافظة على نظافة البيئة المحيطة بالآلات وبالعاملين .

ظهر مفهوم الصيانة الإنتاجية الشاملة في اليابان في السبعينات من القرن الماضي وانتشرت خلال الأعوام السابقة إلى جميع دول العالم حيث استطاعت الشركات التي طبقت هذا المفهوم الجديد من الصيانة اكتساب العديد من الفوائد فقد انخفض عدد الأعطال إلى 2% وزادت إنتاجية العامل بنسبة 40% لدى تلك الشركات .

لكن في المقابل من المهم أن نوضح أن تطبيق مفهوم الـ TPM لا يتم خلال فترة قصيرة بل يحتاج إلى ما يقارب 3 إلى 5 سنوات تبعا لحجم المنشأة , كذلك الأمر بالنسبة إلى كلفة تنفيذها وهو الأمر الذي شكل أهم عقبة من عقبات تطبيق الـ TPM بسبب أن أغلب الشركات تتوقع ظهور النتائج سريعا .

يبين الشكل (2-2) مخطط أنواع الصيانة



الشكل (2-2) مخطط أنواع الصيانة

في ظل هذا التنوع الكبير والمتعدد لأنواع الصيانة بإيجابياتها وسلبياتها يمكن أن يتبادر إلى ذهننا كيف يمكن أن تختار الشركة الاستراتيجية المناسبة لها ,وماهي المعايير التي يمكن استخدامها لتحديد الخيار الأفضل ؟

في بحث بعنوان (A Step By Step Guide to Choosing the Right Maintenance Strategy for Your Equipment ,2020) نشر من قبل (Ryan Chan) اعتبر صاحب البحث أن هنالك عاملين أساسيين ينبغي لأي شركة أخذهما في الاعتبار عند اتخاذها القرار بشأن استراتيجية الصيانة المناسبة وهما :

- **تكلفة تعطل المعدات** The Cost of Equipment Failure فكلما طالت مدة تعطل الآلة زادت الخسائر وبالتالي فإن بعض الأعطال تستحق بالتأكيد منعها ,خاصة بالنسبة للآلات والمعدات التي تعتبر أساسية في الحفاظ على العملية الإنتاجية .هذا المعيار لا يتضمن فقط التكلفة المالية الناتجة عن تعطل الآلة بل يتوسع ليشمل أيضا الأمان والسلامة البيئية فهي أيضا مخاوف تستحق الدراسة ,فإذا سبب العطل إصابة لأحد العاملين أو ضررا بيئيا فهو يستحق المنع أيضا .
- **سهولة المراقبة** Ease of Monitoring يجب الأخذ بالاعتبار أن عملية المراقبة للمعدات تتطلب كلفة مادية فإذا كانت تكلفة وضع آلة معينة تحت المراقبة أكبر من تكلفة فشلها فقد لا يكون الأمر يستحق التنفيذ .

يتم اختيار الاستراتيجية المناسبة من خلال تنفيذ الخطوات التالية :

- **الخطوة الأولى** : اختيار مجموعة من الفرق الهندسية والتقنية المختصة من كافة أقسام المنشأة ليشكلوا فريق التخطيط الذي سيقيم وضع الآلات وفق عدة معايير مع توفير البيانات اللازمة لهذا الفريق مثل متوسط الوقت بين حالات الفشل MTBF والفعالية العامة للمعدات OEE .
- **الخطوة الثانية** : تتمثل في قيام الفريق المختص بتحليل أهمية الآلات والمعدات وذلك من خلال استخدام نماذج تحليل شاملة كما هو في الشكل (2-3) حيث رتبت الأهمية وفق مقياس من 1 إل 5 واعتبرت القيمة 1 هي الأقل خطورة وتزداد نسبة الخطورة إلى الرقم 5 لتصبح كارثية .

يمثل هذا النموذج تحليلا شاملا كونه يأخذ في اعتباراته عدة عوامل وهي السلامة Safety ,تكاليف الصيانة Maintenance Costs ,مدة تحديد العطل وإجراء الصيانة وآثاره على الإنتاج Production ,وأخيرا آثار العطل على البيئة Environment .

الفئة Category	الخطورة Severity				
	1 معتدل	2 جدّي	3 عالي	4 شديد	5 كارثي
السلامة Safety	لا يوجد أضرار دائمة,لايوجد ضياع في الوقت ,لا آثار مرئية	أضرار دائمة, ضياع في الوقت , لا يوجد أثار مرئية دائمة	عدة أضرار دائمة ,احتمال فقدان الحياة	وفيات عديدة ,عدة إصابات دائمة , آثار قاتلة مرئية	العديد من حالات الوفيات , آثار مدمرة على مساحة واسعة
تكاليف الصيانة Maintenance Cost	أقل من 200 ألف دولار	بين 200 ألف إلى 2 مليون دولار	بين 2 مليون إلى 6 مليون دولار	بين 6 مليون إلى 8 مليون دولار	يتجاوز الـ8 مليون دولار
الإنتاج Production	أقل من 2 ساعة توقف إنتاج	من 2 إلى 8 ساعات توقف يمكن استعادة الإنتاج طبيعيا	أكثر من 24 ساعة توقف واحتمال استعادة الإنتاج	أكثر من 3 أيام توقف واحتمال استعادة نصف الإنتاج	أكثر من 3 أيام توقف إنتاج غير قابلة للاستعادة
البيئة Environment	حادث صغير ولا يوجد داعي لإبلاغ السلطات	يتطلب إبلاغ السلطات , لا تأثيرات أخرى	تلوث ضئيل ضمن الموقع	تلوث كبير يتطلب عمليات إخلاء	تلوث ضخم وأضرار بيئية مستمرة لفترات طويلة

الشكل (2-3) نموذج تحليل الأهمية [21]

فإذا فرضنا مثلا أن هذا النموذج استخدم لدى شركة إنتاج ألعاب أطفال بلاستيكية لتحديد الاستراتيجية الأفضل لمحركات السيور الناقلة لديها فأغلب الظن أن الفريق المختص سيقدر الأهمية بالدرجة 2 أي مستوى الخطر جدي Serious .

أما إذا اعتبرنا أن التحليل استخدم من قبل شركة تكرير نفط لاختيار الاستراتيجية الملائمة لأجل خطوط نقل النفط فمن المؤكد أن مستوى الخطورة سيصل إلى المستوى 5 أي الكارثي Disastrous .

- **الخطوة الثالثة** : تقييم تكاليف استراتيجيات الصيانة فإذا اعتبرنا أنه يمكن استخدام أربعة استراتيجيات مختلفة فإن الترتيب يصبح وفقا لما يلي:

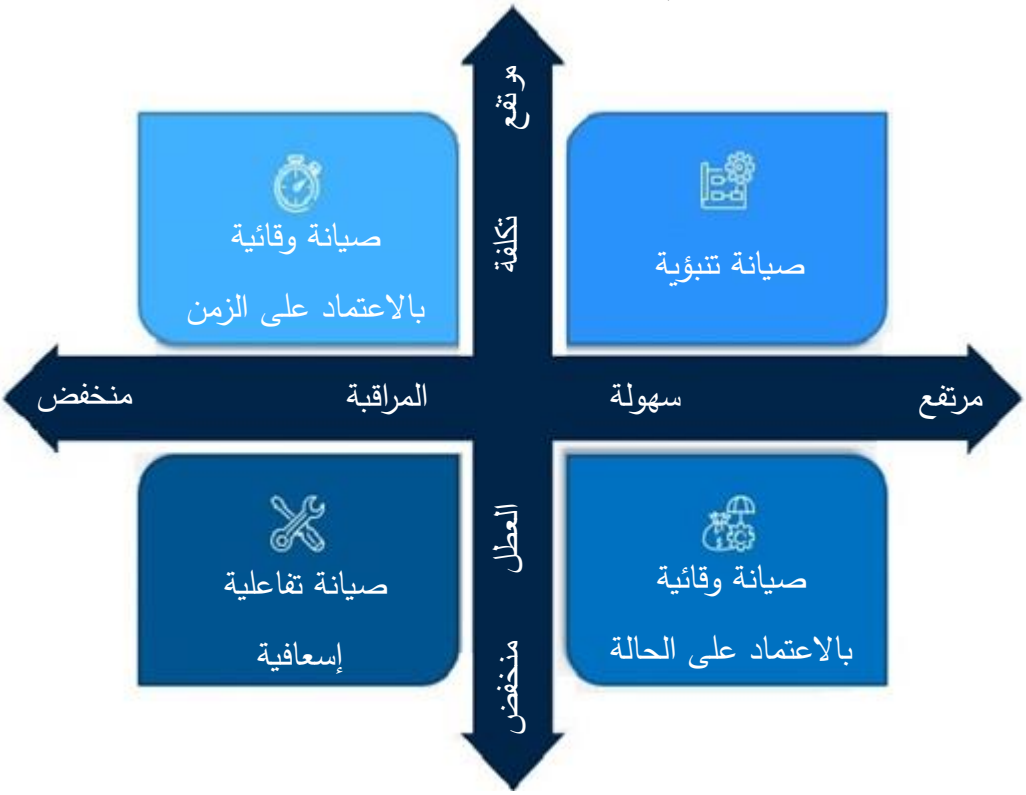
الصيانة التنبؤية PdM (الأكثر كلفة)

الصيانة الوقائية المعتمدة على الحالة CBM

الصيانة الوقائية المعتمدة على الزمن TBM

الصيانة التفاعلية RM (الأقل كلفة)

- **الخطوة الرابعة** : الاستعانة بما يسمى مصفوفة استراتيجية الصيانة Maintenance Strategy Matrix الموضحة في الشكل (2-4) وفيها جزئت استراتيجيات الصيانة إلى أربع أجزاء :



الشكل (2-4) مصفوفة استراتيجية الصيانة [21]

في **الربع الأول** من هذه المصفوفة لدينا الصيانة التنبؤية والتي يمكن استخدامها عندما يكون حجم الضرر الناتج عن الفشل كارثيا وفي المقابل تكون تكلفة الصيانة عن طريق المراقبة أكثر كلفة .

الربع الثاني للصيانة الوقائية المعتمدة على الزمن والتي تستخدم أيضا في حالات الأعطال الخطيرة ولكن تعتبر كلفة المراقبة فيها قليلة .

الربع الثالث خصص للصيانة التفاعلية المعتمدة على تشغيل الآلة حتى الفشل حيث تعتبر أقل كلفة ولكن في المقابل تستخدم فقط ضمن مستويات الخطورة المنخفضة .

أما **الربع الرابع** فهو للصيانة الوقائية المعتمدة على الحالة ذات الكلفة المرتفعة في المراقبة والمستخدمة أيضا ضمن مستويات الخطورة التي لا يؤدي الفشل فيها إلى كلفة عالية .

بالعودة إلى المثالين السابقين يمكن أن نستنتج أن شركة ألعاب الأطفال البلاستيكية يمكن أن تختار بين الصيانة المعتمدة على الحالة أو الصيانة التفاعلية ,في حين أن شركة تكرير النفط ستكون مضطرة إلى اختيار استراتيجية الصيانة التنبؤية باستخدام تقنياتها المختلفة التي سنعرضها في الفقرات التالية من البحث ,ولكن بداية لابد لنا من التعمق أكثر في مفهوم الصيانة التنبؤية .

2-2 الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance

تختلف الصيانة التنبؤية عن باقي استراتيجيات الصيانة الأخرى في أنها ترتكز على التنبؤ بالاعتماد على قراءة المعطيات التي تصف الحالة الحقيقية للآلة , فعلى سبيل المثال يقوم معظم الأشخاص باستبدال زيت المحرك لسيارتهم ضمن حدود المسافة التي تتراوح بين 3000 إلى 5000 كم بهدف الحفاظ على محرك السيارة بسبب معرفتهم المسبقة بأن أي تأخير في عملية استبدال الزيت سوف تزيد من مخاطر تعطل المحرك بشكل مفاجئ أو تؤدي إلى جعل العمر التشغيلي للمحرك يتناقص وهو الأمر الذي يمثل بشكل ما جوهر "الصيانة الوقائية" التي تعتمد على الزمن أي أن عملية الصيانة بما تتضمنه من كلفة مادية وزمنية نفذت فقط لأنه حان الوقت لتنفيذها, ولكن من ناحية أخرى دعنا نفترض وجود منهج آخر لعملية استبدال الزيت تعتمد على تحليل مدى جودة الزيت بشكل مستمر ومدى قدرته على أداء وظيفته عندها وبكل بساطة يمكن أن نطيل فترة استخدام الزيت لمسافة 10000 كم وهو ما يمثل جوهر" الصيانة التنبؤية " [1] .

على الرغم من التقدم الحاصل في تقنيات الصيانة التنبؤية إلا أن الإحصائيات التي أجريت في السنوات الأخيرة تشير أن 30% من الصناعات لا تستفيد من هذه التقنيات وتعتبر الصيانة الوقائية هي الاستراتيجية المتبعة في باقي المنشآت ,ولكن هل يمكن نحصل على نفس النتائج في كلا الصيانتين ؟ تبين النتائج التي أجرتها شركة Emerson/Rosemount المتخصصة في إنتاج المقاييس الإلكترونية في العام 2007 على مجموعة من أجهزة الضغط والتدفق المستخدمة في صناعاتها بأنه لم يتم العثور على مشاكل فنية في 70% من الأجهزة الخاضعة للفحص باستخدام الصيانة الدورية الوقائية في حين ارتفعت النسبة إلى 90% باستخدام تقنيات الصيانة التنبؤية ,وهو ما يشير إلى أن الصيانة التنبؤية تزيد من كفاءة الصيانة و بالتالي تقليل مقدار الأعطال في الأنظمة الصناعية [22] .

يتناول الفصل التالي بشكل تفصيلي أكثر مفهوم الصيانة التنبؤية وذلك بداية من خلال تعريفها ومن ثم توضيح فائدتها والتطور الذي أصبحت عليه بعد مواكبتها للثورة الصناعية الرابعة .

2-2-1 تعريف الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance Definition

عرفت الصيانة التنبؤية بأنها تلك الصيانة التي يتم تنفيذها على الآلات المتوقع حدوث مشكلة فيها إما نتيجة تقدمها في العمر أو بسبب الظروف البيئية المحيطة بهدف تجنب حالات التوقف المفاجئ ضمن فترات التشغيل [23] .

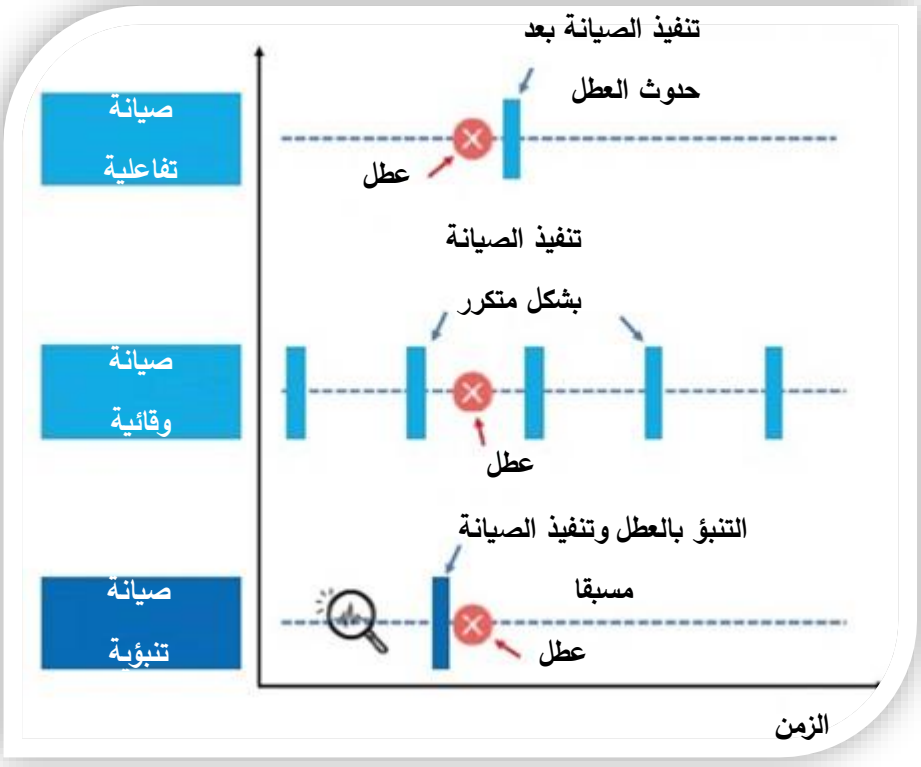
كما عرفت بأنها مزيج من النماذج الرياضية التي تساعد في تحديد وقت ظهور المشكلة ومتى يجب أن يتم تنفيذ إجراء الصيانة بهدف تحسين المفاضلة بين تكلفة الصيانة والأداء للآلة [24] .

ضمن ذات السياق يعبر عن الصيانة التنبؤية بأنها تلك الإجراءات التي تتخذ لمعرفة مستوى وسير عملية التدهور في النظام أي انخفاض مستوى الإنتاجية مما يسمح باستبعاد العوامل العرضية قبل حدوث أي تدهور كبير في حالة المكونات [1] .

على الرغم من اختلاف وجهات النظر في تعريف الصيانة التنبؤية تبعا لاختلاف الزاوية التي ينظر منها كل باحث إلا أن جميعها تتفق على النقاط التالية :

- التنبؤ هو الركيزة الأساسية للصيانة وهو الذي يميزها عن غيرها من باقي استراتيجيات الصيانة.
- لا يمكن أن نتنبأ بالأعطال من دون وجود آلية تقوم بالقراءة المستمرة والآنية لحالة الآلة و تشكل الحساسات بمختلف أنواعها حجر الأساس لتلك الآلية .
- الهدف الرئيسي للصيانة التنبؤية هو المحافظة على قدرة الآلة الإنتاجية ضمن أطول فترة زمنية ممكنة وبأقل التكاليف .

يبين الشكل (2-5) الاختلاف في منهجية العمل بين استراتيجيات الصيانة المختلفة (التفاعلية RM والوقائية PM و أخيرا التنبؤية PdM)



الشكل (2-5) الاختلاف بين استراتيجيات الصيانة RM,PM,PdM [25]

2-2-2 فوائد الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance Benefits

لعل خفض تكاليف الصيانة تعد من أهم الفوائد التي ركز عليها جميع الباحثين والشركات التي اتخذت من هذه الصيانة استراتيجية لها ضمن منشآتها .

فقد دلت الدراسات السابقة أن برنامج الصيانة التنبؤية الذي يعمل بشكل صحيح قادر على تحقيق توفير بنسبة 8% إلى 12% عن أي برنامج يستخدم الصيانة الوقائية وحدها ,ولكن يمكن القول أنه واعتمادا على التطورات الأخيرة الحاصلة في مفهوم الصيانة التنبؤية فإن تلك النسبة من التوفير ستتجاوز الـ 30% إلى 40% وذلك من خلال دراسة بعنوان (Operations & Maintenance Best Practicies,2002) تم نشرها من قبل وزارة الطاقة الأمريكية ,حيث أظهرت الدراسة أن متوسط الوفورات الصناعية الناتجة عن تطبيق الصيانة التنبؤية قد بلغت القيم التالية [25] :

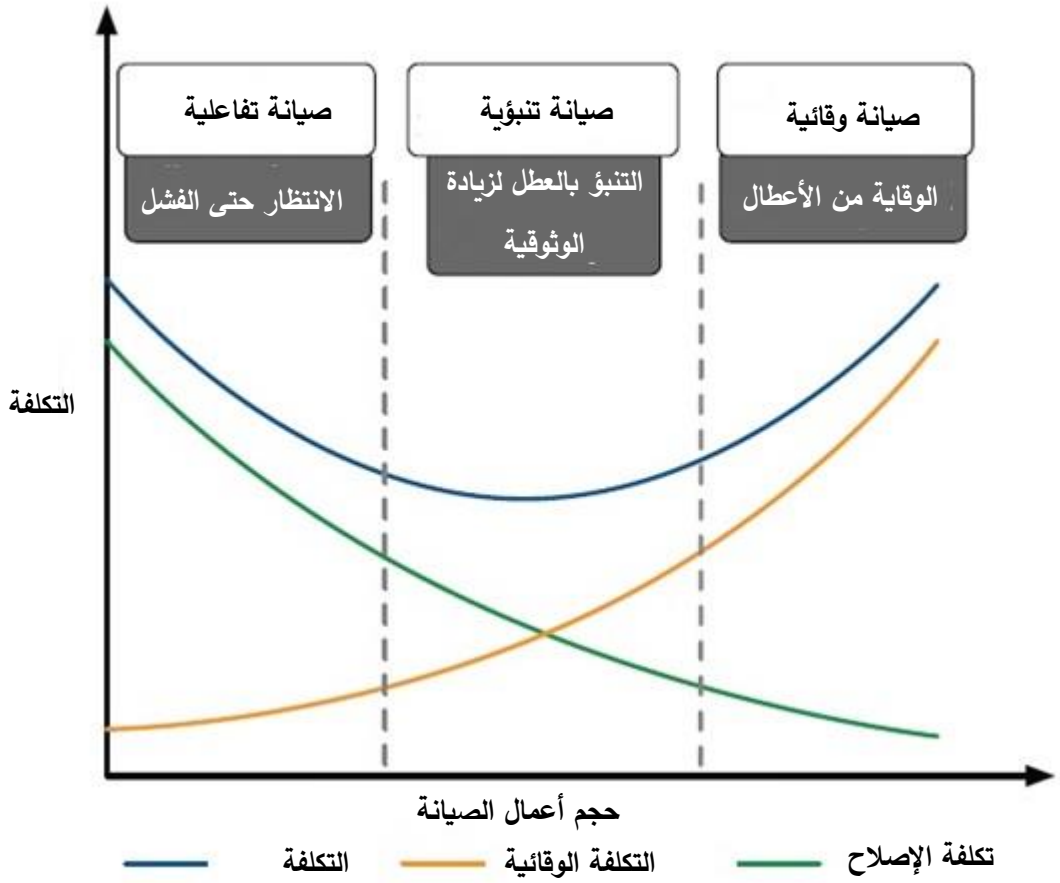
- العائد على الاستثمار : 10 مرات .
- تخفيض تكاليف الصيانة : من 25% إلى 30% .
- القضاء على الأعطال : 70% إلى 75% .
- تقليل وقت الأعطال : من 35% إلى 40% .
- زيادة الإنتاج : 20% إلى 25% .

ولكن كيف يمكن أن تؤثر الصيانة التنبؤية في خفض النفقات ؟

لفهم تلك العلاقة يمكن أن نستعين بالشكل التالي (2-6) والذي يوضح علاقة التكلفة Cost مع حجم أعمال الصيانة Maintenance Frequency Work,وموقع استراتيجيات الصيانة ضمنه .

يمكن أن نلاحظ من الشكل أن الصيانة التفاعلية RM تمتلك أقل قيمة للتكلفة الوقائية Prevention Cost كونها تعتمد في مفهومها على مبدأ التشغيل حتى الفشل Run-To-Failure وبالتالي ليست هنالك أي حاجة لصرف تكاليف على صيانة الآلة بل الانتظار حتى توقفها عن أداء وظيفتها ومن ثم العمل على صيانتها ولكن في المقابل فإنه في حال حدوث أي عطل في الآلة فإن تكلفة الإصلاح Repair Cost ستكون في أعلى مستوياتها بسبب الحاجة الشديدة عندئذ إلى استبدال بعض أجزاء الآلة أو حتى القيام باستبدال الآلة نفسها .

من ناحية ثانية فإن التكلفة المترتبة على إصلاح الآلة تكون قليلة في الصيانة الوقائية PM بسبب تطبيق منهجيتها في السعي المستمر وبشكل دوري للحيلولة دون تعطل الآلة أو توقفها عن العمل ولكن هذه الإجراءات المستخدمة مثل الفحص الدوري والاستبدال الوقائي ستزيد من أعباء التكلفة الوقائية [25].



الشكل (2-6) مقارنة بين أنواع الصيانة RM,PM,PdM من حيث التكلفة [25]

وبالتالي يمكن أن نستنتج أنه كلما خصصت الشركة مبالغ مالية أكبر وعمالة أكثر من أجل تنفيذ أعمال الصيانة الوقائية فإن ذلك سيؤدي إلى تقليص تكاليف الصيانة التفاعلية نتيجة انخفاض عدد حالات الأعطال مما يؤدي إلى انخفاض منحني التكلفة الكلية Total Cost حتى نقطة معينة يطلق عليها اسم النقطة المثالية Optimum Point وهي النقطة التي تمثل أدنى تكلفة كلية ليبدأ بعدها المنحني في الازدياد بسبب الزيادة في النفقات المهدورة على الصيانة الوقائية [1] .

ضمن هذه النقطة المثالية تتموضع الصيانة التنبؤية بمزاياها التي تجعلها تحقق أفضل مفاضلة بين تكلفة الإصلاح وتكلفة الوقاية عن طريق إحلال التوازن بين تخفيض تكرار الصيانة الوقائية ورفع مستوى الجاهزية والوثوقية للآلة دون تكبد أي تكاليف إضافية وهو ما يفسر مدى أهميتها الاقتصادية [25].

بالإضافة إلى ذلك تتمتع الصيانة التنبؤية بعدة فوائد أخرى مثل [1] :

- زيادة العمر التشغيلي للآلات ومكوناتها .
- تقليل وقت توقف الآلات والذي سيؤدي إلى توقف العمليات الإنتاجية .
- الانخفاض في تكاليف قطع الغيار والعمالة .
- جودة أفضل للمنتجات .

- تحسين سلامة العاملين والبيئة .
- توفير الطاقة .

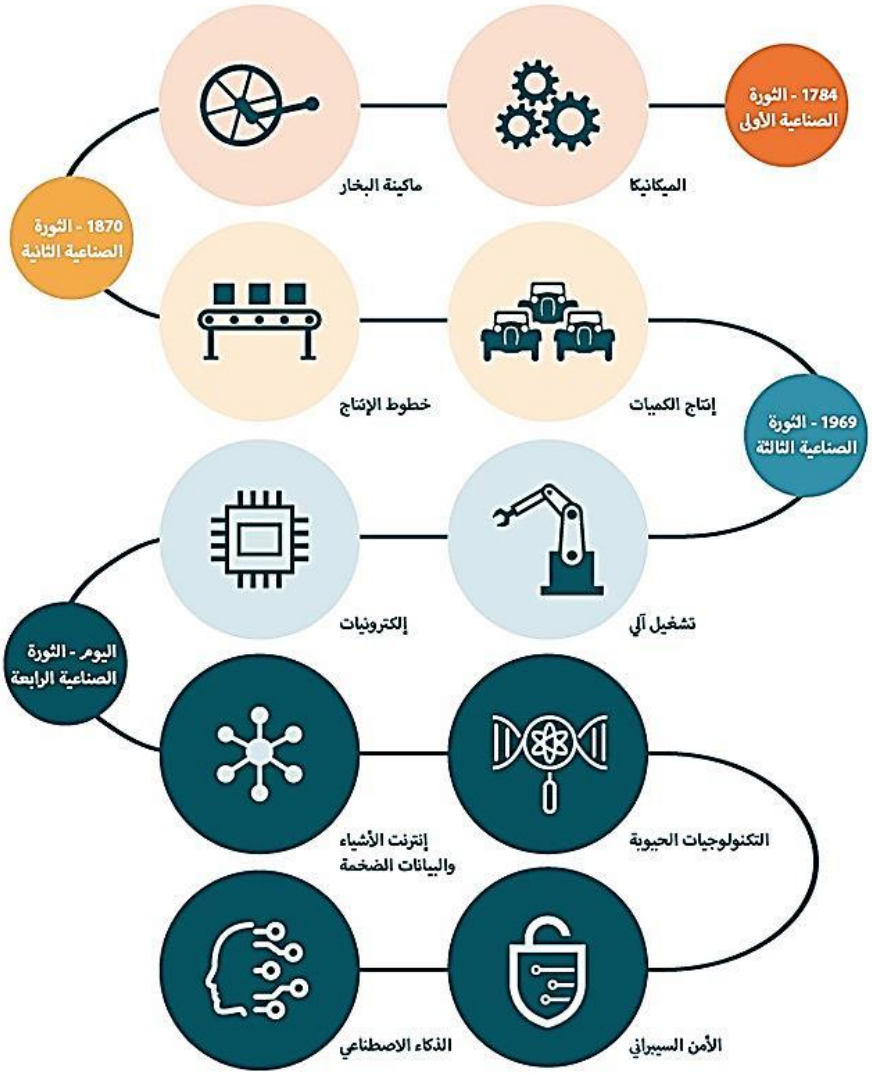
تعددت الشركات التي استطاعت الاستفادة من ميزات الصيانة التنبؤية المختلفة ونذكر فيما يلي بعضا من هذه الشركات :

- استفادت شركة VOLOV من نظام التحليل التنبؤي لشركة IBM في تحليل بيانات كل من السيارات الشخصية والشاحنات عبر شبكة الإنترنيت للتنبؤ باقتراب فشل السيارة أو أحد مكوناتها حيث استطاعت VOLVO من خلال هذه التقنية تقليل وقت تشخيص العطل بنسبة 70% و تخفيض زمن الإصلاح بنسبة 20% [27].
- شركة Infrabel المسؤولة عن البنية التحتية للسكك الحديدية في بلجيكا تعتبر من أكثر وأهم الشركات التي استطاعت تحقيق قفزة نوعية بانتقالها إلى تطبيق الصيانة التنبؤية ,حيث تنفق الشركة ما يقارب مليار يورو سنويا على إدارة الصيانة وتطوير البنى التحتية التي تشمل أكثر من 3600 كم من الخطوط الحديدية يعمل عليها أكثر من 4200 قطار كل يوم ,فبالإضافة إلى المنفعة الاقتصادية التي حققتها الشركة باستخدام تقنيات الصيانة التنبؤية استطاعت الشركة أن تحقق السلامة والأمان لموظفيها الذين كانوا يعتمدون على الفحص والتفتيش المرئي على كامل طول السكك الحديدية بما يتضمنه ذلك من مخاطر خاصة ضمن الأنفاق والجسور لتتطور هذه العملية إلى استخدام الحساسات وأجهزة التصوير الحراري أضف إلى ذلك تقليل حالات التوقف المفاجئ للقطارات وما يمكن أن تتسبب به من سمعة سيئة للشركة وتعطيل لأعمال الركاب الذين يتجاوزون الـ 800 ألف راكب يوميا [28] .
- تعمل شركة Sandvik Mining and Rock Technology على تحسين إنتاجية وسلامة عمليات التنقيب والحفر من خلال تحسين كفاءة وجودة الصيانة وخاصة للآلات المستخدمة في التنقيب والتي سيؤدي تعطلها أو توقفها عن العمل إلى تباطؤ العملية الإنتاجية بشكل كبير أو توقفها نهائيا لذلك سعت الشركة إلى التعاون مع شركة IBM في مجال الصيانة التنبؤية من خلال الاستفادة من منصة شركة IBM السحابية التي تستقبل البيانات وتحللها باستخدام تقنية الـ IoT وتمكنت الشركة من تقليل وقت تعطل إنتاج المناجم بنسبة تصل إلى 30% الأمر الذي أدى إلى انخفاض التكلفة بنسبة 50% لكل طن منتج من المواد الخام [29] .

2-2-3 الصيانة التنبؤية والثورة الصناعية الرابعة PdM 4.0

الثورة الصناعية الرابعة Industrial Revolution 4.0 أو ما يطلق عليها اختصارا (4IR) تمثل الموجة الصناعية الجديدة وآخر حلقة من سلسلة الثورات الصناعية والتي لا تزال مستمرة حتى وقتنا الحالي كما يوضح الشكل (2-7) .

تعتبر التكنولوجيا الناشئة المحرك الرئيسي لهذه الثورة التي استطاعت اختراق مختلف المجالات مثل الروبوتات , الذكاء الصناعي , إنترنيت الأشياء , تكنولوجيا النانو , الطباعة الثلاثية الأبعاد , وغيرها الكثير من المجالات التقنية والحيوية مما دفع بكلاوس شواب Klaus Schwab المؤسس والرئيس التنفيذي لمنتدى دافوس الاقتصادي بأن يعبر عنها بقوله " **إن حجم التحول ونطاقة وتعقيداته سيكون مختلفا عما شهدته البشرية من قبل** " وذلك في إشارة منه إلى قدرة الثورة الجديدة على التغلغل في مختلف تفاصيل حياتنا وعدم اكتفائها فقط بالنواحي الصناعية .



الشكل (2-7) الثورات الصناعية

لم تكن الصيانة التنبؤية بمعزل عن آثار الثورة الصناعية الرابعة فقد استخدمت تقنيات مثل إنترنيت الأشياء IoT ,التنقيب في البيانات Data Mining ,والبيانات الضخمة Big Data في تطوير وتحسين مفهوم الصيانة التنبؤية من خلال استخدام الآلات والمعدات لهذه التقنيات ضمن ما بات يعرف بالآلات الذكية Smart Machines التي تعتمد على مبادئ الذكاء الصناعي وتعلم الآلة Machine Learning بهدف جعل الآلة أو المنشأة أكثر ذكاء .لكن كلمة ذكاء هنا لا تعني فقط تحسين إدارة الإنتاج بل كذلك التقليل من وقت تعطل الآلات ومحاولة الآلة صيانة نفسها بنفسها ذاتيا وفق خوارزميات محددة .هذا التحول في الصيانة التنبؤية PdM يعرف تحت اسم PdM4.0 ويعتبر المستوى الرابع من الصيانة التنبؤية [25] , [28] .

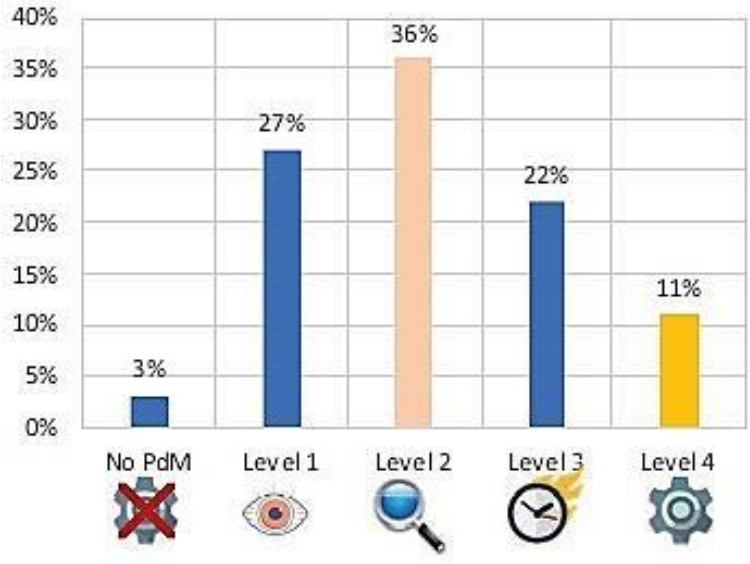
حيث تصنف استراتيجيات الصيانة التنبؤية إلى أربع مستويات وهي [25] :

- **المستوى الأول** Level 1 : (المراقبة المرئية Visual Inspections) تعتمد الصيانة على إجراء عمليات فحص متكررة على الآلات عن طريق الفحص المرئي مثل مشاهدة تسرب للزيت أو سماع صوت غير طبيعي لأحد المحركات وتستند الاستنتاجات هنا إلى خبرة الفنيين .
- **المستوى الثاني** Level2 : (مراقبة الأجهزة Instrument Inspections) يتم إجراء الصيانة الدورية على الآلات ولكن عملية الفحص هنا تستند إلى الفحص المرئي بالإضافة إلى قراءات أجهزة القياس المختلفة مثل مقاييس الأمبير التي يمكن أن نستدل منها على زيادة في كمية التيار الذي يستجره المحرك مما يدل على بداية حدوث خلل في هذا المحرك .
- **المستوى الثالث** Level3 : (مراقبة الحالة في الوقت الحقيقي Real-Time Condition Inspections) يرتكز على المراقبة المستمرة للآلة باستخدام تقنيات وحساسات مختلفة وإرسال التنبيهات بناء على قواعد ومستويات حرجة محددة مسبقا مثل مراقبة اهتزازات الآلة.
- **المستوى الرابع** Level 4 :(PdM 4.0) الذي يقوم بإجراء المراقبة المستمرة على الآلة وإرسال التنبيهات بناء على خوارزميات التنبؤ التي تستمد بياناتها عبر إنترنيت الأشياء .

ولكن ما هو مستوى الصيانة الذي تتبعه الشركات حاليا ؟

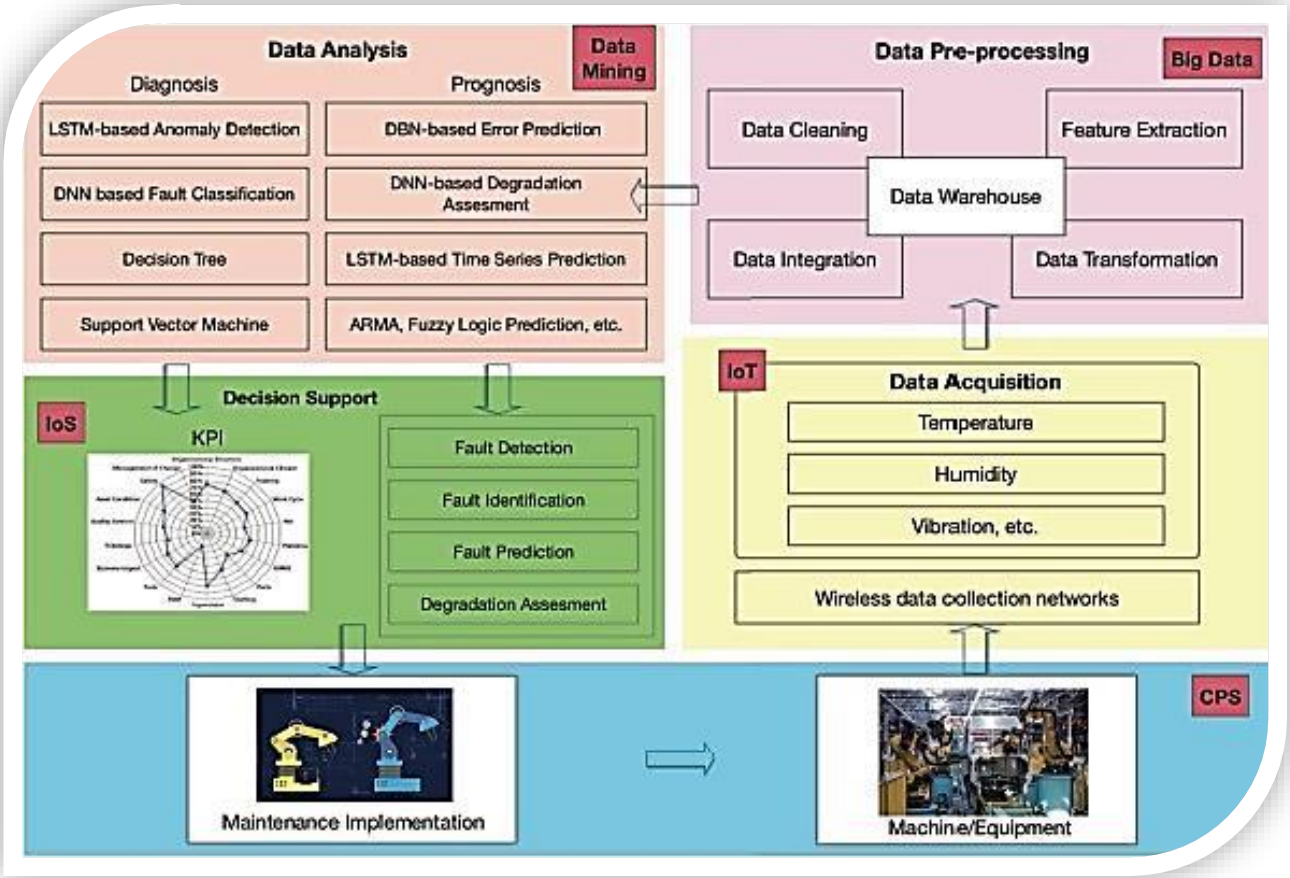
في دراسة إحصائية نشرت في العام 2019 أظهرت هذه الدراسة أن ثلثي الشركات التي تم معاينتها لا تزال دون المستوى الثالث وأن حوالي 11% فقط من الشركات قد وصلوا بالفعل إلى المستوى الرابع [25].

يبين الشكل (2-8) المخطط البياني لهذه النتائج



الشكل (2-8) مستوى النضج في استخدام الصيانة التنبؤية [25]

ولتوضيح طريقة عمل الـ PdM4.0 لابد من الدخول في تفاصيل البنية الهيكلية لها حيث يمثل الشكل (2-9) بنية ومكونات الـ PdM4.0



الشكل (2-9) البنية الهيكلية لـ PdM4.0 [25]

يمكن تجزئة البنية الهيكلية إلى الطبقات التالية [25] , [30] :

- إنترنيت الأشياء Internet Of Things (IoT) : يؤمن الـ IoT الوصول إلى جميع مكونات الآلة عبر شبكة الإنترنيت باستخدام مجموعة متنوعة من الحساسات وأجهزة التتبع والمراقبة .
- البيانات الضخمة Big Data : وتتضمن التقنيات المسؤولة عن إدارة البيانات وكيفية تخزينها ومعالجتها مثل عمليات التصفية والضغط والتحقق من صحة البيانات بالإضافة إلى استخراج الميزات .
- التنقيب في البيانات Data Mining (DM) : تهدف إلى تحليل واكتشاف الأنماط والقواعد من البيانات الضخمة التي تم جمعها من الطبقة السابقة وذلك بما يسمح باتخاذ القرار الصحيح في الوقت المناسب والمكان المناسب وفقا لنتيجة التحليل .
- إنترنيت الخدمات Internet Of Services (IoS) : توفر الـ IoS لمزودي خدمات الصيانة تقديم وظائف وتطبيقات الصيانة عبر شبكة الإنترنيت عن طريق مجموعة من البرمجيات ونماذج الأعمال والتي تغني المشتركين عن شراء المخدمات والبرمجيات والاكتفاء فقط بدفع قيمة الاشتراك بالخدمة ومن أشهر المزودين لهذه الخدمة IBM Cloud, Microsoft Azure, SIEMENS Mindsphere .
- النظم السيبرانية الفيزيائية Cyber-Physical Systems (CPS) : وتشير إلى الجيل الجديد من النظم ذات القدرات الفيزيائية والحاسوبية المتكاملة التي تمكنها من التفاعل مع البشر حيث تتشابك المكونات المادية والبرمجية بعمق لتمتلك القدرة على نقل العالم المادي إلى العالم الافتراضي .

تندمج الطبقات السابقة مع بعضها البعض وتتشابك لإنشاء نظام متكامل يفضي إلى تنفيذ الصيانة التنبؤية PdM4.0 وفق تسلسل من الأعمال المتتالية , ففي بداية الأمر تبدأ وظيفة النظام من وحدة " الحصول على البيانات Data Acquisition " والتي تقوم بجمع البيانات عن الحالة الحقيقية للآلة من مختلف الحساسات وأجهزة القياس ليتم إرسالها وتخزينها ضمن مستودع البيانات Data Warehouse حيث تخضع لعمليات الفلترة والتصفية واستنباط الميزات لتشكل هذه المخرجات الناتجة مدخلات لوحدة " تحليل البيانات Data Analysis " التي تقوم بتوليد المعرفة من خلال استخدام تحليلات البيانات المتقدمة وتمرر هذه المعرفة إلى وحدة " دعم القرار Decision Support " لعرضها بشكل مرئي وتوفير خطوات الصيانة المحسنة , أخيرا تتفاعل وحدة " تنفيذ الصيانة Maintenance Implementation " مع العالم المادي وفقا

لقرار الصيانة لتنفذ أنشطة الصيانة المحددة [25] .من بين تلك المراحل تعتبر مرحلة الحصول على البيانات من أهم المراحل والتي تنفذ باستخدام تقنيات مخصصة نستعرضها في الفقرة التالية .

3-2 تقنيات الصيانة التنبؤية Predictive Maintenance Techniques

من خلال الفقرات السابقة من البحث يتبين لنا أنه لتنفيذ مفهوم الصيانة التنبؤية نحتاج وبشكل رئيسي إلى قراءة مستمرة وآنية لحالة الآلة حيث تشكل هذه القراءات الدائمة البيانات الحقيقية التي سيعتمد عليها في الكشف عن التباينات في أداء الآلة وقياس معدل التغير فيها من أجل التنبؤ بأدائها في المستقبل واتخاذ قرار الصيانة .

تتم عملية القراءة لحالة الآلة والبيئة المحيطة بها من خلال الحساسات Sensors بطيفها الواسع وأنواعها المختلفة, والتي تعمل على تحويل المقدار الفيزيائي إلى إشارة كهربائية ومنه إلى قيمة عددية مفهومة وقابلة للقراءة. تتنوع الحساسات من حيث طبيعة استخداماتها فهنالك على سبيل المثال حساسات الحرارة والضغط والتدفق بالإضافة إلى الحساسات التحريضية والضوئية وغيرها الكثير .

يقصد بتقنيات الصيانة التنبؤية تحديد الحساسات والأدوات التي يمكن أن تكون ذات فائدة في مجال الصيانة التنبؤية حيث نستعرض في هذه الفقرة أهمها وأكثرها شيوعا واستخداما .

2-3-1 حساسات الاهتزاز Vibration Sensors

فيزيائيا يعرف الاهتزاز Vibration على أنه حركة الجسم المرن ذهابا وإيابا وفي اتجاهات متعاكسة عن موضع السكون [35] . كهربائيا فإن الاهتزاز يدل عادة على حالة عمل المحرك حيث نلاحظ أن أغلب الفنيين يقومون بوضع أيديهم على المحركات أو الآلة للتأكد من وجود اهتزاز فيها وبالتالي يستدلون بذلك على أن المحرك في حالة عمل .

نستفيد من الاهتزاز أيضا في التنبؤ بالعطل فكثيرا ما يستشعر سائقو السيارات بالأعطال الميكانيكية من خلال احساسهم بوجود الاهتزاز في عجلة القيادة كذلك الأمر بالنسبة إلى حدوث ارتجاجات في أرضية السيارة والناتجة عن ارتخاء العادم [26] . يتشابه الأمر ايضا بالنسبة للآلات والمحركات الكهربائية فعادة ما تزداد مستويات الاهتزاز في تلك المعدات لتدل على حدوث عطل فيها أو اقترابها من نهاية دورة حياتها وبالتالي ضرورة إجراء عملية الصيانة قبل تفاقم العطل وتوقفها عن العمل نهائيا .

تتكون الآلة من عدد كبير من الأجزاء ويولد كل جزء منها نمطه الخاص والمميز من حيث مستوى الاهتزاز وهنا وبلا شك تصبح اللمسة البشرية غير فعالة في اكتشاف مدى الاهتزاز وقيمته لكل جزء

وبالتالي ظهرت الحاجة إلى ضرورة وجود حساسات تقوم بتحديد حجم الاهتزاز عبر تثبيتها على مختلف أجزاء الآلة .يوضح الشكل (2-10) بعضا من حساسات الاهتزاز واستخداماتها .

الشكل الخارجي لحساسات الاهتزاز

حساس اهتزاز مثبت على محرك

مجموعة من حساسات الاهتزاز مثبتة على آلة

شاشة محلل اهتزاز

الشكل (2-10) حساسات الاهتزاز Vibration Sensors

عادة ما يستخدم محلل اهتزاز موصول مع الحساسات بهدف عرض قيم الاهتزازات وتحليلها بالإضافة إلى إمكانية وصل هذه الحساسات إلى أنظمة الـ PLC كما سنرى لاحقا .

يؤخذ على حساسات الاهتزاز حاجتها إلى الخبرة الفنية عند تثبيتها على المحركات كذلك يتوجب في حالة المحركات و الآلات الضخمة استخدام أكثر من حساس في مناطق مختلفة لقياس الاهتزاز في أكثر من نقطة وهو الأمر الذي سيزيد من تكلفة الصيانة .

ماديا تختلف كلفة حساس الاهتزاز بحسب النوع ومجال القياس كذلك أيضا في حال ضرورة وجود أدوات خاصة مثل أجهزة التحليل وبرمجياتها حيث تقدر تكلفة حساس الاهتزاز بـ 100 دولار من دون أية معدات

إضافية وترتفع التكلفة تدريجيا إلى 50000 دولار في حال وجود كافة الأدوات المستخدمة في القراءة والتحليل مثل محلل الاهتزاز والبرمجيات المرافقة وأجهزة الحاسب [26] .

لكن من ناحية أخرى يجب الأخذ بالاعتبار التوفير المكتسب عند استخدام هذه التقنية. فقد أدى تركيب منظومة اهتزاز على مضخة بقوة 200 حصان إلى تكاليف تقدر بأقل من 2700 دولار في حين أن استمرار العمل من دون استخدام المنظومة سيؤدي إلى تكلفة استبدال للمضخة بسبب تعطلها تتجاوز الـ 10000 دولار [26] .

تعتبر حساسات الاهتزاز من أكثر الأنواع المستخدمة في مجال الصيانة التنبؤية خاصة عندما يتعلق الأمر بأعطال المعدات الدوارة مثل عدم اتزان المحركات الكهربائية نتيجة عطل ميكانيكي لذلك سنخصص لها فقرة منفصلة كونها تعتبر التقنية التي سيتم استخدامها في الإطار العملي لهذا البحث.

2-3-2 التصوير الحراري Thermography

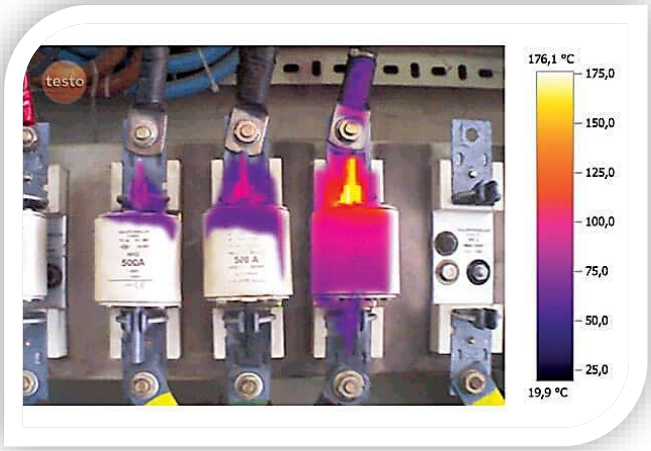
يقصد بالتصوير الحراري Thermography بأنه العملية التي يتم من خلالها إنتاج الصور الفوتوغرافية باستخدام حرارة الأشعة تحت الحمراء Infrared (IR) [31] .تسمى الصور الفوتوغرافية الناتجة بالصورة الحرارية Thermal Images ويتم الحصول عليها من خلال أداة خاصة يطلق عليها اسم الكاميرا تحت الحمراء Infrared Camera .

تعتمد تقنية التصوير الحراري على أن أي جسم ينبعث منه إشعاعات تحت حمراء غير مرئية للعين المجردة وذلك عند درجات الحرارة الأعلى من الصفر المطلق المكافئ لدرجة الحرارة 273- °c بما يتناسب مع درجة حرارته الحالية , وبالتالي يمكن إنتاج صورة بصرية ثنائية الأبعاد عاكسة لإشعاع الأشعة تحت الحمراء المنبعثة من الجسم [26] .حيث تقترب الأجزاء الأكثر سخونة من اللون الأحمر وتزداد باتجاه اللون الأبيض .يبين الشكل (2-11) جهاز الكاميرا تحت الحمراء وبعض الصور الحرارية الملتقطة لبعض التجهيزات الكهربائية .

تعمل تقنية التصوير الحراري على اكتشاف أية تغيرات في حرارة نقاط الآلة الناتجة عن حدوث عطل فني بحيث تتم معالجته قبل أن يحصل الفشل .على سبيل المثال يولد التيار الكهربائي ضمن لوحات التوزيع الكهربائية حرارة عالية إما بسبب ارتخاء التوصيلات أو اهترائها وتآكلها نتيجة قدمها ,وهنا تساعد الصورة الحرارية في اكتشاف هذا الخلل قبل أن يؤدي إلى عطل كهربائي أو اشتعال الحريق داخل اللوحات [26] . كذلك الأمر بالنسبة للمحركات الكهربائية والتي تزداد حرارتها بسبب الاحتكاك الناتج عن نقص لزوجة الزيت أو حدوث تسرب فيه .

في حالة الصيانة التنبؤية يعد تقرير الصور الحرارية وثيقة قيمة للغاية والتي ترتبط وفقا لذلك بوثائق أخرى من تقنيات الصيانة المختلفة [31] . بالإضافة إلى ضرورة وجود صور حرارية مرجعية خصوصا عندما يتم تشغيل الآلة في مراحل عمرها المبكرة بهدف مقارنتها مع باقي الصور التي يتم أخذها لاحقا وهو الأمر الذي يساعد في تحديد مكان الخلل .

صورة حرارية لقاطع كهربائي



صورة حرارية لمجموعة منصهرات ويظهر فيها خلل في توصيل إحداها

كاميرا حرارية تعمل بتقنية الأشعة تحت الحمراء

الشكل (2-11) تقنية التصوير الحراري Thermography

تظهر أهمية التصوير الحراري عند استخدامها في العديد من المعدات الكهربائية مثل اللوحات وعلب التوصيل والمحركات كذلك تعتبر ذات أهمية أيضا في المعدات الميكانيكية مثل صمامات البخار وأنظمة التبريد والتدفئة أما خارج المجال الصناعي فإن استخدام التصوير الحراري يعتبر ذو فائدة في مجال صيانة الأسقف للمباني والمعامل وغيرها من المنشآت المدنية وذلك عندما يتعلق الأمر باهتراء العوازل وما تسببه من تسرب للرطوبة والمياه .

تعتبر تقنية التصوير الحراري من التقنيات ذات التكلفة العالية حيث يتراوح سعر الكاميرات الحرارية بحسب نوعها والوظائف المختلفة التي تقدمها مثل التحليل و طباعة الصور من 12000 إلى 20000 دولار ,ويمكن أن يصل سعر الكاميرا ذات الوظائف الكاملة إلى 65000 دولار ,أضف إلى ذلك تكاليف أخرى مرتبطة بعمليات الصيانة مثل أجهزة الحاسوب والبرمجيات المطلوبة والطابعات الملونة كذلك تكلفة تدريب الفنيين على استخدام الجهاز وتحليل الصور [26] .

بحسب معظم الشركات الرائدة في تصنيع واستخدام تقنية الـ Thermography فإن فترة الاسترداد لتلك التكاليف تختلف من منشأة لأخرى اعتمادا على نوع المنشأة وحجمها فيمكن لمنشأة إنتاج كبيرة يكلف العطل والتوقف المفاجئ لديها آلاف الدولارات أن تحقق وفورات كبيرة عند استخدامها للتقنية أسرع بكثير من المنشآت الصغيرة وغالبا ما تتراوح وسطيا فترة الاسترداد خلال 12 شهرا أو أقل لذلك ينصح بالتعامل مع شركات خدمات الصيانة الخارجية والتعاقد معها في المنشآت الصغيرة كون التكلفة في هذه الحالة ستكون أقل وتتراوح بين 600 إلى 1200 دولار [26] .

ففي إحدى شركات التي تشكل المضخات عنصرا مهما في العملية الإنتاجية والتي كانت تعاني بشكل مستمر من أعطال في مضخات الدفع لديها أدت إلى تكاليف إصلاح قدرها 15000 دولار بالإضافة إلى تكاليف توقف الإنتاج قدرت بـ 600 دولار لكل دقيقة عمل و30000 دولار لكل دقيقة كخسارة في الإنتاج , تبين بعد استخدام تقنية التصوير الحراري أن رومانات المضخة السفلية أكثر حرارة من مثيلاتها العلوية ليتبين لاحقا أن المضخة صممت ليتم تركيبها بشكل أفقي في حين تم تركيبها عموديا في الشركة مما أدى إلى زيادة الضغط على الرومانات السفلية وبالتالي تلفها بشكل سريع قبل انقضاء عمرها التشغيلي [26] .

3-3-2 تحليل الاحتكاك Tribology

يعرف علم الاحتكاك على أنه العلم الذي يهتم بدراسة السطوح المتلامسة في حركتها النسبية و يعتبر الاحتكاك Friction , والتشحيم lubrication , والتآكل Wear من أبرز الجوانب التي يتعامل معها هذا العلم والتي بدورها تعتبر أساسية في أي نظام ميكانيكي أما آثارها السلبية فهي ذات تكاليف ضخمة في المنشآت الصناعية [32] .

حيث يؤثر الاحتكاك بشكل كبير على ميكانيكية الآلة ويؤدي في حال وجوده إلى توقف الآلة عن العمل ,أما تكاليف التشحيم فتشمل المشتريات لمواد التشحيم مثل الزيوت المعدنية بالإضافة إلى طرق تخزينها

وفلترتها والعمليات المتعلقة بحقن نقاط الاحتكاك في الآلة , من ناحية أخرى يعتبر التآكل الصفة الأساسية التي تنبأ بنهاية العمر التشغيلي للآلة وضرورة استبدال الأجزاء المتآكلة داخلها .

تتفاعل الجوانب الثلاث مع بعضها البعض في علاقة مترابطة لا يمكن فصلها وتكون مهمة برنامج علم الاحتكاك الناجح معالجة آثار العناصر الثلاث من منظور تكلفتها الإجمالية للمنشأة [32] .

تعتبر تقنية تحليل الزيت Oil Analysis من أهم تقنيات علم الاحتكاك وإحدى أكثر التقنيات استخداما في كافة استراتيجيات الصيانة والتي لاتزال مستخدمة إلى يومنا الحالي , فللأسف الشديد يقوم أغلب الفنيين ومسؤولي الصيانة في أي منشأة باستبدال الزيت القديم والتخلص منه دون الحاجة إلى تحليله على الرغم من أهمية ذلك في الدلالة على حالة الآلة والتنبؤ بوقت حدوث العطل.

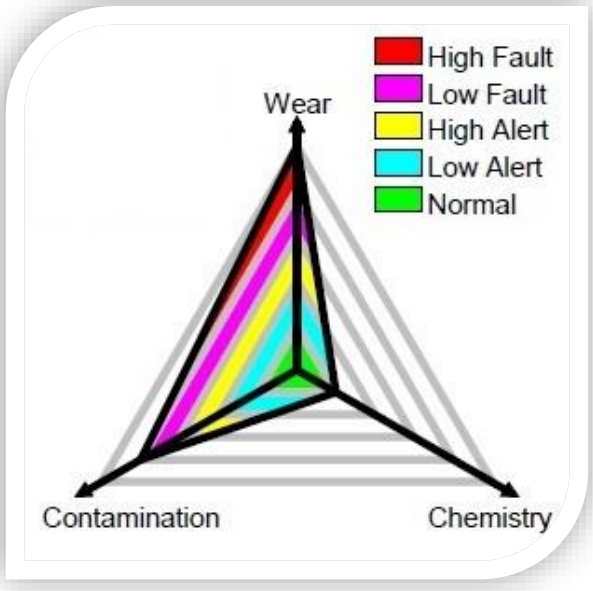
يمكن تشبيه تحليل الزيت للآلة بتحليل الدم للأغراض الطبية ففي كلا الحالتين يحتوي السائل على معلومات قيمة يمكن الكشف عنها من خلال الاختبار في بعض الأحيان يمكن لاختبار واحد أن يزودنا بكافة المعلومات المطلوبة ,وفي أحيان أخرى يلزم وجود مجموعة كاملة من الاختبارات .بعض هذه الاختبارات بسيطة وغير مكلفة وبعضها الآخر دقيقة وذات كلفة كبيرة .

يهدف تحليل الزيت والذي يتم على مواد التشحيم إلى الكشف عن كل من صحة الزيت الجديد أو المستعمل بالإضافة إلى سلامة الآلة فعندما يتم ملاحظة وجود أية تلوثات أو أجسام معدنية في الزيت الذي يتم تحليله يمكن أن نتنبأ بوجود مشكلة في الآلة وبالتالي اتخاذ الإجراءات الفورية لتصحيح السبب الجذري للعطل والعمل على عدم تطوره , كما يعد التحليل مؤشرا على الممارسات التشغيلية الغير الصحيحة من قبل مسؤولي التشغيل للآلة مثل التنظيف الخاطئ للآلة بالماء الذي يؤدي إلى دخول المياه إلى داخلها .يجزئ تحليل الزيت إلى ثلاث فئات رئيسية وهي [32] :

- الكيمياء Chemistry : يركز على تحليل الحالة الفيزيائية والكيميائية الحالية للزيت بالإضافة إلى تحديد العمر الإنتاجي المتبقي له وبالتالي التأكد من مناسبة الزيت الحالي للاستخدام وفيما إذا كان بحاجة إلى استبدال أو إضافة مواد أخرى .
- التلوث Contamination : بهدف التأكد من نظافة الزيت وخلوه من المواد الملوثة مثل الماء وعندها يتم البحث عن المسبب الذي أدى إلى ظهور التلوث وفيما إذا كان هنالك تسرب داخل الآلة كما هو الحال في السيارة عندما يتم اكتشاف عطل يؤدي إلى خلط الزيت مع الماء داخلها.
- التآكل Wear : يحدد هذا التحليل خلو الزيت من أية جسيمات ناتجة عن التآكل الميكانيكي أو أي تدهور أخر للأسطح الداخلية للآلة و يبين شدة التآكل ومدى خطورته .

تمثل فئات التحليل الثلاث ضمن مخطط قياسي باسم Trivector حيث يحدد من خلاله مدى جودة وصلاحية الزيت وتأثير ذلك على الآلة مع تحديد مستويات الإنذار لكل فئة كما يظهر الشكل (2-12) .

تقدم العديد من الشركات خدمات تحليل الزيت باستخدام مخابر متخصصة كما يمكن أن تمتلك أي منشأة مختبرا خاصا بها ليتم عندها التحليل في الموقع On-site وعليها عندئذ شراء المعدات الضرورية لأخذ العينات وتحليل الزيت .يوضح الشكل (2-13) نموذجا لجهاز تحليل الزيت MiniLab



الشكل (2-12) مخطط Trivector [32]

الشكل (2-13) جهاز MiniLab

طبعا في المقابل ستختلف الكلفة المادية بالنسبة للمنشأة فعادة ما يتراوح تكلفة التحليل لعينة واحدة لدى شركة خاصة بين 6 دولارات إلى 60 دولار اعتمادا على مستوى التحليل المطلوب , في حين أن تكلفة جهاز التحليل يمكن أن تتراوح بين 2500 إلى 20000 دولار تبعا لحجم ودقة الجهاز وعندها سيترتب على المنشأة تكاليف إضافية متعلقة بالبرمجيات والعمالة والتدرب على استخدام الجهاز [26] .

تحقق هذه التقنية وفورات كبيرة لدى الشركات فقد أظهرت الدراسات أن تحول الشركة من نهج الصيانة الوقائية في عملية استبدال الزيت لـ400 آلة بالاعتماد على الزمن إلى نهج الصيانة التنبؤية بالاعتماد على تحليل الزيت إلى توفير ما يقارب 54000 دولار سنويا . من المهم التذكير أن التوفير في التكلفة لا يشمل فقط تكاليف الصيانة بل أيضا تجنب الخسائر في تكاليف الإنتاج كما حدث في إحدى شركات التصنيع الكيميائي والتي استطاعت توفير 55000 دولار ككلفة توقف للإنتاج عندما أشار تحليل الزيت لضاغط الطرد المركزي إلى تلوثه بالمياه ووجود العديد من الجسيمات المعدنية واستطاعت إصلاحه قبل توقفه عن العمل بشكل تام [26] .

تستخدم تقنية الـ Tribology في أية آلة ميكانيكية تعتمد في استمراريتها على وجود مواد التشحيم داخلها مثل التور بينات وأنظمة التحكم الهيدروليكي وعلب السرعة .

2-3-4 تحليل الأمواج الفوق صوتية Ultrasonic Analysis

الأمواج الفوق صوتية Ultrasonic أو Ultrasound هي موجات صوتية تمتلك ترددات فوق حدود سمع الإنسان أي تردد يفوق قيمة 20 KHz .هذا يعني أن هذه الأمواج لا يمكن للأذن البشرية أن تسمعها إلا إذا استطاعت الاستعانة بأجهزة خاصة تكون قادرة على تحويلها إلى أصوات مسموعة [33] .

يحتوي كاشف الأمواج الفوق صوتية Ultrasonic Detector على مجموعة من المرشحات التي تقوم بفلترة الأمواج الفوق صوتية للتخلص من الموجات العشوائية التي تمثل الضجيج ومن ثم تحول تلك الأمواج الفوق صوتية كما يوضح الشكل (2-14) إما إلى أمواج يمكن سماعها من خلال السماعات المزودة مع الجهاز أو قياس طاقة الأمواج وعرضها على شاشة رقمية مع إمكانية تخزينها ضمن الجهاز ونقلها إلى أجهزة الحاسب .

الشكل (2-14) جهاز كاشف الأمواج الفوق صوتية

كما هو معروف ينتج الصوت عن اهتزاز الأجسام فهو ينبعث من الآلات الموسيقية من خلال النقر على الأوتار كما أن صوت الإنسان ما هو إلا اهتزاز في الأحبال الصوتية لديه .كذلك الأمر بالنسبة للآلات حيث تعكس الأمواج الفوق صوتية الصادرة عنها حالة الآلة فمثلا يزداد ضجيج الآلة في حال عدم وجود كمية كافية من الزيت الخاص بالتشحيم داخل الرومانات أو بسبب تآكل بعض أجزاءها ,من ناحية أخرى ينتج التسرب الحاصل في أنظمة الغاز والسوائل المضغوطة نتيجة وجود اهتراءات أو فتحات ضمن الأنابيب الناقلة أمواجا فوق صوتية غير مسموعة للإنسان .

تتيح لنا تقنية تحليل الأمواج الفوق صوتية سماع العلامات المبكرة لفشل الآلة من خلال تطبيقنا عدة طرق نذكر منها [33] :

- **مراقبة الاهتزازات الصوتية** Acoustic Vibration Monitoring : تستعمل خاصة في الكشف عن حالة الرومانات الدوارة في الآلة حيث أن هذه الكرات المعدنية المتدحرجة تنتج احتكاكا يصدر موجات فوق صوتية تختلف طاقتها بحسب حالتها الفنية , فالرومانات الجديدة والتي تكون بحالة جيدة تكون طاقتها الصوتية أقل من مقابلاتها التي تكون موجاتها ذات طاقة أعلى بسبب التآكل أو تدهور ونقص مادة التشحيم داخلها وبالتالي تتيح مراقبة الأمواج الفوق صوتية لنا تحديد فترات التشحيم المناسبة والتنبؤ عندما تدخل الرومانات مرحلة التآكل من بدايتها .يبين الشكل (2-15) جهاز قياس الاهتزازات الصوتية .
- **مسدس التشحيم** Grease Gun : تتغير طاقة الأمواج الفوق صوتية في الأجزاء الميكانيكية للآلة تبعا لحالة الزيت فتكون في أدنى مستوياتها عندما تكون طبقة التشحيم جيدة وتزداد تدريجيا مع زيادة التدهور الحاصل في تلك الطبقة فتزداد خشونة الصوت الصادر عنها .مسدس التشحيم هو جهاز يتم من خلاله ضخ مادة التشحيم داخل الأجزاء الميكانيكية للمحرك حيث يتم من خلاله التحكم بكمية المادة التي يتم حقنها في المحرك وذلك تجنبا لحدوث فشل في المحرك ناتج عن حقن كمية زائدة عن الحاجة من المادة. يزود المسدس بجهاز قياس الأمواج الفوق صوتية بحيث يسمح للعامل المسؤول عن عملية التشحيم بحقن المادة تدريجيا ومراقبة مستويات الصوت الصادرة عن الآلة ليتوقف عن العملية عند وصول المادة إلى المستوى المناسب دون إحداث أي ضرر في المحرك .يوضح الشكل (2-16) نموذجا عن مسدس التشحيم .

الشكل (2-15) جهاز قياس الاهتزازات الصوتية

الشكل (2-16) مسدس التشحيم

تتميز تقنية التحليل بالأمواج الفوق صوتية بان كلفتها تعتبر منخفضة نسبيا حيث تتراوح قيمة جهاز تحليل الأمواج بين 1000 إلى 12000 دولار كما أن كلفة التدريب على الجهاز ليست مرتفعة وهو الأمر الذي يؤدي إلى فترة استرداد تبلغ 6 أشهر أو أقل [26] .

تستخدم هذه التقنية ضمن مجالات صناعية كثيرة فبالإضافة إلى استخداماتها المتعددة في الأنظمة الميكانيكية مثل المضخات و المحركات والمراوح يمكن استخدامها في الأنظمة الكهربائية وخاصة عندما تتعلق الصيانة بأبراج التوتر العالي والقواطع الكهربائية الضخمة . إلا أن أحد أهم استخداماتها يكمن في أنظمة الضغط مثل المراجل البخارية وضواغط الهواء والأنابيب الناقلة حيث تشكل فتحات التسريب أحد أهم المشاكل التي يمكن أن تؤثر على الإنتاج . على سبيل المثال فقد عانت إحدى الشركات الصناعية من مشاكل متكررة في الهواء المضغوط وكان الافتراض القائم أن الضاغطين الموجودين في المصنع كانا في وضعية تشغيل لفترات طويلة و كان الحل الملائم هو شراء ضاغط ثالث بقيمة 50000 دولار , ولكن بدلا من ذلك ونتيجة استخدام تحليل الأمواج الفوق صوتية تبين وجود 64 تسربا للهواء وهو ما يشكل 26% من إجمالي سعة النظام , ولدى تنفيذ الشركة لأعمال ترميم تلك الفتحات المسؤولة عن التسريب استطاعت توفير 13000 دولار سنويا بالإضافة لتجنبها الاضطرار إلى إنفاق 50000 دولار نفقات شراء ضاغط جديد [26] .

4-2 نموذج استخدام الصيانة التنبؤية بالاعتماد على حساسات الاهتزاز

Predictive Maintenance Model Based on Motor Vibration

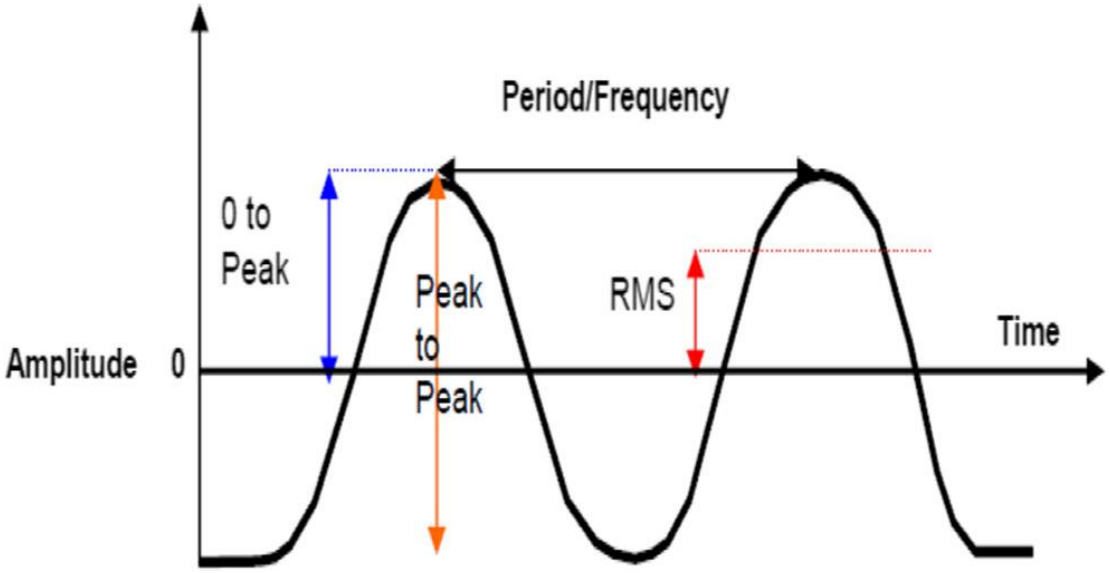
على الرغم من تعدد التقنيات التي تقوم بقراءة حالة الآلة تبقى تقنية تحليل الاهتزاز من أكثرها استخداما لعدة أسباب دفعتنا إلى اعتمادها كمرتكز رئيسي في هذا البحث من أهم هذه الأسباب :

- سهولة الربط بين حساسات الاهتزاز مع أنظمة التحكم الآلي المبرمج PLC مما يساهم في أتمتة عملية الصيانة التنبؤية ,وعندها لا يكون هنالك حاجة لتدخل العنصر البشري في اتخاذ قرار الصيانة حيث يقوم نظام التحكم بالمراقبة الدائمة والمستمرة لقراءات الاهتزاز وعند وصولها لمستوى معين يقوم تلقائيا بإرسال رسائل التحذير.
- تتناسب البيانات المرسلة من قبل حساسات الاهتزاز مع تقنية إنترنيت الأشياء فهذه البيانات تعتبر ذات حجم ضئيل مقارنة مع البيانات الموجودة في التقنيات الأخرى مثل صور الكاميرات الحرارية وبالتالي فإن عملية معالجتها و اتخاذ القرار المناسب من مزودي خدمات الصيانة عبر الإنترنيت سيكون أقل كلفة وحجما وأكثر سرعة وكفاءة من التقنيات الأخرى .

- من بين جميع التقنيات التي عرضنها في الفقرة السابقة يعتبر نموذج حساسات الاهتزاز مع أنظمة الـ PLC أقلها كلفة عبر الاستغناء عن تلك التكاليف المرتبطة بتدريب العاملين على برمجيات تحليل الاهتزاز التي يمكن أن تكون معقدة بعض الشيء

لكن كيف يمكن لحساسات الاهتزاز أن تقرأ حالة الآلة وتتنبأ بالأعطال؟ لمعرفة ذلك لابد لنا في البداية من إلقاء نظرة قريبة بعض الشي على طبيعة موجة الاهتزاز وخصائصها.

يعتبر الاهتزاز حركة متكررة بشكل دوري وبالتالي فإنه يمكن أن نمثلها على شكل موجة دورية .يوضح الشكل (2-17) شكل موجة الاهتزاز وخصائصها [34] .



الشكل (2-17) موجة الاهتزاز [34]

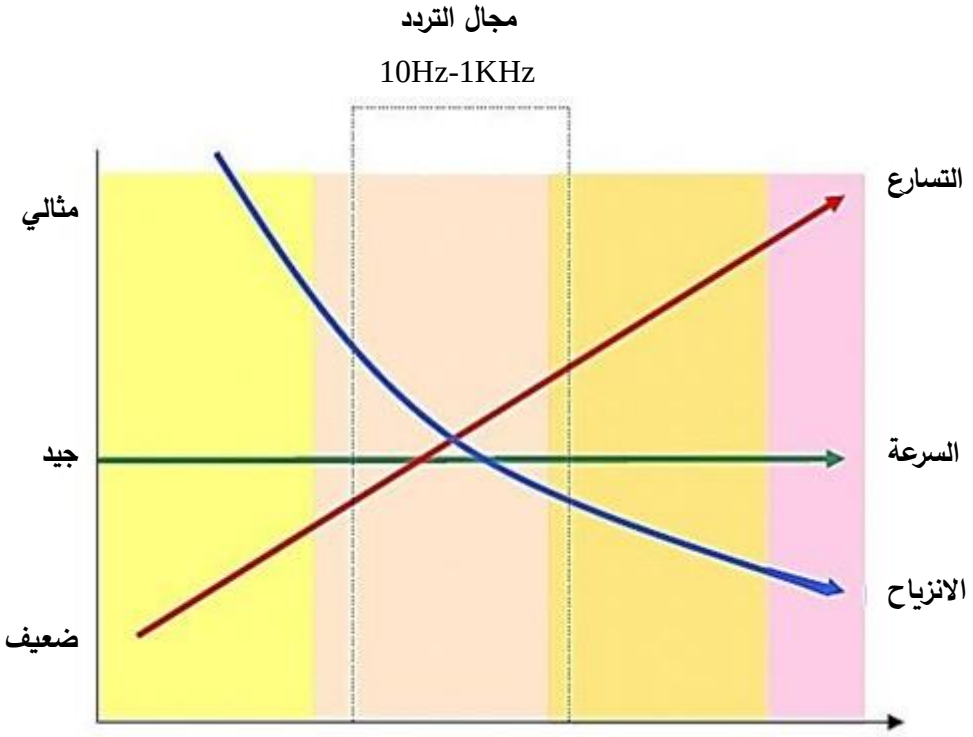
من الشكل السابق نلاحظ أنه يمكن أن نحدد خصائص الموجة من خلال المصطلحات التالية [35] :

- **قمة الموجة** Top : أقصى ارتفاع تصله الموجة Peak في الجزء الموجب أي أعلى خط الزمن.
- **قاع الموجة** Bottom : أقصى ارتفاع تصله الموجة في الجزء السالب أي أسفل خط الزمن .
- **الدورة** Cycle: المسافة إما بين قمتين متتاليتين أو بين قاعين متاليين وبالتالي فإن الدورة الواحدة One Cycle للموجة لها قمة واحدة وقاع واحد .
- **المطال/السعة** Amplitude : ارتفاع قمة الموجة فوق الخط المرجعي Time Line ويعتبر كمؤشر نسبي لكمية الطاقة التي تحويها الموجة .
- **دور الموجة** Wave Period : الزمن بين قمتين متتاليتين ويقدر بالثانية Sec .

- **تردد الموجة** Frequency : عدد الموجات في الثانية الواحدة ويقدر بالهرتز Hz .
- **انزياح الاهتزاز (من القمة إلى القمة)** Vibration Displacement (Peak to Peak) : المسافة الكاملة المقطوعة للجسم المهتز من أقصى حد في الحركة إلى أقصى نقطة في الاتجاه الآخر وتقدر في واحدة القياس الدولية بالميكرون microns أو الميلي متر mm وفي نظام الواحدات البريطانية بالميلي إنش mils .
- **سرعة الاهتزاز (القمة)** Vibration Velocity (Peak) : عندما تتحرك كتلة ما بحركة اهتزازية , فإن سرعتها تكون تساوي الصفر عند الحدين (القمتين) بينما تكون السرعة في قيمتها العظمى لحظة مرورها في منطقة الصفر هذه القيمة العظمى للسرعة تدعى ذروة سرعة الاهتزاز Vibration Velocity Peak وتقاس بالميليمتر/ثانية mm/s أو إنش/ثانية Inches/s .
- **سرعة الاهتزاز** Vibration Velocity (rms) : اقترحت المنظمة الدولية للقياس ISO نظام قياس عالمي لسرعة الاهتزاز وهو متوسط الجذر التربيعي Root Mean Square (rms) لمجموع سرعات موجات الاهتزاز ,وتمثل سرعة الاهتزاز (rms) محتوى الطاقة في الاهتزاز في حين أن سرعة الاهتزاز (Peak) تمثل شدة الاهتزاز .حيث أن القيمة المرتفعة لسرعة الاهتزاز (rms) تكون أكثر ضررا من نفس المقدار من سرعة الاهتزاز (Peak).
- **تسارع الاهتزاز (القمة)** Vibration Acceleration (Peak) : معدل التغير في السرعة ويكون بقيمة أعظمية عند النهايتين الحديتين لموجة الاهتزاز بينما تكون مساوية الصفر عند المرور بنقطة البداية .

توفر البارامترات السابقة (الانزياح , السرعة , التسارع) المعلومات المطلوبة لتوصيف حالة الاهتزاز في الآلة والتي يتم الاستعانة بها في تطبيق مفهوم الصيانة التنبؤية .حيث يتم تحديد البارامتر المناسب لمراقبته وذلك تبعا لتردد الاهتزاز المستخدم .يبين الشكل (2-18) العلاقة بين تردد الاهتزاز وأفضل بارامتر يمكن استخدامه ,ويمكن أن نلاحظ من الشكل أن أفضل الطرق لمراقبة الاهتزاز هي [34] :

- الانزياح : يستخدم في الترددات المنخفضة التي تقل عن 10 Hz وهي نادرة الاستخدام في مجال الآلات الصناعية وتستخدم عادة في مجال المباني والجسور لمراقبة اهتزازاتها .
- التسارع : يصبح التسارع مثاليا في مراقبة الآلات وذلك عندما تتجاوز ترددات الاهتزاز 1 KHz.
- السرعة : نحصل على معلومات جيدة من خلال مراقبة السرعة وذلك ضمن المجال من 10 Hz إلى 1 KHz وهو المجال المناسب والمثالي لمختلف المحركات الكهربائية .



الشكل (2-18) اختيار بارامتر الاهتزاز المناسب [34]

بالتالي وكما يوضح الشكل السابق فإننا سنعتمد في هذا البحث على بارامتر السرعة كونه يعتبر الأفضل والأكثر استخداما ضمن المحركات الكهربائية .

ولكن بعد أن حددنا البارامتر المناسب الذي سيستخدم في مراقبة الاهتزاز .ما هو المعيار المناسب الذي سيتم مقارنته مع سرعة الاهتزاز لتحديد الوقت المناسب لإجراء الصيانة ؟

تعتبر المواصفة ISO 2372 هي الأكثر استخداما كمؤشر لحالة الآلة والتي تم تطويرها لاحقا إلى المواصفة ISO 18016 [35] .

بحسب المواصفة ISO 18016 هنالك حد مقبول للاهتزاز يجب أن لا يتجاوزه المحرك لذلك فقد حددت المواصفة معيار الاهتزاز المناسب لكل محرك وذلك اعتمادا على بارامترين متغيرين وهما : استطاعة المحرك مقدرة بالكيلو واط KW وسرعة الاهتزاز مقدرة بإحدى الواحدتين القياسيتين مم/ثا mm/s و إنش/ثا In/s . قبل معرفة القيم المعيارية المناسبة لاهتزاز المحرك لابد في البداية من تصنيف الآلات بحسب استطاعتها إلى الأنواع التالية [35] :

- **الصنف الأول Class I** الآلات الصغيرة التي لا تتجاوز استطاعة المحرك فيها 15 KW.
- **الصنف الثاني Class II** الآلات المتوسطة الحجم والتي تتراوح استطاعة المحرك فيها بين 15 إلى 75 KW .

- **الصنف الثالث Class III** الآلات الضخمة التي تزيد استطاعة المحرك عن 75 KW وتكون مثبتة على قواعد صلبة .
- **الصنف الرابع Class IV** الآلات الضخمة التي تزيد استطاعة المحرك عن 75 KW وتكون مثبتة على قواعد مرنة .

يمثل الشكل (2-19) جدول المواصفة ISO 10816 .

تم تصنيف مستويات خطورة الاهتزازات Velocity Severity من خلال بارامتر سرعة الاهتزاز إلى أربعة مستويات : جيد (اللون الأخضر) , مرضي (اللون الأصفر) , غير مرضي (اللون البرتقالي) , و غير مقبول (اللون الأحمر) .

سرعة الاهتزاز		حدود سرعة الاهتزاز و تصنيف المحركات تبعا للمواصفة ISO 10816			
RMS mm/sec	Peak in/sec	الآلات الصغيرة Class I	الآلات المتوسطة Class II	الآلات الضخمة	
				قواعد صلبة Class III	قواعد مرنة Class IV
0.28	0.02	جيد	جيد	جيد	جيد
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	مرضي			
1.8	0.1		مرضي		
2.8	0.16	غير مرضي		مرضي	
4.5	0.25		غير مرضي		مرضي
7.1	0.4			غير مرضي	
11.2	0.62				غير مرضي
18	1				
28	1.56	غيرمقبول	غيرمقبول	غيرمقبول	غير مقبول
45	2.51				

المنطقة A

المنطقة B

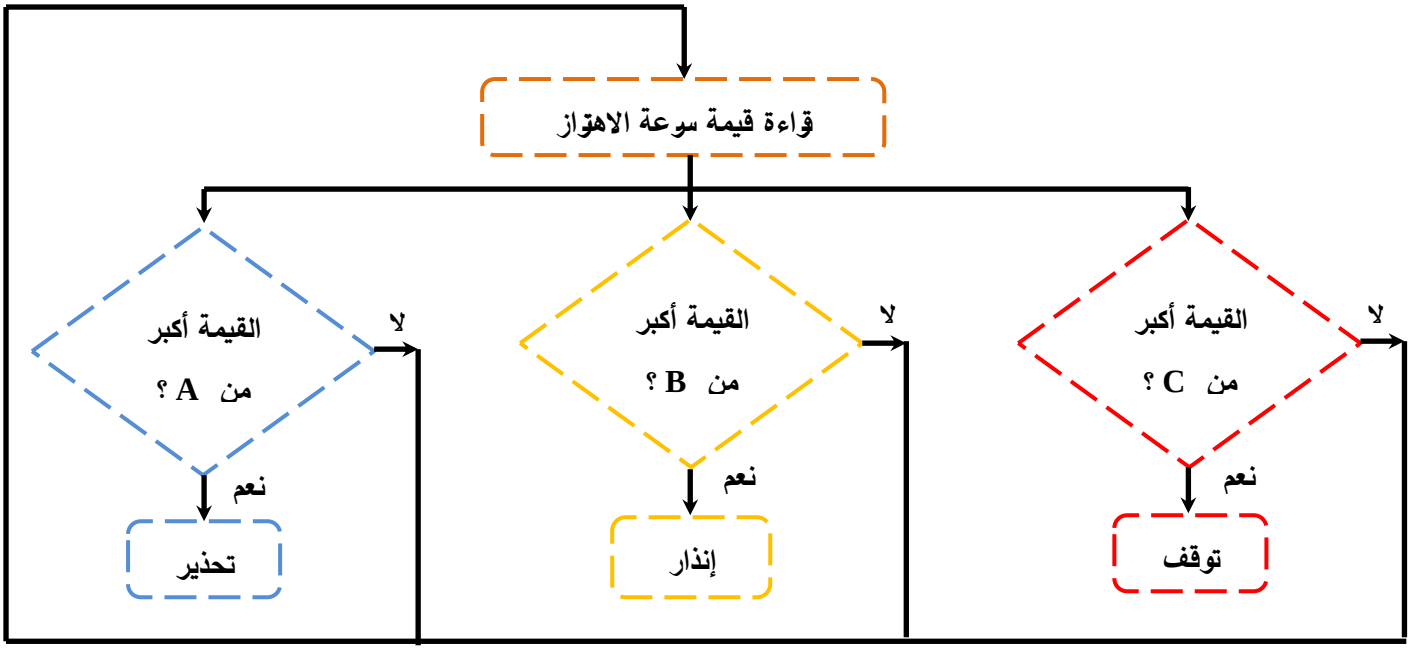
المنطقة C

الشكل (2-19) جدول المواصفة ISO 10816

للاستفادة من الجدول السابق في الصيانة التنبؤية تقسم سرعة الاهتزاز إلى 3 مناطق :

- المنطقة الأولى A : تقع على الحد الفاصل بين اللون الأصفر والبرتقالي .
- المنطقة الثانية B : تقع على الحد الفاصل بين اللون البرتقالي والأحمر .
- المنطقة الثالثة C : تقع داخل المنطقة الحمراء بنسبة 35% .

يمثل الشكل (2-20) مخططا لمنهجية استخدام الصيانة التنبؤية بالاعتماد على قياس سرعة الاهتزاز في الآلة وعلى التصنيفات السابقة وهي المنهجية التي ستتبع ضمن البحث.



الشكل (2-20) منهجية تطبيق الصيانة التنبؤية بالاعتماد على حساسات الاهتزاز

من الشكل نلاحظ في البداية أن عملية قراءة البيانات المتمثلة في سرعة اهتزاز المحرك أو الآلة هي عملية مستمرة ومتواصلة وفي كل مرة يتم فيها أخذ عينة من تلك البيانات تتم مقارنتها مع سرعات المناطق A,B,C وعندها نكون أمام ثلاث احتمالات :

- **الأول** : سرعة الاهتزاز تجاوزت المنطقة A أي أن الآلة في المراحل الأولى من بداية العطل وبالتالي يتم تحذير المسؤولين عن صيانة الآلة بضرورة اجراء الصيانة .
- **الثاني** : سرعة الاهتزاز تجاوزت المنطقة B وبالتالي فإن احتمال تعطل الآلة قد ازداد وعليه يتم رفع مستوى التحذير إلى درجة الإنذار .
- **الثالث** : مرحلة الخطر الحقيقي تبدأ عند تجاوز البيانات للمنطقة C وعندها يجب توقيف الآلة عن العمل قبل حدوث فشل في الآلة وإلحاق الضرر بالمنشأة .

وفق هذه المنهجية نكون قد حققنا مفهوم الصيانة التنبؤية بالاعتماد على الاهتزاز والتي يمكن أن نطبقها على محركات أية منشأة صناعية مع الأخذ بالاعتبار استطاعة تلك المحركات وبالتالي امتلاك القدرة على ضمان كل من استمرارية الإنتاج والتخفيف من النفقات الغير مبررة المهدورة على الصيانة .

أما بالنسبة للتقنيات والتجهيزات المستخدمة في عمليات قراءة البيانات وتحليلها واجراء المقارنات السابقة المعتمدة في هذا البحث فهو ما سنتطرق إليه ضمن الفصل التالي "الإطار العملي للمشروع ".

الفصل الثالث

الإطار العملي للمشروع

Chapter 3

Practice Framework of Research

بهدف الاستفادة من مفهوم الصيانة التنبؤية واعتمادا على نموذج هذه الصيانة باستخدام حساسات الاهتزاز التي تمت الإشارة إلى منهجيته ضمن الإطار النظري للمشروع يأتي الإطار العملي لهذا البحث كخطة تجريبية تهدف إلى اقتراح عدة حلول لمشاكل الصيانة وعيوبها ضمن مطحنة جبلة للحبوب وذلك بعد دراسة واقع الصيانة في هذه المنشأة وتقييمه ومناقشة ما يتضمنه من عيوب .

1-3 دراسة حالة الصيانة في مطحنة حبوب جبلة Maintenance Case Study in Jableh's Mill

تمثل مطاحن الحبوب إحدى أهم ركائز الاقتصاد السوري وتلامس الحياة المعيشية للمواطن السوري عبر تأمينها لقوته اليومي من مادة الخبز من خلال إنتاج مادة الطحين وتخزينها وتوزيعها على المخابز .

هذه الأهمية الكبيرة للمطاحن وتأثيرها المباشر على الأمن الغذائي وما يمكن أن تحدثه من ضرر نتيجة توقفها عن العمل لسبب ما دفعتنا إلى اختيارها لتكون موضوع الدراسة في هذا البحث .

تحتل مطحنة الشهيد أيمن بنيات (مطحنة جبلة) في محافظة اللاذقية الصدارة حاليا في إنتاج مادة الطحين بطاقة إنتاجية تصل إلى ما يقارب 425 طن طحين يوميا مع طاقة تخزينية تقارب الـ 70 ألف طن من القمح الذي يتم توزيعه على مختلف أفران محافظة اللاذقية بالإضافة إلى باقي المحافظات.

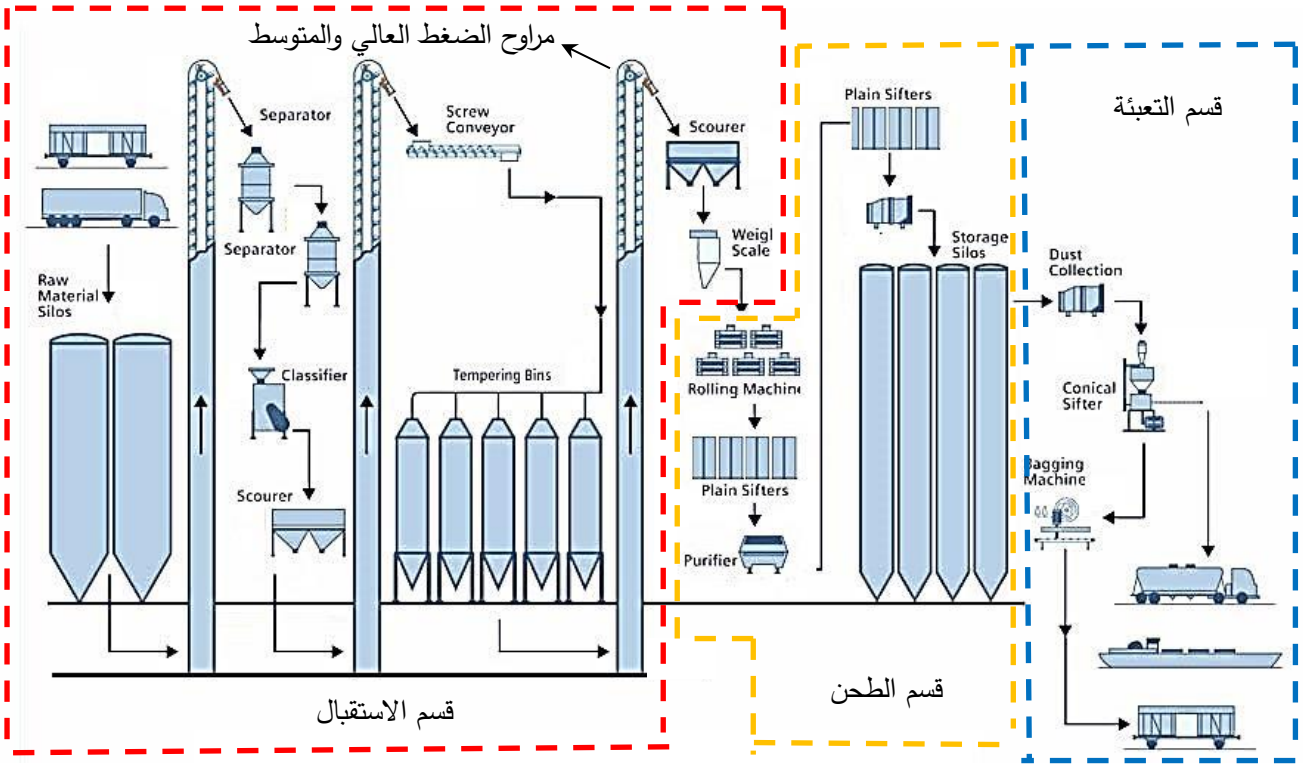
يتوجب علينا بداية لدراسة حالة الصيانة في مطحنة جبلة معرفة هيكلية وأقسام المطحنة .

1-1-3 الأقسام الهيكلية لمطحنة جبلة The Structural Sections of Jableh's Mill

تتكون المطحنة من ثلاث أقسام رئيسية :

- **<u>قسم الاستقبال (الصويل)</u>** يتم في هذا القسم استقبال القمح القادم من صوامع التخزين وذلك باستخدام محركات السيور ليصار إلى تنظيفه عبر مروره بعدة مراحل مثل الغربلة والمغناطيس بهدف تخليصه من الأجرام والشوائب كالحجارة والمعادن ومن ثم تمريره إلى المقاشر لينتج عن هذه العمليات قمح نظيف يتم إدخاله إلى عنابر خاصة لخلطه مع الماء بهدف ترطيبه وتخميره لعدة ساعات تعاد بعد ذلك مجموعة من مراحل التنظيف ليصبح القمح جاهزا للانتقال إلى القسم التالي .
- **<u>قسم الطحن</u>** تنفذ ضمنه عملية طحن القمح الناتج من المرحلة السابقة وذلك على عدة مراحل تتراوح بين 5 إلى 6 مراحل تضمن عمليات الجرش والتقشير والطحن الذي يتم باستخدام عدد كبير من آلات الطحن ينتج عن هذا القسم منتجات مختلفة مثل الطحين بدرجاته المتفاوتة بالإضافة إلى مادتي النخالة والسميد .

- **<u>قسم التعبئة</u>** يخزن الطحين الناتج من المرحلة السابقة في عنابر ومن ثم تتم تعبئته ضمن أكياس مخصصة وبأوزان محددة ضمن قسم التعبئة لينقل بعدها عبر السيور الناقلة إلى مستودعات التخزين .يوضح الشكل (3-1) مخطط عمل المطحنة بأقسامه



الشكل(3-1) مخطط عمل المطحنة

3-1-2 أنواع المحركات في المطحنة Mill's Motors Types

من خلال دراستنا لمطحنة جبلة تبين لنا أن هنالك العديد من المحركات الكهربائية التي تتولى مسؤولية تنفيذ العمليات في جميع الأقسام السابقة حيث يبلغ عدد المحركات في المطحنة ما يقارب الـ 400 محرك باستطاعات تتراوح بين 0.37 Kw إلى 55 Kw .

من بين المحركات المتواجدة تعتبر مراوح الضغط العالي 55Kw ومراوح الضغط المتوسط 45Kw من أهم المحركات كما أنها تعتبر نموذجا مناسبا لتنفيذ هذا البحث وتطبيقه على أرض الواقع للأسباب التالية :

- تتألف منظومة المراوح من محرك كهربائي بسرعة دوران تصل إلى 3000 دورة في الدقيقة بالإضافة إلى مروحة متصلة ميكانيكيا مع المحرك وهو ما يجعلها معرضة للكثير من المخاطر مثل عدم الاتزان و المحاذاة , والخلخلة الميكانيكية وهي المخاطر التي يمكن كشفها بسهولة باستخدام تقنية حساسات الاهتزاز.

الشكل(3-2) مراوح الضغط العالي

- تعتبر المراوح مسؤولة عن عملية سحب مادة القمح من أسفل المطحنة إلى أعلى نقطة فيها كما هو موضح في الشكل (3-1) بالإضافة إلى دورها الرئيسي في توزيع ونقل كل من مادة القمح والطحين عبر مختلف أقسام المطحنة وذلك باستخدام نظام السحب والدفع الهوائي مما سيؤدي إلى توقف كامل الإنتاج في حال تعطل هذه المراوح أي أنها تعتبر المراوح الشريان الرئيسي للمطحنة وبالتالي فإن تنفيذ منهجية التنبؤ بالأعطال عليها ستعود بالفائدة على إنتاج المطحنة

3-1-3 أساليب الصيانة في المطحنة Mill's Maintenance Methods

تبين لنا من خلال زيارتنا للمطحنة واللقاءات الميدانية مع المهندسين وعمال الصيانة في أقسام الكهرباء والميكانيك أن عملية الصيانة للمحركات تتم وفق أسلوبين بحسب حساسية وأهمية المحرك:

- المحركات الصغيرة والتي يكون تأثيرها على العملية الإنتاجية صغيرا مثل محركات السيور الناقلة لا تتم عملية الصيانة إلا بعد توقف المحرك عن العمل ليصار إلى فصله عن الخدمة واستبداله بمحرك آخر ريثما يتم إصلاح المحرك المعطل وذلك بما يماثل منهجية الصيانة التفاعلية RM .
- المحركات الكبيرة المؤثرة بشكل فاعل على الإنتاج مثل مراوح الضغط العالي والمتوسط وبهدف المحافظة عليها وتجنب توقفها المفاجئ يقوم الفنيون بجولات فحص متكررة على هذه المحركات وفحصها من خلال الاعتماد على حاسة اللمس للكشف عن وجود حرارة زائدة في جسم المحرك أو زيادة في اهتزاز المحرك كما تستخدم أيضا حاسة السمع للكشف بأساليب بدائية عن وجود ضجيج في تلك المحركات وبناء عليه يتم تقييم حالة المحرك وهو ما يندرج ضمن المستوى الأول للصيانة التنبؤية بالاعتماد على الفحص المرئي .

أما بالنسبة لعملية تشحيم علب السرعة والأجزاء الميكانيكية فتتم باستخدام مسدس تشحيم عادي طبعا في حال لوحظ بالعين البشرية وجود تسرب في الزيت حيث تتم عملية التشحيم مباشرة من دون معرفة أسباب ذلك التسرب .

يتشابه الأمر كذلك بالنسبة لصيانة القطع والتجهيزات الكهربائية المتواجدة ضمن لوحات التحكم والاستطاعة حيث تقوم فرق الصيانة إما باستبدال العناصر التالفة فور حدوث العطل طبعا في حال توفرها في مستودع القطع التبديلية أو الانتظار إلى أن يتم تأمينها من الأسواق المحلية أو الخارجية .

4-1-3 عيوب أساليب الصيانة الحالية Defects In Current Maintenance Methods

للأسف الشديد تتبع فرق الصيانة في المطحنة طرقا قديمة وبدائية تعتمد في غالبيتها على العنصر البشري للكشف عن الأعطال , وهذه الطرق لها العديد من النواحي السلبية نذكر بعضها منها في النقاط التالية:

- **عدم القدرة على تحديد العطل** : كثيرا ما يكون منشأ الأعطال التي تظهر على شكل حرارة زائدة في المحرك ناتجا إما عن عطل ميكانيكي مثل تآكل رومانات المحرك أو عن عطل كهربائي مثل وجود ضرر في كابلات التوصيل وبذلك لا يمكن للفنيين تحديد السبب الحقيقي للعطل إلا بعد وقت طويل وهو الأمر الذي سيؤدي إلى تأخر الإنتاج ريثما يتم الإصلاح .
- **احتمال توقف كامل الإنتاج** : وذلك نتيجة تراكم الأعطال وعدم معالجتها في الوقت المناسب أو عدم معالجة الأسباب التي أدت إليها وهو ما يمكن اعتباره كارثيا خاصة في حال تجاوز وقت الإصلاح للفترة الزمنية المسموحة التي تعتمد على مخزون الطحين في المستودعات .
- **الكلفة المرتفعة** : المتمثلة في هدر النفقات على شراء قطع تبديلية لكافة المحركات وتكديسها ضمن المستودعات دون أن تقتضي الحاجة على استخدام غالبيتها ,أضف على ذلك كلفة التوقف عن الإنتاج واستدعاء فنيين من خارج المطحنة بسبب صعوبة التعامل مع هذه النوعية من الأعطال. تظهر أيضا عيوب الكلفة الكبيرة جليا في قدرة مشتريات المطحنة على تأمين وشراء بعض هذه القطع من الأسواق الخارجية لأسباب متعددة تتعلق غالبيتها بعدم توفر هذه المواد أو ارتفاع أسعارها نتيجة قوانين الحظر الاقتصادي الجائرة المفروضة على بلدنا .

توفر الصيانة التنبؤية وفق الدراسات المرجعية التي شكلت ركيزة هذا البحث ملاذا آمنا لتجنب هذه المشاكل بالاعتماد على الحلول التي سيتم اقتراحها لاحقا .

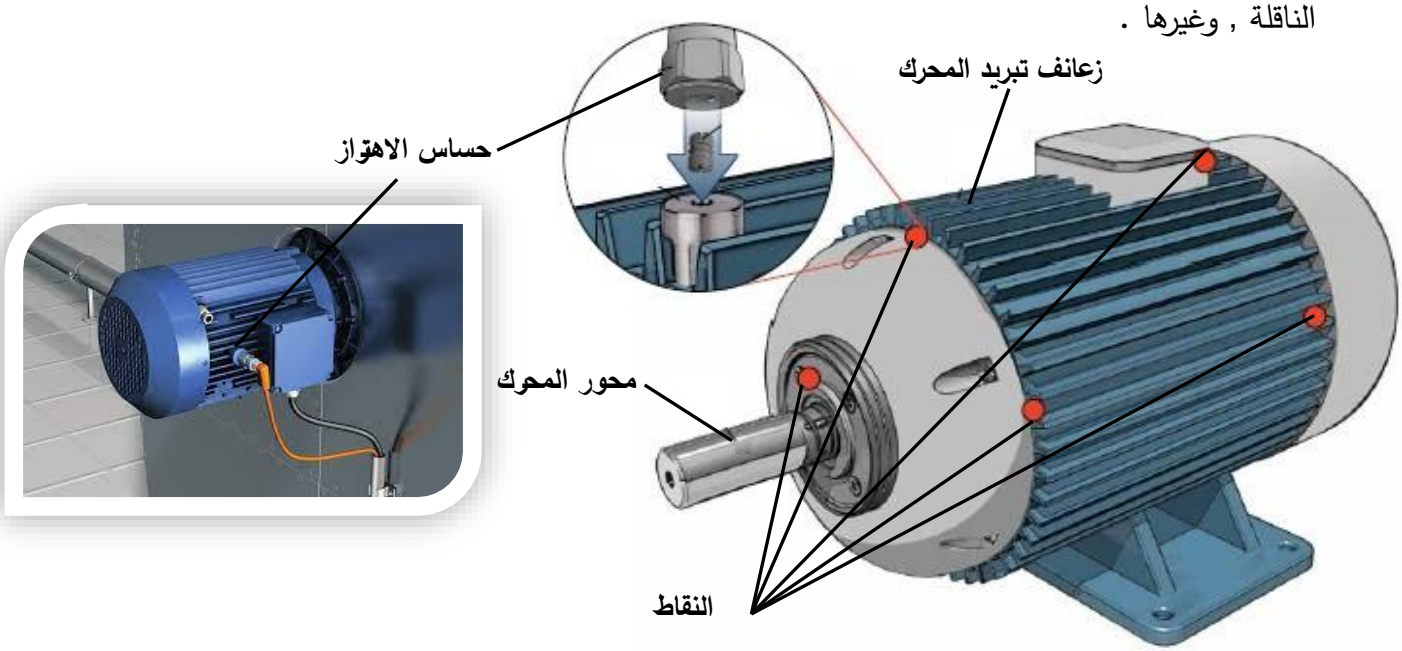
2-3 تصميم الحلول المناسبة باستخدام تقنيات الصيانة التنبؤية Designing The Solutions by Using Predictive Maintenance Techniques

يقترح هذا البحث الحلول المناسبة لمعالجة العيوب في أساليب الصيانة المتعلقة بالمحركات الكهربائية ضمن المطحنة أما بالنسبة لباقي الأساليب المستخدمة في المعدات الأخرى مثل اللوحات الكهربائية

وعمليات التشحيم فهنالك طرقا أخرى حديثة يمكن استخدامها تم ذكرها ضمن الإطار النظري للبحث مثل الكاميرات الحرارية ومسدس التشحيم وغيرها .حيث يستند الحل المقترح على استخدام تقنيات الاهتزاز في قراءة الحالة الحقيقية لمحركات المطحنة المختلفة ومن ثم تحليلها ومقارنتها مع القيم المعيارية وفق قواعد منهجية تطبيق الصيانة التنبؤية التي تم عرضها في الشكل (2-20) بالاعتماد على جدول القيم الخاص بالمواصفة ISO10816 المتمثل بالشكل (2-19) .

قبل البدء في عملية قراءة قيم اهتزازات المحرك يتوجب علينا بداية تحديد مواقع النقاط الواجب تثبيت حساسات الاهتزاز عليها بهدف الحصول على قراءة تكون أكثر موثوقية لقيم سرعة الاهتزاز.

توفر الشركات المصنعة لحساسات الاهتزاز عددا من النصائح ضمن دليل الاستخدام الخاص بها والتي تبين عن طريقها أفضل المواقع التي يمكن أن تثبيت رؤوس الحساسات عليها .يبين الشكل (3-3) النقاط المقترحة (الدائرة الحمراء) لتثبيت الحساسات وذلك وفق دليل الاستخدام الخاص بشركة IMI Sensors الرائدة في مجال تصنيع مختلف الحساسات. يتضمن الدليل كذلك العديد من الشروحات التي تبين أماكن تموضع الحساسات للعديد من المحركات المختلفة مثل المضخات , محركات آلات الطباعة ,السيور الناقلة , وغيرها .

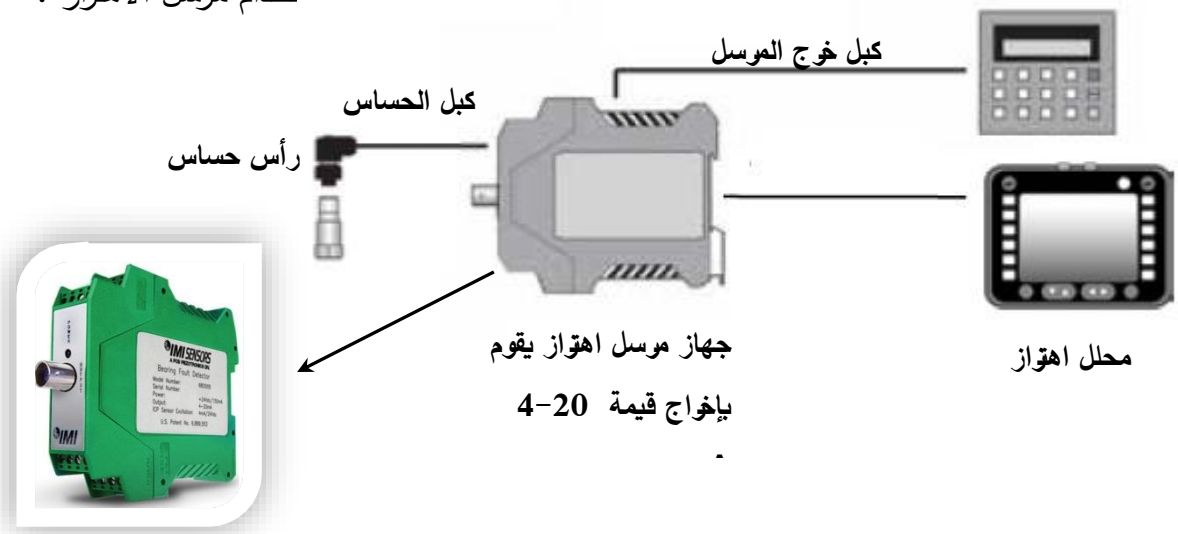


الشكل(3-3) تحديد نقاط التثبيت لحساسات الاهتزاز [36]

الخطوة التالية بعد تثبيت الحساسات هي وصلها مع المرسلات الخاصة بها Transmitter المسؤولة عن تحويل الإشارة الكهربائية الضعيفة نسبيا التي يولدها حساس الاهتزاز إلى إشارة كهربائية أقوى تتراوح

قيمتها من 4 إلى 20 ميلي أمبير mA وذلك بشكل يتناسب مع القيمة التي يولدها الحساس. يتم وصل إشارة خرج المرسل مع شاشات محللات الاهتزاز أو مع نظام الـ PLC كما سنرى في الفقرة التالية .

يوضح الشكل (3-4) عملية تحويل خرج حساس الاهتزاز الى إشارة كهربائية باستخدام مرسل الاهتزاز .



الشكل (3-4) جهاز مرسل الاهتزاز Vibration Transmitter [36]

عند الانتهاء من هذه المرحلة نكون قد حصلنا على قراءة حقيقية وموثوقة لسرعة اهتزاز المحرك ممثلة بإشارة كهربائية تتأرجح قيمتها ضمن المجال (4-20 mA) يمكن الاستفادة منها وتحليلها باستخدام عدة طرق سوف نقترحها في الفقرات التالية من هذا البحث .

1-2-3 باستخدام أنظمة التحكم المبرمج PLC

تعتبر أجهزة التحكم الآلي المبرمج Programmable Logic Controller (PLC) أحد أكثر التقنيات المستخدمة في أتمتة خطوط الإنتاج فهي تمتلك القدرة والسرعة الكافية على التعامل مع عدد كبير من الحساسات بالإضافة إلى السرعة في اتخاذ القرار المناسب الأمر الذي ينعكس جليا على سرعة الإنتاج. تطورت أجهزة الـ PLC عبر الزمن واستطاعت تحديث تقنياتها لتصبح ملائمة للتطور التقني خاصة في مجال الشبكات السلكية واللاسلكية وبالأخص شبكة الإنترنيت عبر العديد من التطبيقات والتعليمات .

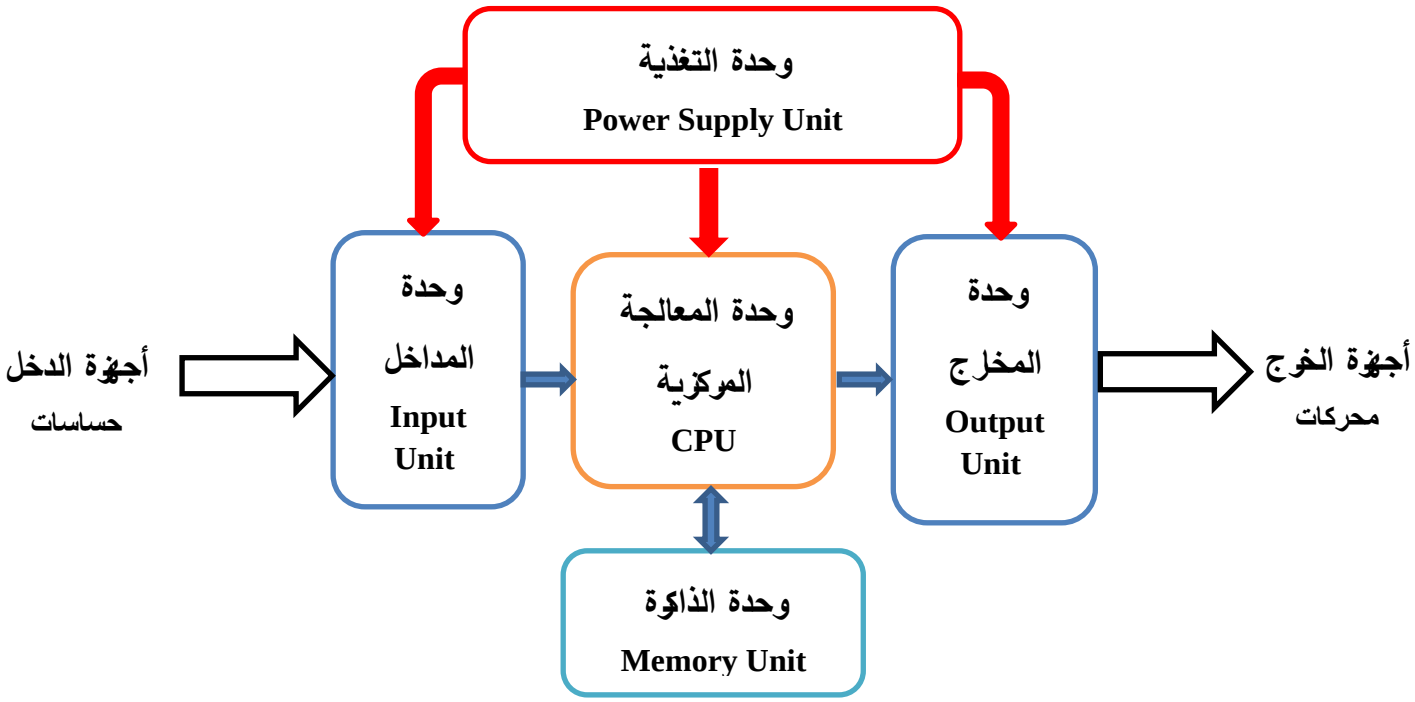
يشكل نظام الـ PLC العصب الرئيسي في هذا البحث من خلال قدرته على التنبؤ بأعطال المحركات باستخدام حساسات الاهتزاز لذلك لابد من إلقاء نظرة أكثر قربا على مكوناته ومبدأ عمله .

تتكون منظومة الـ PLC من المكونات التالية :

- **وحدة المداخل Input Unit** : تستقبل هذه الوحدة الإشارات القادمة من مختلف أجهزة الدخل مثل الحساسات والمفاتيح وتحولها إلى قيم عددية ومنطقية يمكن التعامل معها ضمن النظام.

- **وحدة المعالجة المركزية Central Processing Unit (CPU)** : تتعدد مهام هذه الوحدة فهي المسؤولة عن قراءة القيم الموجودة في وحدة المداخل بالإضافة إلى تنفيذ التعليمات الموجودة ضمن البرنامج المخزن في وحدة الذاكرة والذي ينتج عنه مجموعة من القرارات يتم تحويلها إلى أوامر ترسلها إلى وحدة المخارج .
- **وحدة المخارج Output Unit** : تقوم باستقبال الأوامر القادمة من وحدة المعالجة ومن ثم تحويلها إلى إشارات كهربائية يتم من خلالها التحكم بتشغيل وإيقاف مختلف المشغلات مثل المحركات , الصمامات , المصابيح , وغيرها .
- **وحدة الذاكرة Memory Unit** : على اختلاف أنواعها وطبيعتها تحتفظ وحدة الذاكرة بالبرنامج الذي يتم كتابته من قبل مبرمج النظام لتقوم بنقله إلى وحدة المعالجة عند بداية تشغيل النظام .
- **وحدة التغذية Power Supply Unit** : تعمل على تحويل الجهد المتناوب 220 فولت إلى مجموعة من الجهود المستمرة DC التي تستخدم في تغذية مكونات النظام .

يبين الشكل (3-5) مكونات نظام الـ PLC



الشكل(3-5) مكونات نظام الـ PLC

تعددت الشركات المنتجة لأجهزة الـ PLC مثل (SIEMENS , Moeller , Schneider , Delta) وغيرها الكثير من الشركات حيث تقوم كل شركة بإنتاج مجموعة متنوعة من أجهزة الـ PLC المختلفة في ما بينها بالمواصفات الفنية (سرعة المعالجة , عدد المداخل/المخارج , قابلية الاتصال , سهولة البرمجة ,..)

ويرتبط مدى تطور هذه المواصفات ارتباطا وثيقا بالكلفة المادية والتي تزداد كلما أصبحت المواصفات الفنية أكثر تطورا .

مما لاشك فيه أن الكلفة المادية تعتبر عاملا مهما في اختيار نظام الـ PLC حيث تتراوح أسعار وحدة المعالجة المركزية فقط بين 60 إلى 1000 دولار طبعا بالإضافة إلى التكاليف الأخرى المتمثلة في أسعار وحدات المداخل / المخارج و تكاليف البرمجة .لكن فنيا يتوجب على أي نظام PLC سيتم استخدامه في تطبيق مفهوم الصيانة التنبؤية أن يحقق الشروط التالية والتي لها تأثير أيضا على الكلفة المادية :

- **القدرة على التعامل مع الإشارات التشابهية Analog Signals :** تختلف الإشارة التشابهية في طبيعتها عن الإشارة الرقمية Digital , فهذه الأخيرة تتأرجح قيمتها بين حالتي التشغيل/الإيقاف ON/Off مثل الإشارة الكهربائية الناتجة عن الضواغط والمفاتيح والحساسات الضوئية وتمثل أيضا الإشارة التي يتم من خلالها التحكم بالمخارج الرقمية مثل المحركات والمصابيح .

في حين تمتلك الإشارة التشابهية قيمة كهربائية متغيرة ضمن مجال 4-20 mA تعبر عن القيمة الفيزيائية المقاسة من قبل الحساس مثل حساسات الحرارة والضغط وحساسات الاهتزاز . يتم وصل الإشارة التشابهية مع مداخل مخصصة لها في نظام الـ PLC تسمى المداخل التشابهية Analog Inputs (AI) حيث يتم حجز مدخل تشابهي واحد لكل حساس مقابل له.

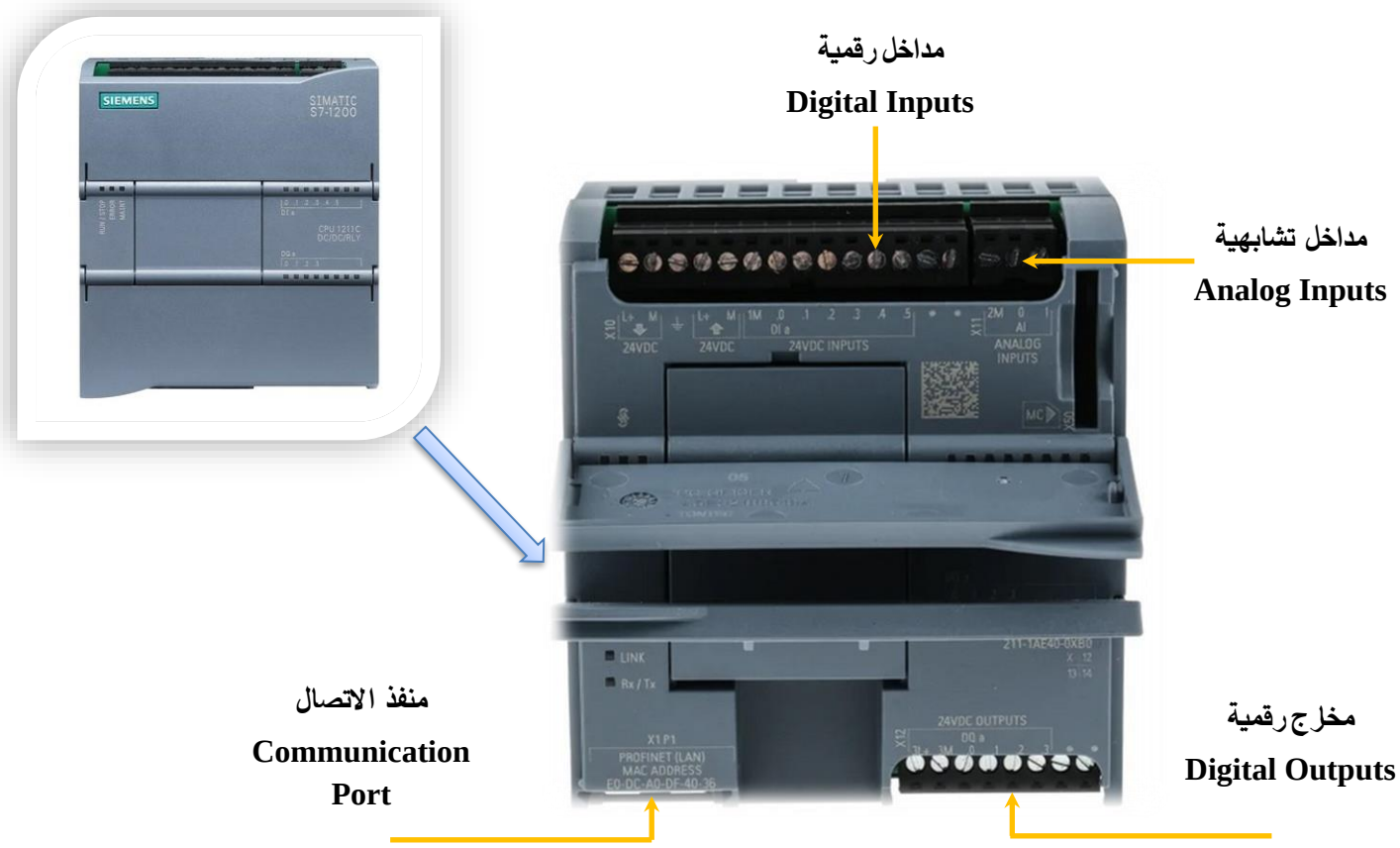
تتوفر المداخل التشابهية لبعض الشركات ضمن وحدة المعالجة المركزية وتكون مدمجة معها أو يمكن أن تتوفر على شكل كروت إلكترونية يتم تثبيتها وإضافتها على نظام الـ PLC .

- **القدرة على الاتصال مع شبكة الإنترنيت** : تعتبر الإنترنيت إحدى أهم ركائز الصيانة التنبؤية فعن طريقها سيتم إرسال الرسائل الإلكترونية إلى مشرفي الصيانة كما سيتم من خلالها الربط مع مخدمات الصيانة عبر تقنيات إنترنيت الأشياء . لذلك لابد لنظام الـ PLC المراد استخدامه أن يكون داعما لبروتوكولات الإنترنيت مثل TCP/IP التي تسمح للنظام بالدخول واستخدام الإنترنيت. تدعم أغلب منتجات الحديثة من أجهزة الـ PLC هذه البروتوكولات عبر منفذ شبكة يتم وصله مع التجهيزات الشبكية المختلفة ,في حين قد نحتاج في بعض الأنظمة إلى إضافة ميزة الاتصال من خلال كرت الكتروني تتم أيضا إضافته إلى النظام وهو الأمر الذي يمكن أن يزيد من كلفة النظام .

يقترح هذا البحث استخدام نظام PLC من إنتاج شركة SIEMENS الألمانية من النوع S7-1200 CPU 211C وذلك لعدة أسباب من أهمها [37] :

- سرعة التنفيذ المناسبة لوحدة المعالجة المركزية CPU 211C والتي تبلغ 0.08 µs لكل تعليمة .
- وجود 6 مداخل رقمية DI و 4 مخارج رقمية DQ مدمجة ضمن وحدة الـ CPU .
- تحتوي أيضا على مدخلين تشابهيين مدمجين 2 AI الأمر الذي يوفر علينا تكلفة شراء كروت إضافية لزوم المداخل التشابهية .
- منفذ اتصال مدمج يدعم البروتوكولات TCP/IP , SNMP واللذان يعتبران أساسيان في اتصال النظام مع شبكة الإنترنيت وإرسال رسائل الـ E-mail
- الكلفة المنخفضة حيث يصل سعر وحدة الـ CPU متضمنة جميع المواصفات إلى 100 دولار .

يبين الشكل(3-6) وحدة المعالجة SIEMENS CPU211C .



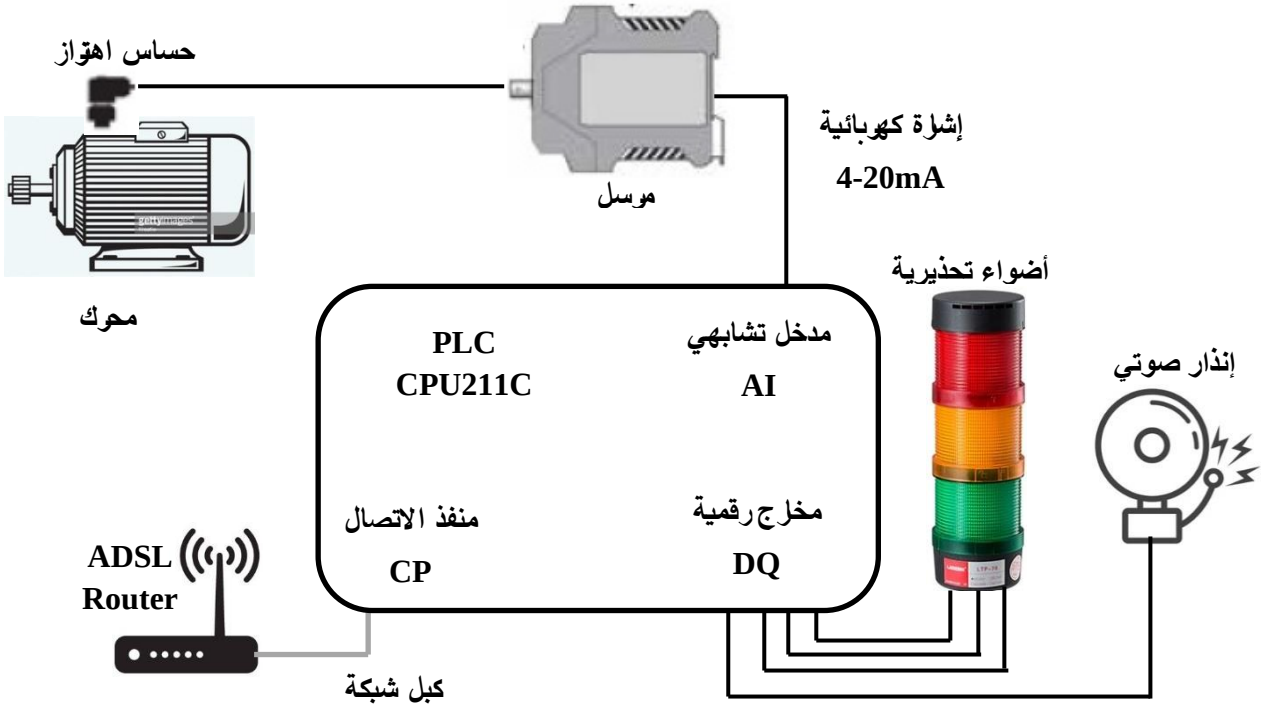
الشكل (3-6) جهاز SIEMENS CPU211C

لكن جهاز الـ PLC يعتبر بلا أي قيمة من دون وجود برنامج لتحديد الأهداف والنتائج المطلوب تحقيقها من النظام .عادة ما تتم كتابة هذا البرنامج المؤلف من مجموعة تعليمات من قبل شخص مؤهل ذو خبرة فنية في هذا المجال فعلى الرغم من تشابه أساسيات برمجة أجهزة الـ PLC بين مختلف الشركات المنتجة

إلا أن كل شركة تمتلك برمجيات مختلفة عن غيرها يتم عن طريقها برمجة الأجهزة الخاصة بتلك الشركة فقط دون غيرها .

يستخدم البرنامج SIEMENS STEP7 V15.0 في كتابة التعليمات الخاصة بجهاز الـPLC المقترح استخدامه في هذا البحث ويتميز البرنامج السابق بالمرونة في التعامل واحتوائه على عدد كبير من التعليمات الضرورية لأي مشروع أتمتة بالإضافة إلى قدرته على بناء وإدارة قواعد البيانات وتصديرها كما أنه يتضمن تعليمات خاصة تستخدم في الربط مع شبكات الاتصال السلكية واللاسلكية بمختلف أنواعها. كذلك يؤمن برنامج المحاكاة Simulation الموجود ضمنه للمبرمج تجريب واختبار البرنامج على الحاسب قبل نقله لجهاز الـ PLC .

على اعتبار أن المحرك الذي سنختاره في البحث تقدر استطاعته بحدود الـ 8 Kw أي أنه من الصنف الأول بحسب الـISO 10861 وعليه فإنه يمكن أن نمثل بنية منظومة الـ PLC المقترحة كما في الشكل (7-3) .



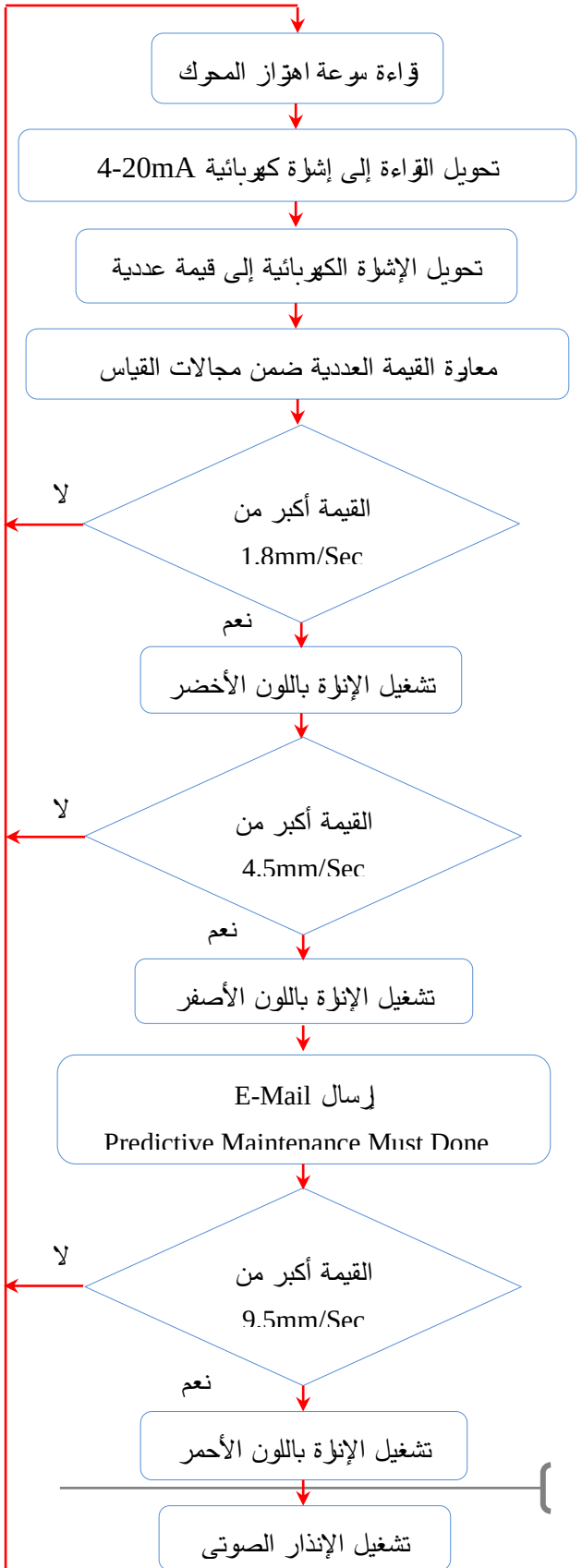
الشكل (3–7) بنية منظومة الـ PLC المقترحة

لتنفيذ المنظومة السابقة بحيث تكون قادرة على القيام بمهامها في التنبؤ بأعطال المحرك لابد من برمجة الـ PLC وتزويده بالتعليمات الضرورية لتطبيق منهجية الصيانة التنبؤية كما وردت في الشكل (2-20) .

يوضح الشكل (3-8) خوارزمية البرنامج المطلوب

تحدد النقاط التالية الأدوات المستخدمة في تنفيذ الخوارزمية :

- يتم تنفيذ عملية قراءة سرعة الاهتزاز من قبل حساس الاهتزاز المثبت على المحرك .
- يقوم المرسل Transmitter بتحويل القيمة المقاسة القادمة من الحساس إلى إشارة كهربائية متغيرة ضمن المجال 4-20mA .
- يستقبل المدخل التشابهي AI الموجود على جهاز الـ PLC الإشارة الكهربائية ويحولها إلى قيمة عددية من النوع الصحيح Integer ضمن المجال [-32,768…+32,767] .
- يقصد بمعايرة الحساس تحديد مجالات القراءة ضمن الحدود المسموحة , على سبيل المثال فإن حدود سرعة الاهتزاز للمحرك الذي اخترناه بحسب جدول مواصفة الـ ISO تتراوح بين 0.28 mm/Sec إلى 45 mm/Sec وبالتالي يجب أن نحول القيمة الصحيحة الناتجة عن المرحلة السابقة إلى قيمة عددية من النوع الحقيقي Real بفاصلة عشرية بحيث تكون متناسبة مع كل من الحد الأدنى 0.28 والحد الأعلى 45 .



يتم تنفيذ عملية المعايرة من خلال برنامج الـ PLC

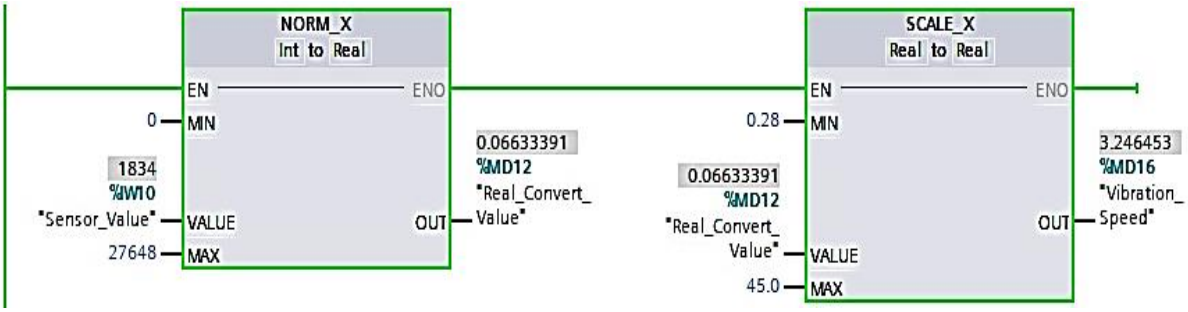
وذلك باستخدام التعليمتين :

NORM_X و SCALE_X والمتواجدتين في

برنامج STEP-7 .

الشكل (3-8) خوارزمية البرنامج

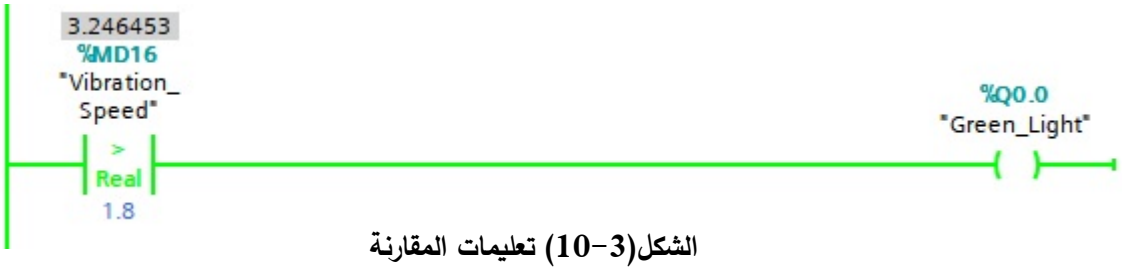
حيث تقوم التعليمة NORM_X بتحويل العدد الصحيح الموجود على المدخل التشابهي إلى عدد حقيقي ومن ثم نقل القيمة الناتجة إلى تعليمة SCALE_X التي ستقوم بتحويلها إلى قيمة تتناسب مع الحد الأدنى MIN والأعلى MAX لمجال القياس .يمثل الشكل (3-9) عملية المعايرة لحساس الاهتزاز وفق البرنامج الذي تمت كتابته بعد تنفيذ عملية المحاكاة .



الشكل(3-9) تعليمات المعايرة

نلاحظ أن القيمة العددية لحساس الاهتزاز Sensor_Value = 1834 أصبحت تعادل بعد تنفيذ التعليمات سرعة اهتزاز بقيمة Vibration_Speed = 3.246 mm/Sec

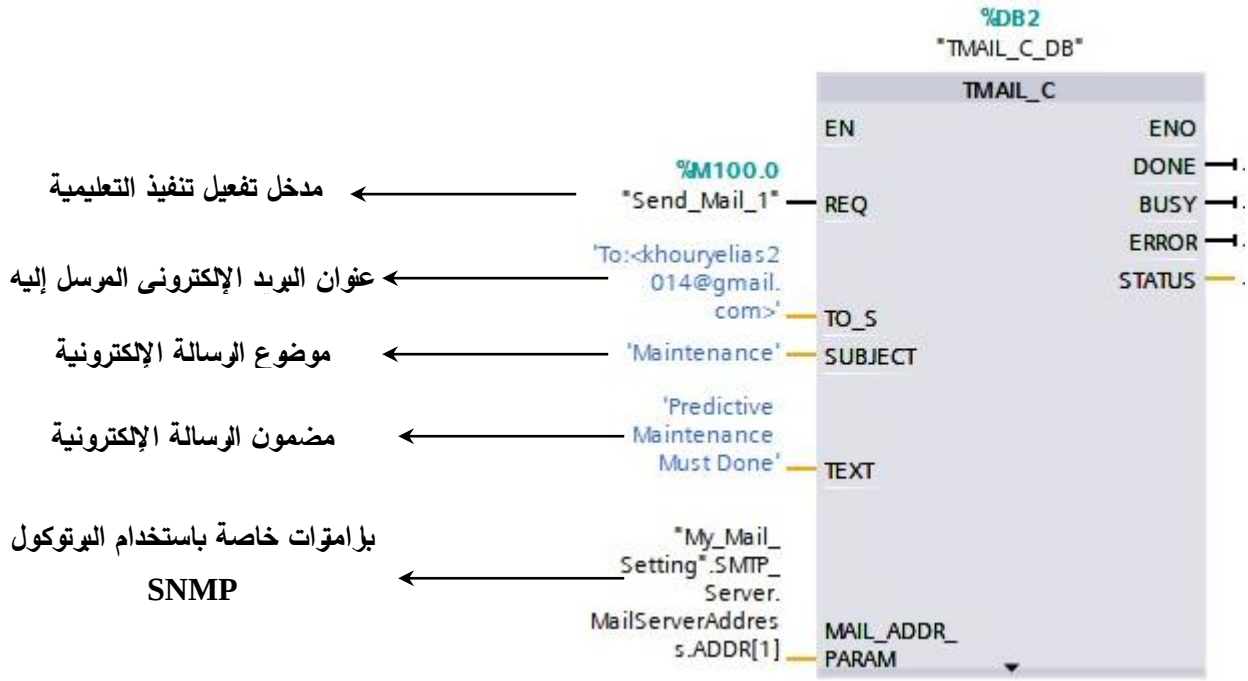
- تنفذ عمليات المقارنة بين قيمة سرعة الاهتزاز المقروءة مع القيم المعيارية الثلاث من خلال مجموعة تعليمات المقارنة Compare والتي ستقوم بتفعيل الخرج عند تحقق شرط المقارنة كما يوضح الشكل (3-10) .



الشكل(3-10) تعليمات المقارنة

في الشكل السابق تمت مقارنة قيمة سرعة الاهتزاز الناتجة من المرحلة السابقة مع القيمة 1.8 وهي الحد الفاصل الذي سيتم عنده إرسال تحذير ضوئي للمستخدم وهو ما يمكن أن نلحظه من خلال عملية المحاكاة بتشغيل الضوء الأخضر Green_Light .

- يتضمن برنامج Step-7 تعليمة TMAIL_C مخصصة فقط لإرسال الرسائل الإلكترونية حيث يكتفي المبرمج فقط بتحديد البارامترات الضرورية لتنفيذ التعلمية مثل عنوان البريد الإلكتروني ونص الرسالة كما في الشكل (3-11) .



الشكل (3-11) تعليمة TMAIL_C لإرسال الإيميل

من المهم عند استخدام التعليمة السابقة الالتزام بقواعد وإعدادات التعليمة مثل ضرورة وضع الأقواس '<>' للدلالة على عنوان البريد الإلكتروني , والالتزام أن يكون مضمون الرسالة لا يتجاوز 240 محرف .

تجدر الإشارة أيضا أنه لا يمكن استخدام التعليمة في شبكات المنشآت الخاصة التي تسمح فقط بالوصول إلى الإنترنيت عبر مخدم Proxy إلا بعد أن يتم تعديل بعضا من إعدادات تلك المخدمات ليتم إرسال الرسائل الإلكترونية إلى مخدمات البريد الإلكتروني الخارجية مثل Gmail .

من خلال ما سبق نلاحظ أنه بالإمكان استخدام نظام الـ PLC في تنفيذ الصيانة التنبؤية فهو قادر على التعامل بكفاءة عالية مع أنظمة حساسات الاهتزاز بالإضافة إلى قدرته على إرسال الرسائل الإلكترونية وإنذار المستخدم بطرق مختلفة وذلك كله ضمن تكلفة قليلة .

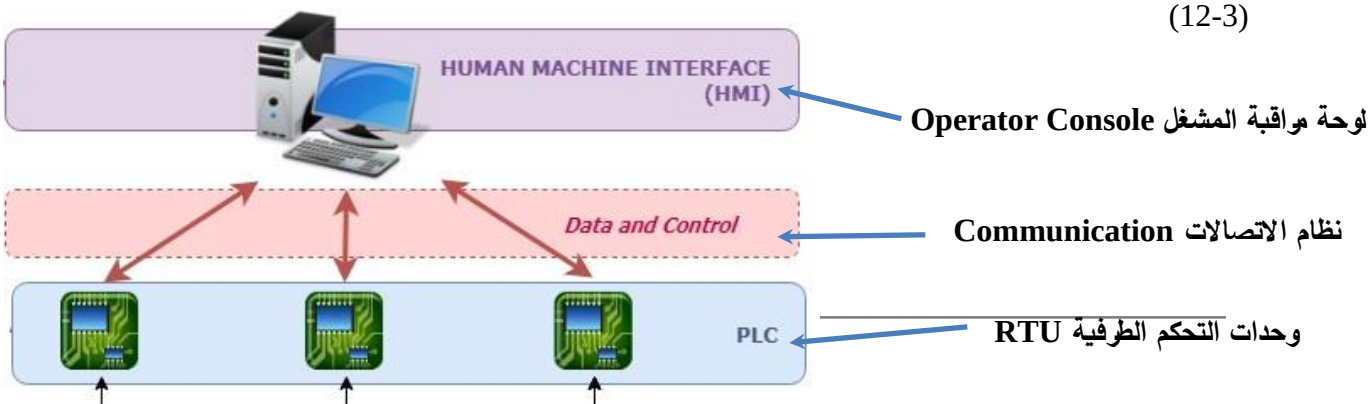
2-2-3 باستخدام أنظمة الـ SCADA

مصطلح SCADA هو اختصار لـ Supervisory Control And Data Acquisition والتي تعني التحكم الإشرافي وتحصيل البيانات وهي نظام تقني يسمح للمستخدم بجمع البيانات من التجهيزات التي تفصله عنها مسافات بعيدة كما يمكن عن طريقها أيضا إرسال بعض أومر التحكم لتلك التجهيزات [38] .

تأتي أهمية الـ SCADA في قدرتها على توفير البيئة المناسبة لمتابعة العملية الإنتاجية ومراقبة مختلف عناصرها من محركات وحساسات وصمامات بغض النظر عن مواقعها الجغرافية وهو الأمر الذي ساعد في التخفيف من ضرورة التزام مشغلي الآلات على البقاء بقربها لمراقبتها .تظهر أهميتها خاصة في المنشآت الكبيرة والتي تتوزع فيها مختلف التجهيزات على مسافات كبيرة مثل أنابيب النفط وأنظمة نقل المياه وصوامع الحبوب .كما ظهرت أهميتها من خلال قدرتها على تخزين وإدارة البيانات المتعلقة بالآلة وأرشفة تلك البيانات ضمن السجلات الإلكترونية .

بداية الـ SCADA كانت في خمسينيات القرن الماضي [38] عبر استخدام أجهزة الحاسب في تنفيذ بعض عمليات التحكم في الإنتاج وازدادت استخداماتها مع ظهور الـ PLC بحيث أصبحت مرافقة له في مختلف عمليات الأتمتة وخاصة مع تطور أنظمة العرض المرئي واستخدام الشاشات اللمسية مختلفة الأحجام ,ومع تطور تقنيات الاتصال والشبكات أصبحت الـ SCADA جزءا لا يتجزأ من أي منظومة تحكم ولم تعد محصورة فقط في الاستخدام ضمن المسافات البعيدة بل أصبحت بديلا عن المفاتيح والضواغط الميكانيكية في الآلات الصغيرة والتي تم الاستعاضة عنها بأزرار لمسية .

نظرا لذلك فإنه لابد لنا في هذا البحث أن نستعرض طرق تطبيق الصيانة التنبؤية باستخدام نظام الـ SCADA ,ولنتعرف أكثر عليها يجب أن نتعرف على عناصرها ومكوناتها [38] .كما يوضح الشكل (12-3)



الشكل(3-12) عناصر الـ SCADA

تنقسم الـ SCADA إلى المكونات التالية :

- **لوحة مراقبة المشغل Operator Console** الجهاز الرئيسي الذي تتم بواسطته عمليات المراقبة والتحكم بالتجهيزات الأخرى. تتنوع لوحات المراقبة من الشاشات اللمسية ذات القياسات المختلفة مثل (7, 9 ,22 بوصة) إلى أجهزة الحاسب المركزية.
- **واجهة استخدام الآلة Human Machine Interface (HMI)** البرنامج الذي سيقوم بإدارة كافة التجهيزات والعناصر الأخرى من خلال الواجهات والشاشات الرسومية التي تسمح للمشغل بالتحكم والمراقبة في الوقت الحقيقي. يتم تصميم الواجهات الرسومية من قبل شخص مبرمج مؤهل باستخدام برمجيات خاصة توفرها شركات مختلفة مثل SIEMENS , EasyView , Delta .
- **وحدة التحكم الطرفية Remote Terminal Unit (RTU)** بوابة العبور والاتصال بين جهاز المراقبة الرئيسية والتجهيزات الحقلية مثل الحساسات والمحركات يتم عبرها نقل الأوامر البرمجية إلى المحركات وتحويل إشارات الحساسات الكهربائية إلى أشكال ومؤشرات رسومية ويمثل جهاز الـ PLC أحد أكثر أنواع الـ RTU استخداما .
- **نظام الاتصالات Communication** المسؤول عن الربط بين لوحة المراقبة والـ RTUs والذي يؤمن تدفق المعلومات والأوامر بشكل مستمر وحقيقي بينهما من خلال الكابلات المختلفة وحتى إمكانية استخدام وسائل الاتصال اللاسلكية مثل شبكة الإنترنيت .

أمام هذا التنوع الكبير في تجهيزات الـ SCADA يقف مصممي النظام حائرين في كيفية اختيار النظام المناسب. نذكر فيمايلي بعض النقاط التي يجب الأخذ بها عند اختيار نظام الـ SCADA :

- يعتمد اختيار نظام المراقبة الرئيسي على حجم وطبيعة العمل فالشاشات اللمسية قادرة على القيام بأغلب المهام الموكلة إليها حيث أنها تمتلك ذاكرة داخلية بسعات مختلفة وبالتالي يمكن اختيار شاشات صغيرة نسبيا في حال كانت الآلة بسيطة ولا تحوي عددا كبيرا من الواجهات الرسومية طبعا بازدياد حجم الآلة يجب على مصمم النظام الانتقال إلى مستوى أعلى من الشاشات في

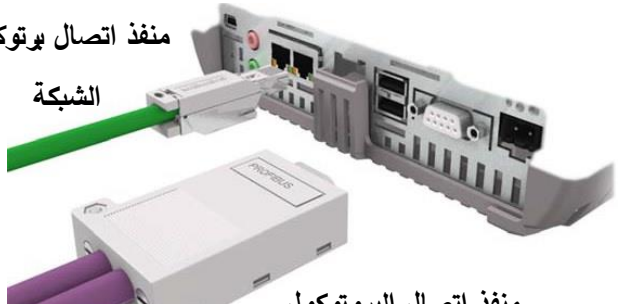
حين أن استخدام أجهزة الحاسب يصبح أمرا حتميا عندما تكون المهمة الموكلة لنظام الـ SCADA المراقبة والتحكم بكامل المنشأة مثل مصانع الحديد والإسمنت كذلك يفضل أغلب المصممين استخدام الحاسب في الحالات التي يتطلب فيها العمل أرشفة وتخزين بيانات كبيرة وضخمة حيث لا تمتلك ذاكرة الشاشات اللمسية القدرة الكافية على تخزين البيانات أو معالجتها.

- قبل اختيار جهاز المراقبة يجب على المصمم التأكد من توافق نوع جهاز الـ PLC مع الشاشة المختارة ويظهر ذلك من خلال البرنامج التصميمي للشاشة الذي سيقوم بعرض أجهزة الـ PLC المتوافقة معه .
- التحقق من توافق بروتوكولات الاتصال بين جهاز المراقبة ونظام الـ PLC والذي سيحدد نوع الكابلات المستخدمة في الربط بين كلا الطرفيتين فعلى سبيل المثال يمكن استخدام الكابلات المزدوجة المعزولة في حالات استخدام البروتوكول الصناعي RS-485 أما في الحالات التي يستخدم فيها البرتوكول TCP/IP في الربط فلابد من استخدام كابلات الشبكة ETHERNET .
- الكلفة المادية أيضا من الأمور التي تؤخذ في الحسبان حيث تتراوح أسعار الشاشات اللمسية في شركة SIEMENS بدءا من 200 إلى 3000 دولار بحسب مواصفاتها الفنية في حين أن سعر جهاز الحاسب الصناعي Industrial PC من نفس الشركة يتجاوز الـ 6000 دولار ,يمكن أيضا استخدام حاسب شخصي PC بمواصفات جيدة وإضافة كرت اتصال لدعم الشبكات الصناعية بكلفة تصل إلى 500 دولار مع الأخذ بالاعتبار كفاءة ووثوقيه الأداء في الحواسب الصناعية.

نقترح استخدام شاشة SIEMENS Comfort Panel TP700 اللمسية الملونة في تنفيذ البحث ضمن المطحنة فهي تتميز بالمواصفات التالية [39] :

- شاشة ملونة TFT بقياسات مختلفة "7",9",15",22".
- دقة الشاشة 800x480 Pixels .
- دقة الألوان 16 M Color .
- ذاكرة داخلية بسعة 12 MB
- تدعم مختلف برتوكولات الاتصال مع نظام الـPLC .
- منافذ USB لوصل أجهزة مختلفة مثل الطابعات.
- كلفة قليلة نسبيا تتراوح بحدود 1200 دولار.

أما برمجة الشاشة فتتم باستخدام برنامج



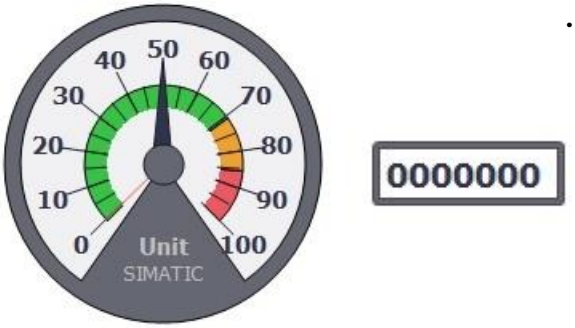
SIEMENS WinCC V15 والذي يوفر للمبرمج العديد

من أدوات العرض الرسومية التي تسمح للمستخدم

بمراقبة بيانات الآلة وإرسال الأوامر عبر الأزرار اللمسية .

الشكل (3-13) الشاشة اللمسية ومنافذ الاتصال

تعتبر كل من الأداتين I/O Field , Gauge الموضحتان في الشكل من أهم أدوات العرض المرئي للقيم العددية واللتان تساعدان المشغل على قراءة بيانات الآلة .

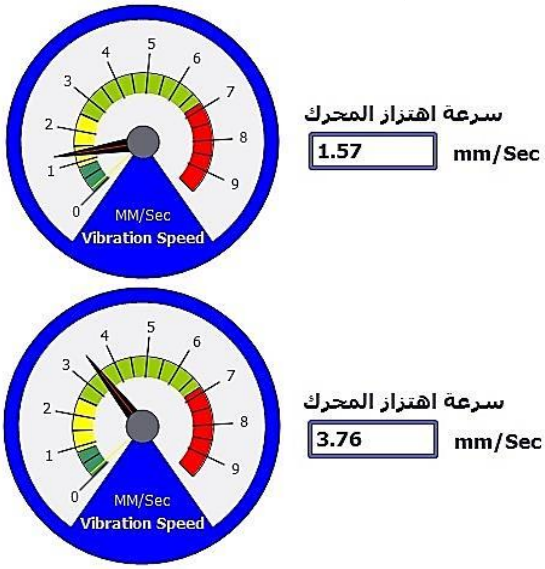


فالأداة I/O Field تقوم بعرض القيمة العددية بمختلف أنواعها كما يمكن لمصمم الواجهة الرسومية التحكم بمستوى الألوان و تغيير لون الحقل عند وصول القيمة إلى حدودها العليا .

في حين توفر الأداة Gauge عرض مرئي على شكل مؤشر قياس مما يجعها مناسبة لعرض قيم متغيرة مثل الحرارة والضغط والسرعة كذلك بإمكان المصمم تغيير المظهر الخارجي لشكل المؤشر والتحكم بالقيمة العظمى والصغرى للعرض مع إمكانية تقسيم المؤشر إلى عدة مجالات عددية وإضفاء لون محدد على كل جزء .

الشكل(3-14) الأدوات Gauge , I/O Field

أما عن القيمة العددية التي سنعرضها على الشاشة في مشروعنا فهي قيمة سرعة الاهتزاز بعد تطبيق عمليات المعايرة السابقة ضمن نظام الـPLC وبالتالي يتم الربط برمجيا بين أدوات العرض السابقة ونظام الـPLC من خلال قراءة الشاشة للمتحول Vibration_Speed الموجود في برنامج الـPLC ومن ثم وبعد إجراء التعديلات في خصائص الأدوات مثل الألوان و مجالات القراءة نكون قد حصلنا على النتائج المبينة في الشكل (3-15) وذلك من خلال تطبيق برنامج المحاكاة أيضا لقيم مختلفة.



من خلال النتائج يمكن أن يتبين لنا مدى المرونة والكفاءة التي تحققها أنظمة الـ SCADA فمثلا نلاحظ تحول حقل القيمة العددية إلى اللون الأحمر عند تجاوز سرعة الاهتزاز القيمة الحدية 7.1 التي تمثل دخول الاهتزاز مرحلة الخطر في حين أنه تم تقسيم أداة المؤشر إلى عدة مجالات بالاعتماد على جدول المواصفة السابق وإعطاء لون مناسب لكل مجال الأمر الذي يسهل على المشغل ملاحظة أداء الآلة .

يمكن أيضا أن نستخدم نظام الـSCADA في أرشفة قيم الاهتزاز وتخزينها لتتم مراجعتها لاحقا

الشكل (3-15) نتائج تطبيق نظام الـ SCADA

3-2-3 باستخدام تقنية إنترنيت الأشياء IoT

استطاعت تقنيات إنترنيت الأشياء المختلفة إحداث ثورة في كافة المجالات الصناعية والتجارية بل وحتى المنزلية وبدأت مصطلحات مثل المنزل والثلاجة الذكية وحتى المدن الذكية بالظهور إلى العلن في حين دخل العالم الصناعي في حقبة جديدة بدأت باستخدام تلك التقنيات في مجال تصنيع خطوط الإنتاج و ظهور ما بات يسمى بالمصنع الذكي Smart Factory .

لم تقف العديد من الشركات البرمجية مثل IBM, Microsoft مكتوفة اليدين أمام هذا التطور التقني وقامت بالدخول في عالم إنترنيت الاشياء من بوابة الحوسبة السحابية Cloud-Computing وهو المصطلح الذي عرفته شركة IBM بأنها إمكانية التوصيل عند الطلب عبر شبكة الإنترنيت إلى مصادر وتطبيقات الحوسبة مثل تخزين البيانات ومعالجتها وإدارتها عن بعد وذلك بتأجير تلك المصادر بدلا من شرائها مما يوفر على الشركات والمنشآت تكاليف شراء تلك الموارد أو صيانتها [40] .

مخدم Mindsphere هو نظام تشغيل مفتوح قائم على السحابة Cloud-Based يمكن من خلاله توصيل مختلف الآلات وخطوط الإنتاج عبر تقنية إنترنيت الأشياء بهدف الحصول على رؤية شاملة عن حالة الآلة في الوقت الفعلي والتأكد من سلامة أدائها وجودة مخرجاتها والتنبؤ بصيانتها [41] .تم إطلاقه من قبل شركة SIEMENS في العام 2017 ويوفر للمستخدم عبر تطبيقاته المتعددة تحديد الانحرافات عن معايير مؤشر الأدوات الرئيسي Key Performance Indicator (KPI) الذي يمثل مقياسا لأداء الآلة بالإضافة إلى تلقي التنبيهات التلقائية عبر عدة وسائل .يبين الشكل (3-16) البنية الهيكلية لنظام الـ Mindsphere .

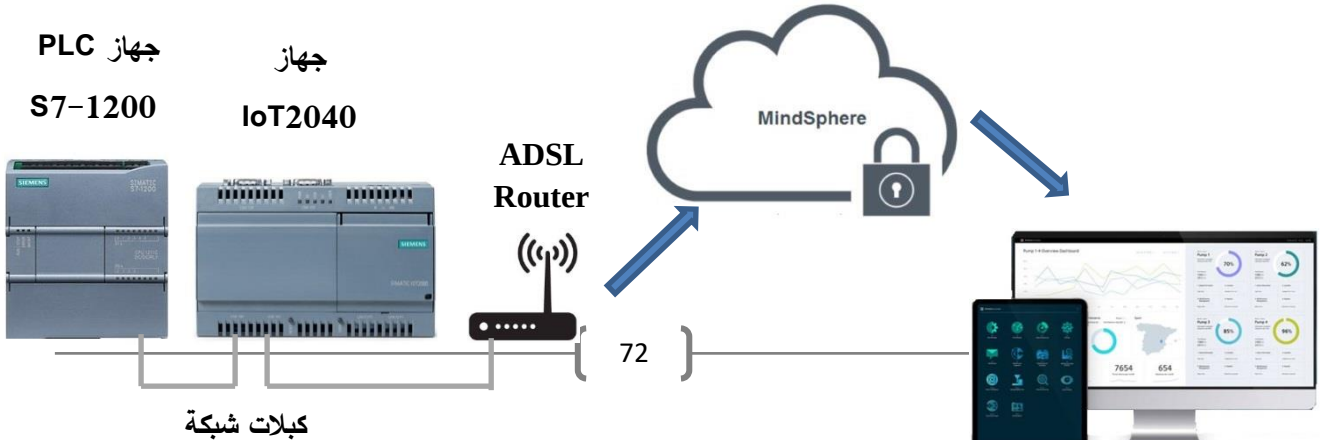
الشكل(3-16) البنية الهيكلية لـ Mindsphere [42]

وكما نلاحظ من الشكل السابق فإن هيكلية Mindsphere ترتكز على ثلاث طبقات [42] :

- **طبقة النظام الفيزيائي System** تمثل جميع الأدوات التي تزود الطبقات الأعلى بالبيانات المعبرة عن الحالة الحقيقية للآلة مثل حساسات الاهتزاز وأجهزة قراءة القيم الكهربائية من جهود وتيارات وتعتبر أجهزة الـPLC من أهم عناصر هذه الطبقة كونها تمثل الآلية التي يتم من خلالها توصيل الحساسات المختلفة .
- **طبقة الاتصال Mindsphere Connect** وتعتبر الوسط المادي الذي يتم فيه تجميع مختلف البيانات القادمة من طبقة النظام ليصار إلى إرسالها إلى الطبقة الأعلى وتستخدم في هذه الطبقة معدات خاصة بإنترنيت الأشياء مثل SIEMENS IoT2040 .
- **طبقة التطبيق Mindsphere** تحتوي على مختلف التطبيقات البرمجية السحابية التي توفر للمستخدم العديد من وظائف المراقبة والتنبؤ بحالة الآلة مثل العرض المرئي لمؤشرات الأداء بالإضافة إلى تخزين هذا الكم الهائل من البيانات القادمة من طبقة النظام وفلترتها وتحليلها ليتم إنشاء نموذج تنبؤي عن أداء الآلة في المستقبل .يتم استخدام تلك التطبيقات من خلال مختلف الأجهزة المحمولة المتصلة بشبكة الإنترنيت .

حتى نكون قادرين على تنفيذ هذه التقنية يقترح هذا البحث التجهيزات التالية :

- جهاز PLC SIEMENS S7-1200 الذي سيقوم بقراءة قيم الحساسات الاهتزاز المتصلة معه وتحويلها إلى قيم عددية تتناسب مع سرعة الاهتزاز .
- جهاز SIEMENS IoT2040 يعتبر بمثابة البوابة الذكية التي تقوم بإنشاء الاتصال بين جهاز الـ PLC المستخدم و نظام الـ Mindsphere والطريق الآمن والمحمي لمرور البيانات المرسلة عبر شبكة الإنترنيت . يمثل الشكل (3-17) آلية توصيل التجهيزات



الشكل(3-17) آلية توصيل Mindsphere

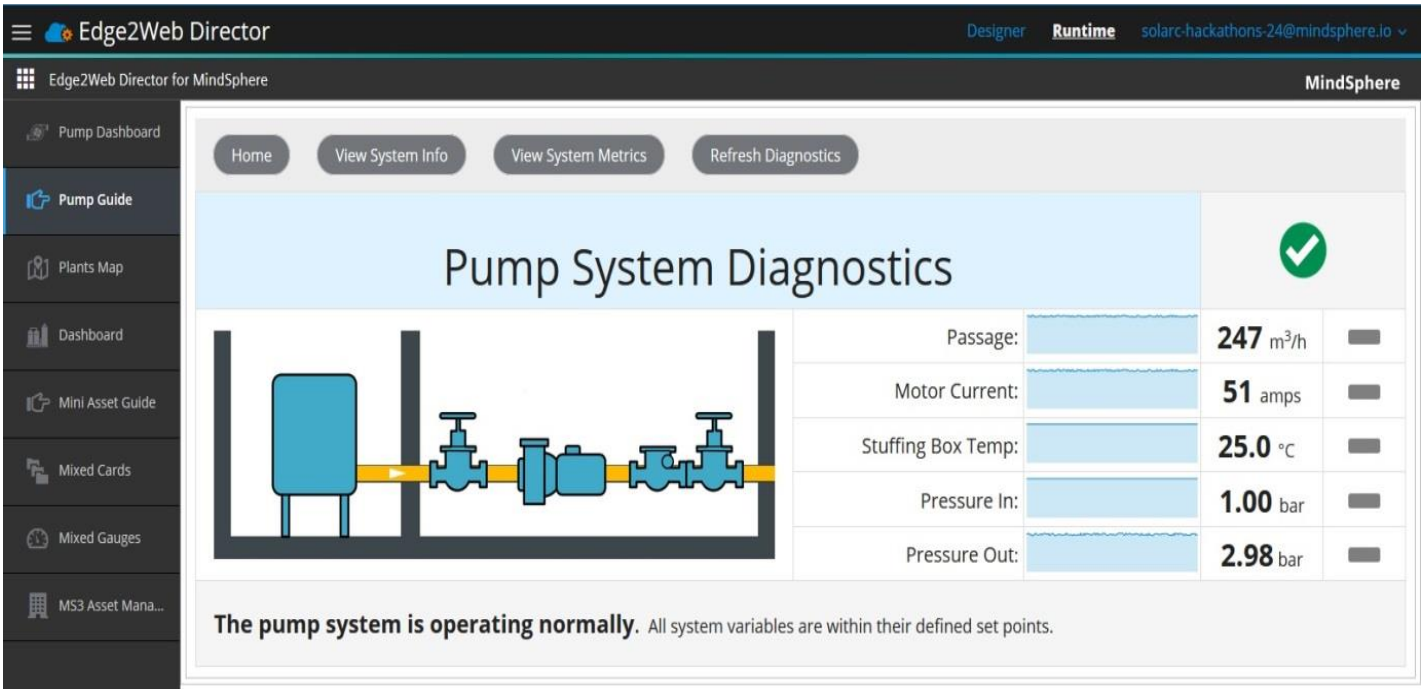
بعد إتمام عملية توصيل التجهيزات السابقة يقوم المستخدم بالدخول إلى موقع Mindsphere إما من خلال جهاز الحاسب عبر الموقع https://siemens.mindsphere.io/en أو باستخدام تطبيق الهاتف المحمول وذلك بهدف تسجيل دخوله لأول مرة واختيار اسم المستخدم وكلمة المرور .

بعد الانتهاء من ذلك يبقى على المستخدم تزويد الموقع بعنوان الإنترنيت IP Address الخاص بجهاز IoT2040 ومن ثم تحديد البارامترات التي يرغب بمراقبتها .

يوفر Mindsphere لمختلف المستخدمين تطبيقات متنوعة تتعلق بمجال الصيانة التنبؤية مثل [43] :

- Predictive Learning يسمح التطبيق بإنشاء نماذج تنبؤية باستخدام تقنيات تعلم الآلة Machine Learning والتي تؤمن للآلة امتلاك خاصة التعلم الأمر الذي يساعد الشركات في تحسين جودة المنتج وتقليل حالات الفشل للآلة .
- Fleet Manager من أهم تطبيقات نظام Mindsphere فهو يتيح للمستخدم مراقبة البارامترات من خلال عدة مؤشرات رسومية مزودة بتأثيرات ملونة تحدد حالات الخطر والإنذار لهذه البارامترات كما يتضمن إمكانية التنبيه للمستخدم وضبط الإنذارات المرتبطة بمؤشرات الأداء .

يوضح الشكل (3-18) مثالا عن استخدامات Mindsphere في عرض البارامترات الخاصة بمحطة ضخ المياه مثل الضغط و شدة تيار المضخة



الشكل(3-18) استخدام تطبيق Fleet Manager في محطات الضخ

من المهم عند اختيارنا استخدام التطبيقات السحابية في الـ Mindsphere الأخذ بالاعتبار الكلفة المرتفعة نسبيا لهذا الاختيار , فبالإضافة إلى كلفة جهاز الـ PLC التي تتراوح بحدود 100 دولار تبلغ كلفة جهاز الـ IoT 2040 ما يعادل 700 دولار أما بالنسبة لتكاليف التطبيقات السحابية فتبدأ من قيمة 35 دولار شهريا مقابل مراقبة 5 مؤشرات أداء و السماح لـ 3 مستخدمين باستخدام التطبيقات .تزداد التكلفة في حال الرغبة بزيادة عدد المؤشرات أو عدد المستخدمين حيث يمكن لمن يرغب بتحديد تكاليف المراقبة الدخول إلى موقع الشركة على العنوان التالي :

https://www.dex.siemens.com/mindsphere/applications/SIMATIC-Performance-Insight

شكلت منصة Mindsphere البنية التحتية لتقديم الحلول المناسبة لمختلف الشركات والمنشآت العالمية المتخصصة في استشارة تقنية المعلومات وتقديم خدمات الأعمال مثل شركة TaTa Consultancy Services , ATOS عبر العديد من التطبيقات خاصة في مجال سلاسل التوريد بالإضافة إلى استخدام التطبيق في مجال نقاط شحن السيارات الكهربائية والمدن الذكية [44] .

3-2-4 معوقات تطبيق الحلول المقترحة Suggested Solutions Implementation Constraints

للأسف الشديد اقتصرت الدراسة على وضع خطة تجريبية لتطبيق منهج الصيانة التنبؤية واقتراح الحلول المناسبة من دون القدرة على تطبيق هذه الحلول الاكتفاء فقط بإجراء عملية المحاكاة للبرامج المستخدمة وذلك للأسباب التالية :

- الحاجة إلى إيقاف العمل والإنتاج في المطحنة لفترة لا تقل عن يومي عمل بهدف تثبيت الحساسات على المحركات المطلوبة ووصلها مع لوحات الـ PLC وهو الأمر المستبعد حاليا بسبب حجم الضغط الهائل على المطحنة واضطرارها لتحقيق الطاقة الإنتاجية اليومية .
- تحتاج عملية قراءة بيانات الاهتزاز وتحليلها والحصول على النتائج باستخدام الحلول المقترحة لفترة تجريبية طويلة تتجاوز المدة الزمنية المطلوبة لتقديم البحث .
- الكلفة الكبيرة لاستخدام مخدم Mindsphere من تجهيزات واشتراكات شهرية تعتبر أحد أهم المعوقات في تطبيق الحل باستخدام إنترنيت الأشياء بالإضافة إلى صعوبة تقنية تتمثل في ضرورة تأمين خط إنترنيت ADSL بسرعات عالية نسبيا إلى داخل المطحنة لوصله مع نظام الـ PLC .

- قوانين الحظر الجائر المفروضة على بلادنا والتي تمنع بموجبها الشركات العالمية من تقديم أية خدمات لأي منشأة واقعة ضمن أراضي الجمهورية العربية السورية بما فيها خدمات المنصات السحابية وبالتالي لا يمكن لأجهزة SIEMENS إنشاء أي عملية اتصال عبر شبكة الإنترنيت مع مخدم Mindsphere بسبب استخدامها لعناوين الإنترنيت الخاصة ببلادنا .

نتمنى أن تزال تلك العقبات قريبا ويكون هذا البحث قابلا للتنفيذ العملي ويستفاد منه في أكثر من منشأة.

الفصل الرابع Chapter 4

الاستنتاجات والمقترحات Conclusions & Suggestions

حاول هذا البحث نقل صورة عن واقع الصيانة في أغلب المنشآت الصناعية في بلدنا ولفت انتباه المعنيين والقائمين على إدارة تلك المنشآت على بعض الأساليب الخاطئة التي يتم تطبيقها في مجال صيانة الآلات والمحركات الكهربائية ضمن المنشأة ,وقد خلص البحث إلى **الاستنتاجات** التالية:

- قدرة الصيانة التنبؤية على تقليل حالات الفشل في الآلات وبالتالي المحافظة على حد الأدنى من الأعطال في المنشأة وخاصة بالنسبة لبعض المحركات الرئيسية مثل مراوح الضغط العالي التي تمت الإشارة إليها ضمن البحث .
- يساهم هذا المفهوم الجديد من الصيانة في تخفيض كلفة الإنتاج وذلك عبر تخفيض النفقات المهدورة على استراتيجيات الصيانة الموجودة حاليا في المنشأة وتخفيض حجم مشتريات القطع التبديلية الغير ضرورية .
- تزيد الصيانة التنبؤية من مستوى الجودة للمنتجات من خلال المحافظة على وثوقية الآلة وزيادة مستويات الأداء عبر المراقبة الدائمة والحقيقية لمختلف بارامترات الآلة و البيئة المحيطة بها.
- تتوفر العديد من التقنيات المختلفة لتطبيق النهج الجديد وبالتالي يملك أصحاب القرار والفنيين في المنشأة عدة خيارات في تحديد التقنية الواجب استخدامها وذلك تبعا لنوع الآلة وأعطالها (ميكانيكية ,كهربائية , تشحيم) بالإضافة إلى الاعتبارات المتعلقة بالكلفة .
- يعتبر نموذج استخدام حساسات الاهتزاز الذي اعتمد عليه البحث في تنفيذ الصيانة التنبؤية من أكثر النماذج استخداما وأقلها كلفة بالإضافة إلى أنه يوفر وثوقية عالية في التنبؤ بأعطال المحركات الكهربائية .

- يمكن استخدام هذا النموذج وفق عدة طرق حيث اقترح البحث استخدام ثلاث أنظمة مختلفة (IoT – SCADA– PLC) لتنفيذ نموذج حساسات الاهتزاز مع تحديد التجهيزات المطلوبة و الكلفة التقديرية .
- توجه العديد من الشركات والمنشآت حول العالم إلى اتباع التقنية الجديدة وملاحظتها للفائدة الكبيرة التي اكتسبتها يجب أن يشكل دافعا لمنشآتنا للحاق بركب هذا التحول التقني الهام.

بالرغم من عدم قدرتنا على تنفيذ البحث عمليا في المطحنة والحصول على نتائج تلامس الواقع نتيجة العقبات التي تم ذكرها سابقا إلى أن النتائج التي حصلنا عليها عبر برامج المحاكاة بالإضافة إلى الاستنتاجات السابقة وبعد دراسة حالة الصيانة في منشأة جبلة لابد لنا من رفع **التوصيات** التالية :

- ضرورة استغلال فترة الصيانة الدورية السنوية للمطحنة في البدء الفوري في تطبيق نموذج حساسات الاهتزاز بهدف تطوير نهج الصيانة المتبع حاليا واعتماد نهج الصيانة التنبؤية .
- اعتماد خطة زمنية تدريجية في تنفيذ الصيانة التنبؤية حيث يمكن أن تكون البداية من مراوح الضغط العالي كونها تعتبر إحدى أهم المحركات تأثيرا على الإنتاج وذلك من خلال استخدام نظام الـ PLC المقترح ووصله مع حساسات الاهتزاز على المراوح ومن ثم دراسة تأثير نتائج العملية وتقييمها خلال مدة زمنية كافية .
- الانتقال بشكل تدريجي لباقي المحركات تبعا لأهميتها وتوسيع نظام الـ PLC ليكون قادرا على الاتصال مع حساسات الاهتزاز الإضافية التي سيتم تثبيتها على باقي المحركات .
- بعد توسيع نظام التحكم يمكن للمنشأة إضافة نظام SCADA مركزي يقوم بعرض قراءات الاهتزاز للمحركات وفق الحل المقترح وهو الأمر الذي سيجعل من كلفة استخدام الشاشة اللمسة أكثر فائدة كونها ستستخدم لعديد كبير من المحركات .
- ضرورة تأمين وتوصيل خط إنترنيت ADSL بسرعة مناسبة بهدف وصله مع الأنظمة السابقة .
- يمكن للقائمين على المطحنة وفي حال استطعنا تجاوز الحظر التقني المفروض على بلدنا إيجاد الصيغة القانونية والمالية المناسبة لربط الأنظمة السابقة مع منصة Mindsphere السحابية حيث يتوجب عندها فقط تأمين جهاز IoT2040 وتسديد الاشتراكات الشهرية .
- عدم الاكتفاء فقط بتقنيات الاهتزاز في تنفيذ الصيانة التنبؤية ومحاولة الاستفادة من التقنيات الأخرى التي تم ذكرها خلال البحث مثل الكاميرات الحرارية و مخابر تحليل الزيت .

References المراجع

المراجع العربية

[1] شلفون, عماد .(2021) **محاضرات مادة الجودة والوثوقية والصيانة** .الجامعة الافتراضية السورية

[2] توفيق, عبد الرحمن (2003) **إدارة الصيانة وتشغيل المرافق**. الطبعة 3, مركز الخبرات المهنية للإدارة .

[3] علي, تغريد (2017) " تحليل وتصميم منهجية لصيانة تنبؤية وقائية في محطة حاويات مرفأ اللاذقية الدولية ". **مشروع دكتوراه** ,كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ,جامعة تشرين .

المراجع الأجنبية

[4] Mobley, R.K.(2002). **An Introduction To Predictive Maintenance**. 2nd Edition, USA: Elsevier Science .

[5] Doss, P.(2019)." **Design and Implementation of Predictive Maintenance in Mechatronic System**". Diploma Thesis Assignment, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Ostrava .

[6] Milojevic, M. and Nassah, F.(2018)." **Digital Industrial Revolution With Predictive Maintenance** ",CXP Group .

[7] Kiangala, K.S and Wang, Z. (2018). "Initiating Predictive Maintenance for a Conveyor Motor In a Bottling Plant Using Industry 4.0 Concepts ", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** .

[8] Parida, A. and Kumar, U. (2009). **Maintenance Productivity and Performance Measurement** .Springer .

[9] Mobley, R.K and Higgins, L.R and Wikoff , D.J. (2008). **Maintenance Engineering Handbook** .7Th Edition ,USA: McGraw –Hill .

[10] https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/maintenance .

[11] Mobley, R.K.(2004). **Maintenance Fundamentals** . 2nd Edition, USA: Elsevier Inc.

[12] Thomas, D.S and Weiss, B.A. (2020). "Economics of Manufacturing Machinery Maintenance ", **National Institute of Standards and Technology** .

[13] Poor, P. and Zenisek, D. and Basel, J. (2019) "Historical Overview of maintenance Management " , **Industrial Engineering and Operations Management** .

[14] Trojan, f. and Marcal, .R.F. (2017) " Proposal of Maintenance –Types Classification to Clarify Maintenance Concepts in Production and Operations Management ", **Journal of Business and Economics**, Volume 8, No.7, pp.560-572.
[15] Khazraei, K. and Deuse, J.(2011) " A Strategic Standpoint on Maintenance Taxonomy", **Journal of Facilities Management**, Vol.9, No.2, pp.96-113.
[16] Lee,J. and Scott, L.W.(2006) "Zero-Breakdown Machines and Systems: Productivity needs for Next –Generation Maintenance", **Engineering Assets Management** :Springer ,pp31-43.
[17] Fitch, E.C.(1992) .**Proactive Maintenance for Mechanical Systems: An Activity Conducted to Detect and Correct Root Cause Aberrations of Failure**. USA: Elsevier Advanced Technology .

[18] https://www.getmaintainx.com/ .
[19] National Communication System Technology and Standards Division. (1996) **Telecommunication: Glossary Of Telecommunication Terms**, USA, General Services Administration Information Technology Service .
[20] British Standards Institute .(2010) **Maintenance Terminology**, UK, British Standards Institute .
[21] https://www.upkeep.com/blog/choosing-the-right-maintenance-strategy .
[22] Hashemian, H.M.(2011) " State-of-The-Art Predictive Maintenance Techniques ", **IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement**, Vol.60, No.1,pp.226-236 .
[23] Shagluf, A., Longstaff, A.P., Fletcher, S. (2010) " **Maintenance Strategies to Reduce Downtime Due to Machine Positional Errors** ", Center for Precision Technologies, University of Huddersfield , UK.
[24] Wuest, T. and Sakib, N. (2018). Challenge and Opportunities of Condition-based Predictive Maintenance: A Review. USA: Elsevier B.V .
[25] Ran, Y. , Zhou, X. , Lin, P., Wen, Y., Deng, R. (2019) " A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches ", **IEEE Communications Surveys & Tutorials** .
[26] Sullivan, G.P., Pugh, R., Melendez, A.P., Hunt,W.D. (2002). **Operation & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency** .USA: U.S.Department of Energy .
[27] https://thedatalab.com/predictive-maintenance/pdm-use-cases/
[28] Mainnovation . (2018) **Predictive Maintenance 4.0 Beyond the Hype: PdM 4.0 Delivers Results** , PricewaterhouseCoppers PWC .
[29] https://www.ibm.com/blogs/cloud-computing/2020/01/13/predictive-maintenance-efficiencies-client-case-studies/ .
[30] Wang, K. (2016) " **Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) System –Industry 4.0 Scenario** ", WIT Transactions on Engineering Science, Vol.113 .
[31] Levitt, J. (2011) **Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance**. 2nd Edition, USA: Industrial Press Inc.
[32] Garvey, R. and Fogel, G.(1998) " **Converting Tribology Based Condition Monitoring Into Measurable Maintenance Results** ", Computational Systems Inc.
[33] Rienstra, A. and Hall, J.(2010) " **Ultrasonic Detection: Applying Acoustic Vibration Monitoring to Predictive Maintenance** ", SDT North America .

[34] Sanders, C.() " **A Guide to Vibration Analysis and Associated Techniques In Condition Monitoring** " , DAK Consulting .
[35] Girdhar, P. and Scheffer, C.(2004) **Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance** . 1st Edition, UK: Elsevier .
[36] IMI Sensors .(2012) **Industrial Vibration Sensors ,Switches & Instrumentation** , USA,PCB Group .
[37] SIMATIC .(2012) **S7-1200 Programmable Controller: System Manual** , SIEMENS AG.
[38] Boyer, S.A. (2004) **SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition**. 3rd Edition ,USA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society .
[39] https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6AV2124-0GC01-0AX0 .
[40] https://www.ibm.com/sa-ar/cloud/learn/cloud-computing .
[41] SIEMENS AG .(2019) **Mindsphere Analyze and Predict** .
[42] Mindsphere. (2022) **Getting Connected to Mindsphere: Getting Started** , SIEMENS AG.
[43] SIEMENS AG .(2019) **Mindsphere for Predictive Maintenance .**
[44] https://siemens.mindsphere.io/en/solutions/partner-use-cases.html .